



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การระบุตัวบุคคลโดยใช้โครงสร้างทางเรขาคณิต
ที่ไม่แปรผัน 3 มิติบนพื้นผิวใบหน้า

Person Identification Using 3D Geometric Invariance on Facial
Surface

สัญญาเลขที่ KREF025101

รศ. ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์

ผศ. พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จาก ทุนวิจัย สจล. ประเภท ทุนพัฒนากลุ่มและเครือข่ายวิจัย
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550
คณะวิศวกรรมศาสตร์



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การระบุตัวบุคคลโดยใช้โครงสร้างทางเรขาคณิต

ที่ไม่แปรผัน 3 มิติบนพื้นผิวใบหน้า

Person Identification Using 3D Geometric Invariance on Facial
Surface

สัญญาเลขที่ KREF025101

รศ. ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์

ผศ. พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จาก ทุนวิจัย สจร. ประเภท ทุนพัฒนากลุ่มและเครือข่ายวิจัย

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

คณะวิศวกรรมศาสตร์

12595044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การระบุตัวบุคคลโดยใช้โครงสร้างทางเรขาคณิตที่ไม่แปรผัน 3 มิติบน
พื้นผิวใบหน้า

แหล่งเงิน ทุนวิจัย สจล.

ประจำปีงบประมาณ 2550 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 1,742,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ 2550 ถึง 2552

หัวหน้าโครงการ รศ. ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

ผู้ร่วมโครงการวิจัย 1. รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์

2. ผศ. พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ

หน่วยงาน:

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตที่ไม่แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตในการระบุตัวบุคคล เราได้ศึกษาคุณสมบัติดังกล่าวทั้งในข้อมูล 2 มิติและ 3 มิติ สำหรับข้อมูล 3 มิติ เราประยุกต์ใช้แก้ปัญหาค้นหาการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงภาพสามมิติของใบหน้าที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันให้ตรงกัน โดยได้ข้อมูลภาพจากเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ในการศึกษาที่ใช้ทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์เป็นหลัก เริ่มจากการถ่ายภาพใบหน้าสามมิติแบบสเตอริโอ การสร้างพื้นผิว เวคเตอร์สัมผัส เวคเตอร์ปกติ ความโค้งเกาส์เซียน ความโค้งเฉลี่ย เส้นโค้งเชิงพาราโบลา ค่าปริมาตรเป็นศูนย์ ค่าแรงบิดของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นศูนย์ เนื่องจากจุดเด่นเอกลักษณ์เหล่านี้ มีความคงสภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอารมณ์สีหน้าที่เป็นการแปลงแบบแอฟเฟน จึงนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกันได้ และอาจนำไปสู่การรู้จำใบหน้าได้ ประสิทธิภาพการทำงานได้รับการทดสอบโดยใช้ฐานข้อมูลภาพ (GavabDB) ที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง และเปรียบเทียบการทำงานกับวิธี ICP (Iterative Closest Point) และ CPD (Coherent Point Drift) พบว่า วิธี CPD ให้ผลดีที่สุดแต่ใช้เวลาในการคำนวณนานมาก ส่วนวิธี ICP นั้นจำเป็นต้องผ่านการจัดให้ตรงกันแบบหยาบก่อน และใช้เวลาใกล้เคียงกับวิธีที่เสนอ งานวิจัยนี้สามารถนำไปสู่การรู้จำใบหน้าได้เนื่องจากให้ความแตกต่างระหว่างการจับคู่ภาพถูกต้องต่อการจับคู่ภาพผิดสูง โดยมีค่า SNR 1.2 ขณะที่วิธี ICP ได้ SNR 0.37 และ CPD ได้ SNR 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือโดยอาศัยความไม่แปรผันทางเรขาคณิตสัมบูรณ์สำหรับข้อมูล 2 มิติ ซึ่งได้จากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจากกลุ่มจุดของ minutiae เพื่อนำมาใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ จากการทำการวิจัยกับฐานข้อมูลภาพลายพิมพ์นิ้วมือจำนวน 1,680 ภาพ ซึ่งได้จากนิ้วมือ 240 นิ้ว พบว่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ ROC เท่ากับ 0.99967 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.713% และได้ค่าความผิดพลาด FNMR น้อยที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Person Identification Using 3D Geometric Invariance on Facial Surface

Project Leader: Assoc. Prof. Dr. Chuchart Pintavirooj

Project Assistant: 1. Assoc. Prof. Manas Sangworasil

2. Polsart Lerprasert

Affiliation: Electronic Department, Faculty of Engineering

ABSTRACT

This research concerns about the application of affine geometric invariant in both 3D and 2D data. For 3D, we applied to solve the problem of 3D alignment of faces in the presence of some facial expression changes. The data is 3D laser range image that obtained from a laser scanner. The studies are based on the differential geometry of the surface. This research starts with how to acquire the 3D data from the object. It is a 3D stereo triangulation. Then the differential geometry has been studied. The Curve, Tangential vector, Normal vector, Gaussians curvature, Mean curvature, Parabolic contour, Zero-volume and Zero-Torsion were used in this research, because these fiducial points are local. Moreover, since the fiducial points are relative affine invariant to local affine transformations, they allow for matching and alignment when facial expression changes affect part of the face. For comparison, we also contrast the alignment performance of our method with that of the ICP (Iterative Closest Point) and CPD (Coherent Point Drift) methods. The 3D face database GavabDB was the data set to test the alignment performance. The results show that the CPD is the best for alignment but it takes very long calculation time. The proposed method takes the same as time as the ICP but it needs the initial alignment. This research can be extended to the recognition because the separation between the true match and non-match is best for our zero torsion method (SNR of 1.2), higher than that of the ICP (SNR of 0.37) and the CPD methods (SNR of 0.15).

The concept derived in this research is also applied to 2D problem of fingerprint identification and/or verification when a query fingerprint is taken under conditions that differ from those under which the fingerprint of the same person stored in a data base was constructed. Performance of the algorithm yields an area of 0.99967 (perfect classification is a value of 1) under the receiver operating characteristic (ROC) curve based on a database consisting of a total of 1680 fingerprint images captured from the 240 fingers. The average probability of error was found to be 0.713%. Our algorithm also yields the smallest false non-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **IV** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

match rate (FNMR) for a comparable false match rate (FMR) when compared to well-known technique of DFB features and triangulation-based matching integrated with modeling nonlinear deformation. This work pushes the envelope of the fingerprint identification problem beyond state of the art in both performance and robustness.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน ทุนพัฒนากลุ่มและเครือข่ายวิจัย ทุนวิจัย สจล. ประจำปีงบประมาณ 2550



รศ. ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์
รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์
ผศ. พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **VI** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	IV
กิตติกรรมประกาศ.....	VI
สารบัญ.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญภาพ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานในการทำวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 โครงร่างของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดภาพสามมิติให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 วรรณกรรมของการซ้อนทับภาพ.....	5
บทที่ 3 เราคณิตเชิงอนุพันธ์.....	9
3.1 บทนำ.....	9
3.2 ความโค้งเกาส์เซียน.....	9
3.3 ความโค้งเฉลี่ย.....	19
บทที่ 4 การซ้อนทับภาพพื้นผิวใบหน้าสามมิติ.....	10
4.1 บทนำ.....	11
4.2 ประเภทของการซ้อนทับภาพ.....	11

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นชอบจากอธิการบดี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

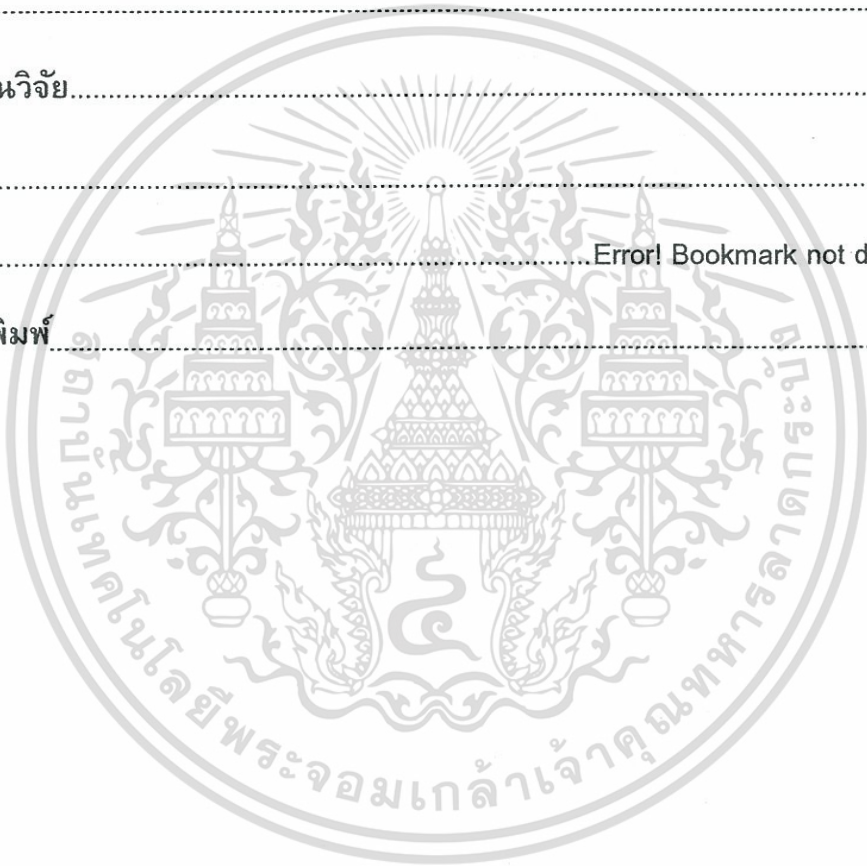
4.2.1 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน.....	11
4.2.2 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพต่างวิธีกัน.....	11
4.2.3 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุต่างชนิดกัน.....	12
4.3 วิธีการซ้อนทับภาพ.....	12
4.4 การคำนวณเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการซ้อนทับภาพสามมิติ..	12
4.5 การคำนวณค่าปริมาตรเป็นศูนย์และแรงบิดเป็นศูนย์เป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการซ้อนทับภาพสามมิติ.....	14
บทที่ 5 การจัดพื้นผิวให้ตรงกัน.....	16
5.1 บทนำ.....	16
5.2 การหาความสอดคล้องระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์.....	16
5.3 การหาเมตริกซ์การแปลงระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลา.....	17
บทที่ 6 ระบบการถ่ายภาพและการคำนวณตัวแปร.....	20
6.1 บทนำ.....	20
6.2 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคสเตอริโอ.....	20
6.3 การสร้างภาพพื้นผิวสามมิติ.....	21
6.4 เวกเตอร์สัมผัส.....	23
6.5 เวกเตอร์ปกติ.....	24
6.6 คำนวณหาความโค้งเกาส์เซียน.....	24
6.7 การคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลา.....	26
6.8 การคำนวณหาตำแหน่งจุดเด่นเอกลักษณ์.....	28
บทที่ 7 ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง.....	32
7.1 บทนำ.....	32
7.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ.....	32
7.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ ...	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข VIII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน.....	41
7.5 การทดลองซ้อนทับภาพการและจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติโดยใช้ข้อมูลภาพบริเวณจมูก.....	44
7.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอ้าปากค้าง.....	46
7.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล.....	50
บทที่ 8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	57
บทที่ 9 บทนำการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ.....	60
บทที่ 10 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือและการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ.....	61
10.1 บทนำ.....	61
10.2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	62
บทที่ 11 แนวคิดและทฤษฎีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือโดยอาศัยความไม่แปรผันทางเรขาคณิต.....	65
11.1 การสร้างสามเหลี่ยมจากกลุ่มจุด minutiae.....	65
11.2 การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือโดยอาศัยจุด minutiae.....	65
11.3 การตรวจสอบและการระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ.....	73
บทที่ 12 คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทางที่นำมาใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ.....	74
12.1 การหาคุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง.....	74
12.2 การจับคู่เวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 13	วิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัยการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ	78
13.1	การลงทะเบียนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยการจับคู่ของจุด minutiae	78
13.2	การยืนยันตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยคุณลักษณะที่ผนวกกันซึ่งได้จากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae	84
บทที่ 14	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ	91
บทที่ 15	สรุปงานวิจัย.....	92
เอกสารอ้างอิง		93
ประวัติผู้เขียน.....		Error! Bookmark not defined.0
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์.....		109



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
7.1 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่เว้า (สีน้ำตาล) ภายใต้การแปลงต่าง ๆ.....	36
7.2 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่นูน (สีน้ำเงิน) ภายใต้การแปลงต่าง ๆ.....	37
7.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของมิลลิเมตรระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพภายใต้การแปลงต่าง ๆ.....	40
7.4 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพในกรณีที่ข้อมูลภาพสามมิติไม่สมบูรณ์.....	44
7.5 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพระหว่างใบหน้าต้นฉบับทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น.....	44
7.6 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง.....	49
7.7 ความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการจับคู่ภาพถูกคู่และผิดคู่.....	55
13.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid.....	80
13.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine.....	81
13.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	82
13.4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป.....	84
13.5 การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึมอื่นที่ค่า FMR เท่ากับ 0.14% โดยประมาณ.....	89
13.6 การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึมอื่นที่ค่า FMR เท่ากับ 1.09% โดยประมาณ.....	90

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง รูปร่างพื้นผิว ความโค้งเกาส์เซียนและความโค้งเฉลี่ย [36]	10
4.1 การคำนวณหาปริมาตรจากสามเวกเตอร์	14
4.2 จุดเด่นเอกลักษณ์ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลานบนใบหน้า ก.จุดปริมาตรศูนย์ Zero-volume ($\nu 1$) points ข.จุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-torsion ($\nu 2$) points และ ค.จุดปริมาตรศูนย์และจุดแรงบิดเป็นศูนย์	15
6.1 ระบบการถ่ายภาพสเตอริโอ	20
6.2 ตัวอย่างข้อมูลภาพสามมิติ ของใบหน้าที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ	21
6.3 ตัวอย่างการสร้างจุดตารางบนพื้นที่ -2π ถึง 2π จำนวน 13×13 จุด	22
6.4 การหาพิกัด Z ณ ตำแหน่งตารางจุด (X, Y) จากข้อมูลภาพสามมิติ	22
6.5 ข้อมูลพื้นผิวภาพ 3มิติ ที่นำบริเวณปลายจมูกมาแสดงเท่านั้น	23
6.6 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y [42]	23
6.7 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y และเวกเตอร์ปกติ [42]	24
6.8 ความโค้งเกาส์เซียน	25
6.9 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูก	26
6.10 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูกที่ปรับระดับการแสดงผล	26
6.11 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาริเวณปลายจมูกซึ่งคำนวณจากบริเวณที่ค่าความโค้งเกาส์เซียนเท่ากับศูนย์	27
6.12 เส้นโค้งเชิงพาราโบลานบนใบหน้า	27
6.13 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคี่แสดงอยู่บนใบหน้าระดับสีของความโค้งเกาส์เซียน	28
6.14 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาริเวณปลายจมูก	29
6.15 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคี่แสดงเวกเตอร์เส้นสัมผัสเป็นสีฟ้า เวกเตอร์ปกติเป็นสีชมพูและเวกเตอร์ที่แสดงแรงบิดเป็นสีน้ำเงิน	29
6.16 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาริเวณปลายจมูกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง) และจุดที่ปริมาตรเป็นศูนย์ (จุดสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน)	29
6.17 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาริเวณปลายจมูกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง)	30
6.18 จุดเอกลักษณ์บนใบหน้า (*) ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาคี่	30
7.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพความโค้งเกาส์เซียน	33
7.2 รูปร่างพื้นผิวของใบหน้าต้นฉบับหน้าตรง [43]	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเป็น **XII** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.3 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบหมุน ก.ก้มหน้า 10 องศา ข.หันหน้าไปทางขวา 10 องศา ค.เงยหน้า 10 องศา ง.เอียงคอไปทางขวา 10 องศา.....	35
7.4 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบยืดขนาด ก.ยืดขนาดตามแกน X 10% ข.ยืดขนาดตามแกน Y 10% และ ค.ยืดขนาดตามแกน Z 10%.....	35
7.5 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลง ก. เงื่อนตามแกน X 10%.....	36
7.6 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์.....	38
7.7 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับ.....	39
7.8 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้าที่การแปลงแบบหมุน.....	39
7.9 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าที่การแปลงขยายขนาด.....	39
7.10 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าที่การแปลงแบบเงื่อน.....	40
7.11 ลำดับขั้นตอนการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน.....	42
7.12 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก.ภาพด้านหน้าก่อนการซ้อนทับภาพ และ ข.ภาพด้านหน้าหลังการซ้อนทับภาพ ค.ภาพด้านข้างก่อนและ ง.หลังการซ้อนทับภาพ.....	43
7.13 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก.ภาพด้านล่างก่อนการซ้อนทับภาพ และ ข.ภาพด้านล่างหลังการซ้อนทับภาพ.....	43
7.14 บริเวณใบหน้าที่นำมาใช้ในการคำนวณความผิดพลาดของระยะทาง.....	44
7.15 ภาพก่อนและหลังการซ้อนทับภาพระหว่างใบหน้าที่ทั้งหมดกับเฉพาะบริเวณจมูก.....	45
7.16 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอ้าปากค้าง.....	47
7.17 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าอารมณ์ปกติ ก.อารมณ์สีหน้าปกติ ข.อารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์ที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนใบหน้าอารมณ์ปกติ [44].....	48
7.18 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ก.ใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ข.เส้นโค้งเชิงพาราโบลาขณะอ้าปากค้าง และค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าขณะอ้าปากค้าง.....	48
7.19 ภาพใบหน้าก่อนและหลังการซ้อนทับและจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติและขณะอ้าปากค้าง [44].....	49
7.20 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกัน ของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันเพื่อการระบุตัวบุคคล.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.21 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูล GavabDB โดยแสดงผลค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ที่ด้านล่างของคู่ภาพด้วย [47].....	52
7.22 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ ICP แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย [47].....	53
7.23 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ CPD และแสดงผลค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย [47]	54
11.1 ขั้นตอนโดยรวมของการจับคู่และการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือ.....	66
11.2 การจับคู่รูปสามเหลี่ยมในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงแบบ rigid.....	68
11.3 เวกเตอร์คุณลักษณะของรูปสามเหลี่ยม โดยที่ d_1, d_2 และ d_3 เป็นความยาวของด้าน ของสามเหลี่ยม, α_1, α_2 และ α_3 เป็นมุมของสามเหลี่ยม, A เป็นพื้นที่ของสามเหลี่ยม.....	68
11.4 การจับคู่รูปสามเหลี่ยมของภาพลายพิมพ์นิ้วมือในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine.....	70
11.5 การจับคู่สามเหลี่ยมในกรณีที่มีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	72
12.1 คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง (DFB).....	75
12.2 DFB ชั้นตติยภูมิ โดยแต่ละแถวแนวนอนคือ คุณลักษณะจาก DFB ชั้นทุติยภูมิ และภายในรูปสี่เหลี่ยมประดับบนคือ DFB ชั้นตติยภูมิที่สอดคล้องกับ minutiae ที่สนใจ ชนิดจุดแยก ด้านล่างคือ DFB ชั้นตติยภูมิที่สอดคล้องกับ minutiae ที่สนใจชนิดจุดสิ้นสุด.....	77
13.1 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid.....	79
13.2 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid.....	80
13.3 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine.....	80
13.4 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine.....	81
13.5 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	82
13.6 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง **XIV** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คุณสมบัติความไม่แปรผันต่อการแปลงเรขาคณิตของข้อมูล 2 มิติและ 3 มิติได้ถูกนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพและจัดเรียงภาพให้ตรงกัน จากนั้นคำนวณความแตกต่างหรือความเหมือนกันระหว่างข้อมูลทั้งสองที่นำมาซ้อนกัน เพื่อใช้ในการระบุตัวบุคคล (Identification) การนำภาพสองหรือสามมิติของวัตถุชิ้นหนึ่งมาซ้อนทับกับภาพของวัตถุอีกชิ้นหนึ่ง และต้องซ้อนทับได้สนิทพอดี โดยที่ภาพวัตถุทั้งสองต้องอยู่ในระบบพิกัดเดียวกัน ซึ่งทำได้ด้วยการจับคู่ข้อมูลที่สอดคล้องกันของภาพทั้งสอง โดยที่ข้อมูลนั้นอาจเป็น จุด ส่วนโค้ง รูปร่าง หรือ ความเข้มของภาพ การซ้อนทับภาพและการจัดเรียงภาพให้ตรงกัน เป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่งในการนำภาพมาประยุกต์ใช้งาน เช่น การผสมภาพ (Image fusion) ระหว่างภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์กับภาพที่ได้จากเครื่องโพสิตรอนมิสชันโทโมกราฟี (PET-CT fusion image) การวางแผนการรักษาด้วยการฉายรังสี (Radiotherapy treatment planning) การทำให้คอมพิวเตอร์เข้าใจทัศนียภาพ (Computer vision) การรู้จำใบหน้ารูปทรง (Recognition) เพื่อการระบุตัวตน (Identification) เป็นต้น

ในการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงภาพให้ตรงกันนั้น เป็นเรื่องที่ยากยิ่ง เนื่องจากภาพของข้อมูลที่จะนำมาซ้อนกันไม่ว่าจะเป็นภาพ 3 มิติหรือ 2 มิติจะไม่คงที่ แปรเปลี่ยนไปตามกาลเวลา กรณีของข้อมูล 3 มิติ เช่น ใบหน้า จะพบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการแสดงสีหน้า การเปลี่ยนแปลงของโครงร่างใบหน้าที่อายุมากขึ้น ส่วนในกรณีของข้อมูล 2 มิติ เช่น ภาพลายนิ้วมือ จะพบปัญหาเกี่ยวกับการบิดเบือน (Distort) ของข้อมูลจากการแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการใช้คุณสมบัติที่ไม่ผันตามการแปลงเรขาคณิต (Affine Invariance) เพื่อนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงภาพสำหรับข้อมูลใบหน้าซึ่งเป็นข้อมูล 3 มิติ และข้อมูลลายนิ้วมือซึ่งเป็นข้อมูล 2 มิติ ซึ่งนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานในด้านการระบุตัวบุคคล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่ไม่แปรผันตามการแปลงเรขาคณิตทั้งข้อมูล 2 มิติ และ 3 มิติ
2. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานคุณสมบัติที่ไม่แปรผันตามการแปลงเรขาคณิต เพื่อใช้ในการซ้อนทับภาพสามมิติ และการจัดเรียงให้ตรงกันของภาพใบหน้าสามมิติ
3. สร้างอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลงทางเรขาคณิตแบบต่างๆ
4. การจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือให้ตรงกัน
5. ประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ โดยนำไปใช้ในการยืนยันภาพลายพิมพ์

นิ้วมือ

1.3 สมมติฐานในการทำวิจัย

1. คุณสมบัติที่ไม่แปรผันตามการแปลงเรขาคณิตน่าจะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะบุคคลที่สามารถนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพ จัดเรียงภาพให้ตรงกัน หรือระบุตัวบุคคลได้
2. เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ น่าจะนำมาใช้ในการค้นหาเอกลักษณ์ของบุคคลได้
3. การใช้ข้อมูลสามมิติของลักษณะพื้นผิวเฉพาะที่บนใบหน้า น่าจะนำมาใช้ในการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับกันของใบหน้าสามมิติได้
4. การลดขนาดของข้อมูลลงจะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยลง
5. เพื่อจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือและจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงเรขาคณิต สัญญาณรบกวน หรือภาพลายนิ้วบางส่วนขาดหายไป โดยอาศัยคุณลักษณะที่มีความไม่แปรผันทางเรขาคณิตสมบูรณ์
6. เพื่อกำหนดค่าฟังก์ชันความผิดพลาดที่ใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการยืนยันหรือระบุบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ
7. เพื่อนำวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่นำเสนอ มาประยุกต์ใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย

ทฤษฎีหลักที่ใช้ในการทำวิจัยคือ ความไม่แปรผันของคุณสมบัติทางเรขาคณิตของข้อมูล 3 มิติ (Surface) และทฤษฎีทางเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential Geometry) ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิว ณ จุดนั้นๆ เปรียบเทียบกับพื้นผิวรอบข้างใกล้เคียง ทำให้ทราบรูปร่างว่าเป็นส่วนเว้า ส่วนนูนของพื้นผิว จากข้อมูลนี้ทำให้สามารถคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลาได้ (Parabolic contour curve) และนำไปสู่การคำนวณหาการบิดงอ (Torsion) ของเส้นจนได้จุดที่เกิดการเปลี่ยนมุม ทิศทาง หรือระนาบ (Inflection point) ในการเคลื่อนที่บนเส้นโค้งนี้ ซึ่งเป็นจุดที่เราเรียกว่าจุดแรงบิดเป็นศูนย์ (Zero torsion) ซึ่งยืนยันหรือคงสภาพอยู่ได้ สำหรับความไม่แปรผันของคุณสมบัติทางเรขาคณิตของข้อมูล 2 มิติ เช่น พื้นที่ อัตราส่วนของพื้นที่ คอนเวกซ์ฮอลล์ เป็นทฤษฎีหลักที่นำมาใช้ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ และจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือให้ตรงกัน

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพใบหน้าสามมิติ
2. คุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลงทางเรขาคณิตสามมิติแบบต่างๆ
3. จับคู่ใบหน้าสามมิติที่เป็นของบุคคลคนเดียวกัน
4. ซ้อนภาพใบหน้าสามมิติและจัดเรียงให้ตรงกัน
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการซ้อนภาพใบหน้าสามมิติและจัดเรียงให้ตรงกันกับวิธีการ Iterative Closet Point (ICP) และ Coherent Point Drift (CPD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หาคคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลงทางเรขาคณิตสองมิติแบบต่างๆ
7. สร้างอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ
8. การจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือให้ตรงกัน
9. ใช้ความผิดพลาดร่วมที่นำเสนอเป็นหลักเกณฑ์ในการยืนยัน หรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ
10. ประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมโดยนำไปใช้ในการยืนยัน หรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

1.6 โครงร่างของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 12 บท โดยมีรายละเอียดดังนี้

- บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ตลอดจนสมมติฐานที่ใช้และขอบเขตของการวิจัย
- บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้านการซ้อนทับภาพสามมิติ
- บทที่ 3 อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในการวิจัย เช่น พื้นฐานเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential geometry) เส้นโค้ง (Curve) พื้นผิว (Surface) รูปแบบมูลฐานอันดับแรก (First fundamental form) รูปแบบมูลฐานที่สอง (Second Fundamental Forms) ความโค้งเกาส์เซียน (Gaussian curvature) ความโค้งเฉลี่ย (Mean Curvature) เป็นต้น
- บทที่ 4 อธิบายทฤษฎีใหม่ที่นำมาใช้ในการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติ เป็นการหาจุดเด่นเอกลักษณ์ของพื้นผิว จากเส้นโค้งเชิงพาราโบลา เวกเตอร์สัมผัส เวกเตอร์ปกติ การหาปริมาตรสามเวกเตอร์ จุดที่ปริมาตรสามเวกเตอร์เป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา (Zero-Volume) จุดแรงบิดเป็นศูนย์ (Zero-Torsion) บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา
- บทที่ 5 เป็นการอธิบายถึงขั้นตอนการจัดเรียงพื้นผิวใบหน้าสามมิติให้ตรงกัน
- บทที่ 6 การสร้างอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพใบหน้าแบบสามมิติ การสร้างพื้นผิว ขั้นตอนการคำนวณตัวแปรและภาพตัวอย่างของผลการคำนวณ
- บทที่ 7 ขั้นตอนกระบวนการทดลองและผลการทดลองการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติ
- บทที่ 8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
- บทที่ 9 บทนำการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ
- บทที่ 10 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือและการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ
- บทที่ 11 แนวคิดและทฤษฎีของการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือโดยอาศัยความไม่แปรผันทางเรขาคณิต
- บทที่ 12 คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทางที่นำมาใช้ในการยืนยันหรือระบุตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บุคคลด้วยภาพถ่ายพิมพ์นิ้วมือ

บทที่ 13 วิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัยการยืนยันหรือระบุดับุคคลด้วยภาพถ่ายพิมพ์นิ้วมือ

บทที่ 14 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะการยืนยันหรือระบุดับุคคลด้วยภาพถ่ายพิมพ์นิ้วมือ

บทที่ 15 สรุปผลงานวิจัยในภาพรวม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดภาพสามมิติให้ตรงกัน และการซ้อนทับภาพ

2.1 บทนำ

วิธีการจัดภาพสามมิติให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพ (Image Registration and Alignment) หมายถึงกระบวนการค้นหาพื้นที่หรือบริเวณของภาพสองภาพที่เหมือนกัน อาจจะเป็นรูปร่าง พื้นผิว ความเข้ม หรือจุดเด่นเอกลักษณ์อื่นใดที่สนใจ อย่างน้อยสองภาพแล้วนำมาซ้อนทับให้ตรงกันพอดี โดยการจับคู่ข้อมูลที่สอดคล้องกันของภาพทั้งสอง โดยที่ข้อมูลนั้นอาจเป็น จุด รูปร่าง ส่วนโค้ง ส่วนเว้า รอยหยัก สัน ปลาย หรือ ความเข้มของภาพ เป็นต้น

การซ้อนทับภาพจำแนกได้สองวิธีหลักคือแบบใช้ความเข้มเป็นหลัก (Intensity-based) และแบบใช้คุณลักษณะเฉพาะเป็นหลัก (Feature-based) การใช้ความเข้มเป็นหลักเป็นการอาศัยความเข้มของแต่ละจุดภาพ (Pixel) ของภาพทั้งสองที่สัมพันธ์กัน ส่วนในภาพสามมิติที่ได้จากเครื่องสร้างภาพทางการแพทย์ เช่น เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์และเครื่องสร้างภาพจากการกำธรสนามแม่เหล็กนั้น ก็สามารถใช้ความเข้มจากวอกซ์เซล (Voxel) ในการศึกษาเป็นการทดลองเพื่อซ้อนทับภาพระยะทางสามมิติ (Range Image) และจัดภาพให้ตรงกัน โดยที่ภาพเหล่านี้ได้จากการถ่ายภาพด้วยเทคนิคการถ่ายภาพสเตอริโอและการสแกนด้วยเลเซอร์

การซ้อนทับภาพและการจัดภาพให้ตรงกันนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่งในการนำภาพมาประยุกต์ใช้งาน เริ่มตั้งแต่การถ่ายภาพ (Image acquired) การผสมภาพ (Image fusion) การทำให้คอมพิวเตอร์เข้าใจทัศนียภาพ (Computer vision) การรู้จักใบหน้ารูปทรง (Recognition) เพื่อการระบุตัวตน (Identification) เป็นต้น ในการทบทวนวรรณกรรมนี้จะนำเสนอวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการซ้อนทับภาพในหัวข้อ 2.2 และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการซ้อนทับภาพและการจัดให้ตรงกันของภาพพื้นผิวสามมิติหรือภาพระยะสามมิติในหัวข้อ 2.3 ซึ่งเป็นวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและจัดเป็นแบบใช้คุณลักษณะเฉพาะเป็นหลัก (Feature-based)

2.2 วรรณกรรมของการซ้อนทับภาพ

วิธีการซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกันสามารถแบ่งออกเป็นสองวิธีคือ แบบใช้ความเข้มเป็นหลัก (Intensity-Based) และแบบใช้คุณลักษณะเฉพาะเป็นหลัก (Feature-Based) แบบใช้ความเข้มเป็นหลักอาศัยความเข้มจากพิกเซล (pixel) เมื่อเป็นภาพสองมิติหรืออาศัยข้อมูลความเข้มจากวอกซ์เซล (voxel) ในกรณีที่ภาพนั้นมาจากข้อมูลปริมาตรสามมิติ การทำงานโดยการใช้ความเข้มเป็นหลักนี้จำเป็นต้องคำนวณซ้ำหลาย ๆ ครั้งจนได้ผลดีที่สุดและเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานที่ผลการจัดภาพให้ตรงกันจะผิดพลาด อันเนื่องมาจากจุดสนใจมีหลายจุด (local minima and local maxima) จึงจำเป็นต้องกำหนดจุดเริ่มต้นในการคำนวณคร่าว ๆ เสียก่อน (initial alignment) ก่อนที่จะทำการซ้อนทับภาพ ดังเช่นในงานของ Wood และคณะ [1, 2] โดยการใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดภาพ

MRI ที่สอดคล้องกันของสองภาพมาใช้ในการจัดภาพให้ตรงกัน Viola and Wells [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การจัดภาพ MRI ให้ตรงกันโดยใช้ความเข้มสูงสุดที่เหมือนกัน วิธีนี้มีประสิทธิภาพมากในการซ้อนทับภาพระหว่างภาพสามมิติกับภาพสามมิติที่มาจากเครื่องสร้างภาพต่างชนิดกัน เช่น ระหว่างเครื่อง MRI กับ PET หรือ ระหว่างเครื่อง MRI กับ CT ดังปรากฏใน [4-6] แต่ประสิทธิภาพไม่ดีนักในกรณีที่ต้องการจัดภาพให้ตรงกันระหว่างภาพสองมิติกับสามมิติ ส่วนงานอื่นที่พบว่าใช้หลักการของความเข้มเช่นการใช้ normalized cross correlation [7] entropy of difference image [8] gradient correlation [9] และ pattern intensity [10]

แบบใช้คุณลักษณะเฉพาะเป็นหลัก (feature-based) เป็นการหาคุณลักษณะเฉพาะของภาพที่สอดคล้องกันหรือเหมือนกันจากภาพแล้วคำนวณหาตัวแปรการแปลง (transformation parameters) ที่สอดคล้องกันของคุณลักษณะเหล่านั้น วิธีการใช้คุณลักษณะเฉพาะเป็นหลักนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นแบบการตรวจจับความสมมาตรของพื้นผิว (surface symmetry detection) ตัวแทนโพลิโนเมียลอันดับสูง (high order polynomial representation) ลักษณะที่คงตัว (invariance-based approaches) แผนที่ระยะทาง (distance map technique) หลักการของพลังงาน (energy-based method) แผนที่ของจุดสนใจ (landmark-mapping techniques) และแผนที่ของขอบหรือสายเส้น (boundary/line mapping methods)

สำหรับแบบการตรวจจับความสมมาตรของพื้นผิว นั้นใช้ได้กับสิ่งของที่มีลักษณะสมมาตรเท่านั้น โดยประสิทธิภาพจะลดลงตามความไม่สมมาตรของวัตถุนั้น [11] ส่วนวิธีการที่เป็นที่นิยมมากอันหนึ่งคือ อาศัยลักษณะทางกายภาพที่คงตัว (geometric invariance-based) [12] แต่ต้องทำงานซับซ้อนแม้ว่าจะเป็นพื้นผิวทั่วไป [13] เทคนิคแผนที่ระยะทาง ใช้วิธีการคำนวณระยะทางระหว่างจุดจำเป็นต้องคำนวณซ้ำหลาย ๆ รอบเพื่อหาจุดที่ใกล้กันมากที่สุด วิธีการนี้เหมาะมากสำหรับงานที่มีข้อมูลภาพไม่สมบูรณ์แต่ทำงานได้ค่อนข้างช้าเมื่อจำเป็นต้องมีการแปลงมากกว่าแบบตายตัว เช่น similarity, affine และ weak perspective โดยที่นักวิจัยของ Pelizzari [14] ได้พัฒนาวิธีการคำนวณแบบอัตโนมัติสำหรับการจัดภาพสามมิติที่ได้จากเครื่องสร้างภาพคนละเครื่อง โดยคำนวณค่าการแปลงจากค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดที่คำนวณได้จากค่ากำลังสองเฉลี่ยระหว่างภาพ MRI และ CT และจำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งซ้อนทับภาพแบบคร่าว ๆ ไว้ก่อนด้วยเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากรูปร่างที่คล้ายกัน ส่วนที่มของ Grimson [15] ได้พัฒนาการทำงานแบบอัตโนมัติที่ไม่ต้องกำหนดจุดเริ่มต้นของการคำนวณให้ โดยเขาได้ใช้วิธีการสุ่มจุดเริ่มต้นขึ้นมาแทน

Jian และ Vemuri [16] ได้ใช้ Gaussian mixture model (GMM) ซึ่งมองว่าจุดในพิกัดสามมิติของแต่ละภาพนั้น จะถูกแทนที่ด้วยส่วนที่ผสมกันแบบเกาส์เซียนและคำนวณหาการแปลงที่เหมาะสมจากส่วนผสมของตัวแทนเกาส์เซียนของภาพทั้งสอง วิธีการนี้ Myronenko and Song [17] ได้นำมาใช้ โดยการหา Maximum likelihood จาก centroids ของ GMM แล้วบังคับให้ centroid เคลื่อนที่พร้อม ๆ กัน (coherent) เป็นกลุ่ม และเรียกวิธีนี้ว่า Coherent Point Drift (CPD) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่ผู้วิจัยนำมาเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซ้อนทับภาพแบบอาศัยหลักการทางพลังงาน (Energy-based registration) เป็นการ
ใช้หลักทางกล โดยใช้ค่าความเค้น ความเครียด และระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น Terzopoulos
และคณะได้นำเสนอวิธีที่เรียกว่า Active contour หรือ snakes ไว้ใน [18]

Land mark-mapping alignment เป็นการใช้พิกัดที่เด่น มาทำเป็นแผนผังเพื่อหา
ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเด่นบนภาพทั้งสอง แล้วคำนวณหาค่าการแปลงระหว่างพิกัดเด่นนั้น เรา
มักใช้ลักษณะทางกายภาพมาหาพิกัดเด่นเช่น ร่องข้างจมูก สันจมูก โหนกแก้ม หางตา เป็นต้น
ดังเช่น [19-22] หรืออาจใช้จุดตัดของเส้น [23] บริเวณที่ค่าความโค้งสูงสุด (local curvature
maxima) [24-26] จุดกึ่งกลางของพื้นผิวรูปปิด (centroid of closed-boundary region) [27] จุดที่
เป็นปม [28] (knot point) และจุดหักเห (inflection point) [29] ผู้วิจัยบางคณะก็ใช้วิธีผสมกันของ
จุดเด่นหลายอย่าง ดังเช่น [30] และ [31]

มีการใช้แนวเส้นสัน (ridge line) ที่ได้จากข้อมูลภาพสามมิติเพื่อสร้าง เส้นสันสูงสุด (crest
line) [32, 33] โดยหาแนวเส้นสันจากค่าความโค้งสูงสุด Govindo และ Shecker [34] ได้ใช้ ค่าความ
โค้งของลักษณะทางกายภาพเพื่อหาความเหมือนกันระหว่างภาพสองภาพ

Jian และ Vemuri [16] ได้ใช้ Gaussian mixture model(GMM) ซึ่งมองว่าจุดในพิกัดสาม
มิติของแต่ละภาพนั้น จะถูกแทนที่ด้วยส่วนที่ผสมกันแบบเกาส์เซียนและคำนวณหาการแปลงที่
เหมาะสมจากส่วนผสมของตัวแทนเกาส์เซียนของภาพทั้งสอง วิธีการนี้ Myronenko and Song [17]
ได้นำมาใช้ โดยการหา Maximum likelihood จาก centroids ของ GMM แล้วบังคับให้ centroid
เคลื่อนที่พร้อมๆกัน (Coherent) เป็นกลุ่ม และเรียกวิธีนี้ว่า Coherent Point Drift (CPD) ซึ่งเป็นหนึ่ง
ในวิธีที่ผู้วิจัยนำมาเปรียบเทียบการทำงาน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการที่ผสมผสานการทำงานระหว่าง การใช้จุดเด่นของ
ลักษณะทางกายภาพ (landmark) และเป็นลักษณะทางกายภาพที่คงตัว (geometric invariance)
โดยการคำนวณหาจุดที่เป็นลักษณะทางกายภาพที่คงตัวนี้ด้วยอนุพันธ์อันดับสูงของเส้นโค้งและ
พื้นผิวซึ่งมีความไวสูงในการบอกความแตกต่าง เราได้เสนอวิธีการใหม่ขึ้นมาสองประการด้วยกัน
ประการแรกคือวิธีการหาจุดเด่นใหม่บนพื้นผิว โดยการหาจากผลลัพท์ของสามเวกเตอร์

$$v_1 = \langle r^{(0)}(t) \times r^{(1)}(t), r^{(2)}(t) \rangle$$

และ

$$v_2 = \langle r^{(1)}(t) \times r^{(2)}(t), r^{(3)}(t) \rangle$$

ซึ่งอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาที่ซึ่งปริมาตรที่คำนวณได้จากเวกเตอร์เหล่านี้เป็นศูนย์ (Zero-
volume, $v_1 = 0$) และยังคงสภาพอยู่ได้ภายใต้การแปลงแบบแอฟเฟjne (การหมุน การเปลี่ยน
ขนาด การเลื่อนตำแหน่ง และ การเฉือน) และที่ตำแหน่ง (Zero-torsion, $v_2 = 0$) ซึ่งสัมพันธ์กับ
แรงบิดที่วิ่งอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ณ ตำแหน่งที่การบิดเปลี่ยนกลับจากลบเป็นบวก หรือ
เปลี่ยนจากด้านบวกเป็นลบจะหมายถึงตำแหน่งที่มีการหักงอของพื้นผิวซึ่งจะคงสภาพเดิมอยู่ได้
ภายใต้การแปลงรูปร่าง ประการที่สองคือ การเสนอแนวคิดใหม่ในการหาจุดที่สอดคล้องกันของภาพ

ทั้งสองโดยการใช้ค่าอัตราส่วนของปริมาตรที่ได้จากผลลัพท์สามเวกเตอร์ของจุดแรงบิดเป็นศูนย์ที่วิ่งอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์

(Differential Geometry)

3.1 บทนำ

เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์หมายถึงการศึกษาคุณสมบัติของเส้นโค้งและพื้นผิวด้วยการใช้แคลคูลัสเชิงอนุพันธ์ (Differential calculus) หรือกล่าวว่าเป็นการอธิบายรูปร่างหรือรูปทรงเรขาคณิตด้วยอนุพันธ์ เป็นศึกษาในเรื่องเส้นโค้ง (Curve) และพื้นผิว (Surface) หรือสิ่งที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ (Differentiable) ทำให้เรื่องเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์เป็นการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างที่ไม่เป็นเหลี่ยมหรือมีมุมต่างๆ สิ่งแรกที่เราสามารถหาอนุพันธ์ได้จากเส้นโค้งหรือพื้นผิวก็คือเส้นสัมผัส (Tangent) ในกรณีที่เป็นเส้นโค้งจะเป็นเวกเตอร์ที่สัมผัสกับเส้นโค้งนั้นแต่ถ้าเป็นพื้นผิวจะหมายถึงระนาบที่สัมผัส (Tangent plane) กับผิวนั้น ในการใช้อนุพันธ์นี้จะไม่ใช่อ้างอิงถึงพิกัดใดพิกัดหนึ่งเป็นหลัก (no global) แต่เป็นการวัดหรือเปรียบเทียบกับเส้นสัมผัส ระนาบที่สัมผัส (Local tangent) หรือเส้นหรือระนาบที่ตั้งฉาก (Normal) กับเส้นหรือพื้นผิวนั้น ซึ่งทำให้ได้เส้นระดับ (Contour) สัน (Ridge) และร่อง (Valleys) ของพื้นผิว กล่าวสั้นๆว่าเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ เป็นการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะที่ (local) ของเส้นโค้งและพื้นผิวโดยเทียบกับจุดหรือผิวใกล้เคียงโดยใช้อนุพันธ์ดังนั้นเส้นโค้งหรือพื้นผิวนั้นต้องหาอนุพันธ์ได้

3.2 ความโค้งเกาส์เซียน (Gaussian Curvature)

เมื่อ k_G คือความโค้งเกาส์เซียน k_{min} คือค่าความโค้งต่ำสุด และ k_{max} คือค่าความโค้งสูงสุด

$$k_G = k_{min}k_{max} \quad (3.1)$$

$$k_G = \frac{\det II}{\det I} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (3.2)$$

ตัวอย่างของความโค้งเกาส์เซียนที่นำมาใช้บอกรูปร่างพื้นผิวเช่น กรณีที่ 1 ถ้าความโค้งเกาส์เซียนเท่ากับศูนย์ นั้นหมายความว่าต้องมีอย่างน้อยหนึ่งตัวของค่าความโค้งมูลฐานที่เป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึงรูปร่างของพื้นผิวตรงนั้นเป็นรูปครึ่งทรงกระบอก อาจเป็นรูปครึ่งทรงกระบอกที่หงายหรือคว่ำก็ได้ กรณีที่ 2 ถ้าค่าความโค้งมูลฐานทั้งสองเป็นศูนย์ รูปร่างของพื้นผิวบริเวณนั้นจะแบนราบ กรณีที่ 3 ถ้า $k_G < 0$ หมายความว่าเครื่องหมายของค่าความโค้งมูลฐานทั้งสองแตกต่างกันทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปทรงของผิวพื้นจะคล้ายกับอานม้า กรณีที่ 4 ถ้า $k_G > 0$ หมายความว่าเครื่องหมายของค่าความโค้งมูลฐานทั้งสองเหมือนกันทำให้รูปทรงของผิวพื้นจะคล้ายกับโดมหรืออ่างน้ำก็ได้ เนื่องจากความโค้งเกาส์เซียนเกิดจากการคูณกันของ 1/รัศมีความโค้ง ดังนั้นหน่วยของความโค้งเกาส์เซียนจึงมีหน่วยเป็น 1/พื้นที่ เช่น $1/\text{mm}^2$ หรือ mm^{-2}


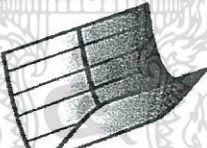


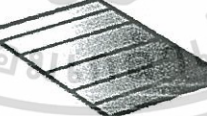




3.3 ความโค้งเฉลี่ย (Mean curvature)

ค่าความโค้งเฉลี่ย k_M คำนวณได้จากความโค้งเกาส์เซียน คือ

$$k_M = \frac{k_{min} + k_{max}}{2} = \frac{k_G}{2} \quad (3.3)$$

เมื่อนำค่าความโค้งเฉลี่ยและความโค้งเกาส์เซียนมาใช้อธิบายรูปร่างได้ดังภาพที่ 3.1

จากรูปร่างที่เป็นครึ่งทรงกระบอก ความโค้งเกาส์เซียน $k_G = (0) \left(\frac{1}{R}\right) = 0$
ความโค้งเฉลี่ย $k_M = (1/2)(0 + 1)$ ซึ่งน้อยกว่าศูนย์

	$k_G < 0$	$k_G = 0$	$k_G > 0$
$k_M < 0$			
$k_M = 0$			
$k_M > 0$			

ภาพที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง รูปร่างพื้นผิว ความโค้งเกาส์เซียนและความโค้งเฉลี่ย [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การซ้อนทับภาพพื้นผิวใบหน้าสามมิติ (3D Image Registration)

4.1 บทนำ

การซ้อนทับภาพ (Image Registration) เป็นกระบวนการหาจุดเด่นเอกลักษณ์ของภาพ ตั้งแต่สองภาพขึ้นไปแล้วนำมาจัดวางซ้อนทับกันตามความสอดคล้องของภาพนั้น ไม่ว่าจะเป็นภาพสองมิติหรือสามมิติก็ตาม ทั้งนี้เพื่อนำผลภาพที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น ทางการแพทย์ มีการนำภาพที่ได้จากการถ่ายภาพรังสีมาซ้อนทับกับภาพถ่ายรังสีขณะที่ฉีดสารทึบรังสี เพื่อการลบภาพบางส่วนออกและทำให้ภาพมีความคมชัดและความเปรียบต่าง (contrast) มากขึ้น หรือการนำภาพที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพต่างชนิดกันของคนไข้คนเดิมมารวมกัน (Image Fusion) เช่นการนำภาพที่ได้จากเครื่องโพสิตรอนอิมิซันโทโมกราฟี (PET) มารวมกับภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT) เป็นต้น ในการศึกษานี้ได้คำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลาบนพื้นผิวใบหน้า โดยคำนวณจากพื้นผิวใบหน้าทีค่าความโค้งเกาส์เซียนเป็นศูนย์ซึ่งหมายถึงบริเวณที่ไม่มีการโค้งงอของพื้นผิวหรือบริเวณที่พื้นผิวเปลี่ยนความโค้งงอจากบวกเป็นลบหรือเปลี่ยนจากลบเป็นบวกก็ได้ จากนั้นจึงคำนวณหาจุดเด่นเอกลักษณ์ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา โดยดูจากการบิดงอของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ณ จุดที่การบิดงอมีค่าแรงบิดเป็นศูนย์ ต่อมานำจุดเด่นเอกลักษณ์นี้ไปเปรียบเทียบกับจุดเด่นเอกลักษณ์ของข้อมูลใบหน้าอื่น ถ้าตรงกันก็จะสามารถซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกันได้

4.2 ประเภทของการซ้อนทับภาพ

การซ้อนทับภาพแบ่งเป็น 3 ประเภท [37]

4.2.1 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน (Intra-object Intra-modality Registration)

การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน เป็นการถ่ายบุคคลเดิมด้วยเครื่องถ่ายภาพชนิดภาพเดิม แต่ต่างเวลากัน เช่นการถ่ายภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ก่อนพบว่า มีเนื้องอกและหลังพบว่า มีเนื้องอก เมื่อนำภาพมาซ้อนทับกัน จะทำให้สามารถหาขอบเขต ขนาด และการเติบโตของเนื้องอกได้ การถ่ายภาพสามมิติของใบหน้าที่ต้องการความสมบูรณ์ของภาพทุกมุมมองรอบศีรษะก็จัดอยู่ในประเภทนี้ เนื่องจากจำเป็นต้องถ่ายภาพจากทิศทางที่ต่างกันจากหลายมุมมอง เนื่องจากไม่สามารถสร้างภาพให้เห็นวัตถุโดยรอบ 360 องศา จากการสแกนเพียงครั้งเดียวได้ จากนั้นจึงนำภาพมาเรียงต่อกันโดยต้องมีการซ้อนทับกันของภาพบางส่วน แล้วนำภาพมาซ้อนทับและจัดเรียงให้ตรงกันต่อไป

4.2.2 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพต่างวิธีกัน (Intra-object Inter-modality Registration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพต่างวิธีกัน การซ้อนทับภาพระหว่างวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพต่างวิธีกัน พบมากในการประยุกต์ใช้งานภาพในทางการแพทย์ ที่ต้องการนำเอาลักษณะเด่นของวิธีการถ่ายภาพมารวมกัน เช่นการถ่ายภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ จะให้ภาพที่ให้รายละเอียดทางกายภาพของอวัยวะภายในร่างกายได้ดี แต่ไม่สามารถบ่งบอกถึงการทำงานของอวัยวะนั้นๆ ได้ว่ายังปกติดีอยู่หรือไม่ คงบอกได้เพียงแต่การเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการดูดกลืนรังสีที่เปลี่ยนไปแล้วเท่านั้น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อการดำเนินของโรคเกิดขึ้นมากแล้ว ในขณะที่การถ่ายภาพในงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์ มักเป็นการถ่ายภาพด้วยการใช้สารเภสัชรังสี ฉีดเข้าสู่ร่างกาย แล้วถ่ายภาพด้วยเครื่อง Positron Emission Tomography (PET) หรือเครื่อง Single Photon Emission Tomography (SPECT) หรือเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา ซึ่งเครื่องเหล่านี้จะให้ภาพที่มีรายละเอียดทางกายภาพต่ำแต่บ่งบอกถึงการทำงานของอวัยวะได้ดี เมื่อนำภาพจากเครื่องมือทั้งสองประเภทมาซ้อนทับกัน เป็นการช่วยทำให้สามารถวินิจฉัยโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

4.2.3 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุต่างชนิดกัน (Inter-object Registration)

การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุต่างชนิดกัน พบในการประยุกต์ใช้งานเพื่อการรู้จำ (Recognition) และการจัดแยก (Classification) การนำมาใช้กับการรู้จำบุคคล ก็จัดอยู่ในประเภทนี้ คือต้องมีฐานข้อมูลภาพ เมื่อต้องการตรวจสอบดูว่าบุคคลที่สนใจ มีอยู่ในฐานข้อมูลหรือไม่ ก็จะนำภาพในฐานข้อมูลมาเปรียบเทียบกับภาพบุคคลนั้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการซ้อนทับภาพแล้วพิจารณาความแตกต่าง

4.3 วิธีการซ้อนทับภาพ (Registration Technique)

จากบทที่ 2-ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ได้จำแนกวิธีการซ้อนทับภาพออกเป็นแบบอาศัยความเข้มเป็นหลัก (Intensity Based Method) และแบบใช้ลักษณะเฉพาะเป็นหลัก (Feature Based Method) หรืออาจแบ่งตามวรรณกรรมของการซ้อนทับภาพสามมิติได้เป็นการซ้อนทับภาพแบบหยาบและแบบละเอียดแล้วนั้น จึงไม่ขอกล่าวซ้ำในที่นี้ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการที่นำมาใช้ในการวิจัยเท่านั้น

ในการวิจัยนี้ เป็นการทดลองซ้อนทับภาพ ประเภทการซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน โดยเป็นการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติของบุคคลเดียวกันและใช้เครื่องสแกนแบบเลเซอร์ในการถ่ายภาพ เป็นการซ้อนทับภาพแบบใช้ลักษณะเด่นเอกลักษณ์เป็นหลัก ซึ่งหาได้จาก ความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลา ค่าปริมาตรเป็นศูนย์และแรงบิดเป็นศูนย์

4.4 การคำนวณเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการซ้อนทับภาพสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นโค้งเชิงพาราโบลา เป็นชุดของจุดบนพื้นผิวใดๆที่คำนวณจากค่าความโค้งเกาส์เซียนของพื้นผิวเป็นศูนย์ ($K = k_1 k_2$) นั้นหมายความว่า k_1 หรือ k_2 ตัวใดตัวหนึ่งเป็นศูนย์ก็เพียงพอที่จะทำให้ความโค้งเกาส์เซียนเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นแนวจุดที่แสดงถึงความราบเรียบของพื้นผิวหรือการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวจากโค้งขึ้นเป็นโค้งลงหรือจากโค้งลงเป็นโค้งขึ้นก็ได้ แนวของจุดที่ค่าความโค้งเป็นศูนย์นี้เป็นคุณสมบัติภายในเฉพาะของพื้นผิวนั้นๆ ค่าความโค้งเกาส์เซียน (K) คำนวณได้จาก สมการที่ 5.1 เมื่อ k_1 และ k_2 คือความโค้งสูงสุดและความโค้งต่ำสุด

$$K = k_1 k_2 \propto \begin{vmatrix} e & f \\ f & g \end{vmatrix} \quad (4.1)$$

$$\text{และ } e = \langle N, r^{(2,0)} \rangle, \quad f = \langle N, r^{(1,1)} \rangle, \quad g = \langle N, r^{(0,2)} \rangle$$

$$\text{โดยที่เวกเตอร์ปกติ } N = \frac{\langle r^{(1,0)} \times r^{(0,1)} \rangle}{|r^{(1,0)} \times r^{(0,1)}|}$$

$$r^{(1,0)} = \frac{\partial r}{\partial u}, \quad r^{(0,1)} = \frac{\partial r}{\partial v}, \quad r^{(2,0)} = \frac{\partial^2 r}{\partial u^2}, \quad r^{(0,2)} = \frac{\partial^2 r}{\partial v^2}, \\ r^{(1,1)} = \frac{\partial^2 r}{\partial u \partial v}$$

$$\text{จากนั้นคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลาได้จาก } eg - f^2 = 0 \quad (4.2)$$

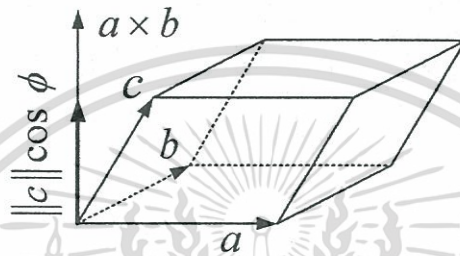
$$\text{หรือ ประมวลได้จาก } \langle N, r^{(2,0)} \rangle \langle N, r^{(0,2)} \rangle - \langle N, r^{(1,1)} \rangle^2 = 0 \quad (4.3)$$

ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของความโค้งจะคงตัวอยู่ได้ภายใต้การแปลงแบบเหมือนเท่านั้น แต่เส้นโค้งเชิงพาราโบลาจะคงตัวอยู่ได้ถึงระดับการแปลงแบบแอฟไฟน์ กล่าวได้ว่า พื้นผิวภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์ จะมีเส้นโค้งเชิงพาราโบลาภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์สอดคล้องกับเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของพื้นผิวดั้งเดิม ส่วนความโค้งเกาส์เซียนก่อนและหลังการแปลงนั้น จะสอดคล้องกันเป็นสัดส่วนกับพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของการแปลงเท่านั้นแต่ไม่สอดคล้องกับพื้นผิว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์ในระนาบสามมิติ ปริมาตรที่ได้จากเวกเตอร์ทั้งสามคือ $r^{(1,0)}$, $r^{(0,1)}$ และ $r^{(2,0)}$ โดยคิดจาก $\langle r^{(1,0)} \times r^{(0,1)}, r^{(2,0)} \rangle$ จะเป็นสัดส่วนที่คงที่

จากนั้นเราสามารถนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลามาเป็นเส้นอ้างอิงที่จะใช้ในการจัดภาพให้ตรงกันและนำมาหาจุดอ้างอิงบนเส้นนี้อีกทีหนึ่งก็ได้ ซึ่งก็คือจุดที่มีแรงบิดของเส้น (Zero torsion point)

4.5 การคำนวณค่าปริมาตรเป็นศูนย์ และแรงบิดเป็นศูนย์เป็นจุดเด่นเอกลักษณ์ เพื่อการซ้อนทับภาพสามมิติ

เราสามารถคำนวณปริมาตร จากเวกเตอร์สามเวกเตอร์ได้ ดังภาพที่ 4.1 เมื่อ a, b และ c เป็นเวกเตอร์ ผลคูณของ a และ b เป็นพื้นที่ฐานเมื่อนำมาคูณกันกับความสูง $c \cos \phi$ ก็จะได้ ปริมาตร $\text{Volume} = \|a \times b\| \|c\| |\cos \phi|$ หรือ $\text{Volume} = |a \times b \cdot c|$ ปริมาตรจะเป็นศูนย์เมื่อเวกเตอร์ใดเวกเตอร์หนึ่งเป็นศูนย์หรือเวกเตอร์ทั้งสามอยู่ในระนาบเดียวกัน



ภาพที่ 4.1 การคำนวณหาปริมาตรจากสามเวกเตอร์

ดังนั้นถ้าให้ $r(t)$ เป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า เราสามารถคำนวณปริมาตรจากอนุพันธ์อันดับต่างๆของเส้นโค้งได้จาก

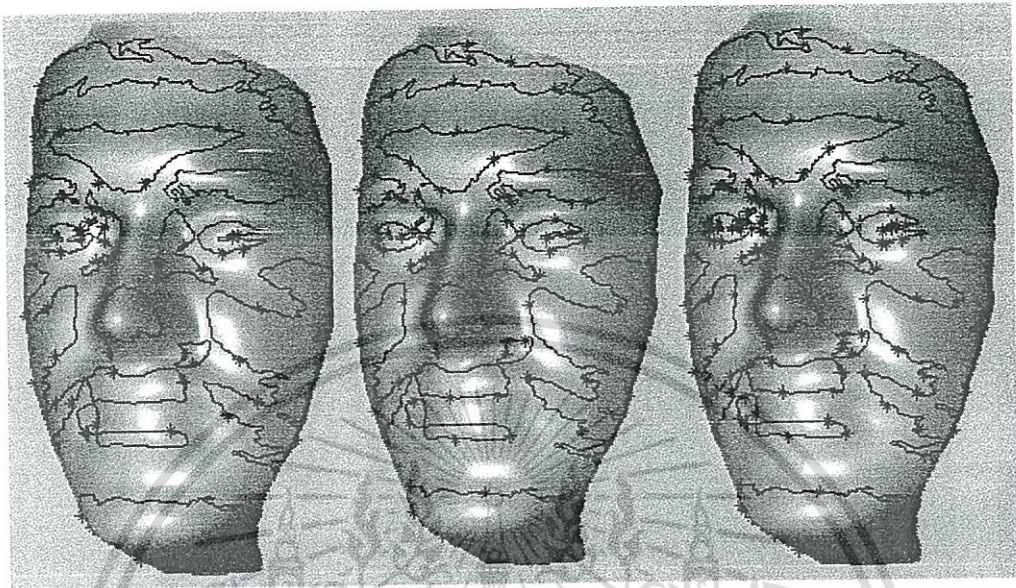
$$v_1(t) = \langle r^{(0)}(t) \times r^{(1)}(t), r^{(2)}(t) \rangle \quad (4.4)$$

เมื่อ $r^{(0)}(t)$, $r^{(1)}(t)$ และ $r^{(2)}(t)$ เป็นอนุพันธ์อันดับศูนย์ หนึ่ง และ สอง ของจุดบนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าที่ตำแหน่ง t ในขณะเดียวกันเราสามารถคำนวณปริมาตรอีกตัวหนึ่งได้จาก $r^{(1)}(t)$, $r^{(2)}(t)$ และ $r^{(3)}(t)$ เมื่อ $r^{(3)}(t)$ เป็นอนุพันธ์อันดับสามของจุดบนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าที่ตำแหน่ง t

$$v_2(t) = \langle r^{(1)}(t) \times r^{(2)}(t), r^{(3)}(t) \rangle \quad (4.5)$$

เราจะเรียก v_1 และ v_2 เมื่อ $v_1(t) = 0$ และ $v_2(t) = 0$ เท่ากับศูนย์ว่า ค่าปริมาตรเป็นศูนย์ (Zero-volume) และค่าแรงบิดเป็นศูนย์ (Zero-torsion) ตามลำดับ เนื่องจาก เมื่อนำค่าอนุพันธ์อันดับสามมาคำนวณจะสัมพันธ์กับความหมายของการบิดตัวของเส้นโค้ง ดังนั้นที่จุดแรงบิดตัวเท่ากับศูนย์ หมายถึงจุดที่มีการบิดตัวของเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่คงสภาพอยู่ได้ภายใต้การแปลงแบบแอฟเฟน ตัวอย่างของจุดที่ค่าปริมาตรเป็นศูนย์ ค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าของใบหน้า ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4.2 ก. จุดปริมาตรเป็นศูนย์ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า และ ค. ทั้งจุดปริมาตรเป็นศูนย์ และจุดแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าบนผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. จุดปริมาตรศูนย์

ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์

ค. จุดปริมาตรศูนย์ (V_1)

จุดแรงบิดเป็นศูนย์ (V_2)

ภาพที่ 4.2 จุดเด่นเอกลักษณ์ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลบนใบหน้า ก.จุดปริมาตรศูนย์ Zero-volume (V_1) points ข.จุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-torsion (V_2) points และ ค.จุดปริมาตรศูนย์ และจุดแรงบิดเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การจัดพื้นผิวให้ตรงกัน (3D Image Alignment)

5.1 บทนำ

หลังจากที่หาจุดเด่นเอกลักษณ์ของพื้นผิวของใบหน้าจากสองข้อมูลภาพมาได้แล้ว ก่อนที่จะซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกัน ต้องหาความสอดคล้องกันของจุดเด่นเอกลักษณ์ของทั้งสองภาพก่อน ในที่นี้ใช้ ค่าแรงบิดเป็นศูนย์ เป็นจุดเด่นเอกลักษณ์ เมื่อหาความสอดคล้องได้แล้วจึงนำมาหาเมตริกซ์การแปลงระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเพื่อนำมาใช้ในการแปลงภาพหนึ่งให้ซ้อนทับกับอีกภาพหนึ่ง

5.2 การหาความสอดคล้องระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์

ในการหาความสอดคล้องกันระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์ สมมุติว่าเรามีเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าสองหน้า ให้ PA เป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับ A และ ให้ PB เป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าเปรียบเทียบ B โดยใบหน้า A และ B มีจำนวนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาอยู่จำนวน q และ r เส้นตามลำดับ

$$PA_{(q)} = (x(t_1), y(t_1), z(t_1)) \quad (5.1)$$

$$PB_{(r)} = (x(t_2), y(t_2), z(t_2)) \quad (5.2)$$

เมื่อ $PA_{(q)}$ และ $PB_{(r)}$ เป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้า A และ B ตามลำดับ

หลังจากการคำนวณค่าแรงบิด $v_2(t) = \langle r^{(1)}(t) \times r^{(2)}(t), r^{(3)}(t) \rangle$ เมื่อหาตำแหน่งที่แรงบิดเป็นศูนย์ $v_2(t) = 0$ ที่ได้จากขั้นตอนการคำนวณหาจุดเด่นเอกลักษณ์ของแต่ละเส้น โดยมีอยู่ m และ n จุด บนใบหน้าต้นฉบับและบนใบหน้าเปรียบเทียบตามลำดับ จากนั้นจึงนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลา มาเรียงลำดับตามจำนวนจุดเด่นเอกลักษณ์จากน้อยไปมาก แล้วนำคำนวณหาปริมาตรจากสามเวกเตอร์ของจุดเด่นเอกลักษณ์สี่จุด (i, j, k และ l) ที่วิ่งไล่เรียงอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา เวกเตอร์ทั้งสามจึงได้จาก

$$V_{(i,j,k,l)} = |(r_i - r_l) \times (r_j - r_l), (r_k - r_l)| \quad (5.3)$$

ขั้นตอนต่อมา นำปริมาตรที่ได้มาหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตร ณ จุดอ้างอิงต่อปริมาตรของจุดถัดไป

$$V_{ratio} = \frac{V_{(i)}}{V_{(i+1)}} \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $V(i)$ เป็นปริมาตรสามเวกเตอร์ของจุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และ $V(i+1)$ เป็นปริมาตรสามเวกเตอร์ของจุดเด่นเอกลักษณ์ถัดไป

นำ V_{ratioA} ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับนี้ไปเปรียบเทียบกับ V_{ratioB} ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าเปรียบเทียบ โดยมีการหมุนเวียนคำนวณชุดของอัตราส่วนปริมาตรของใบหน้าเปรียบเทียบจนครบ ($m:n$) แล้วพิจารณาที่ผลรวมความแตกต่างต่ำสุด ถ้าค่าความแตกต่าง ε น้อยกว่าที่กำหนดไว้ ζ อย่างน้อยที่สุดต่อเนื่องกันจะถือว่าจุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลานบนใบหน้าเปรียบเทียบ สอดคล้องกับจุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าต้นฉบับ และถือว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเส้นนี้ของใบหน้าเปรียบเทียบ สอดคล้องกับเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับ

$$\% \varepsilon = \frac{V_{ratioA} - V_{ratioB}}{V_{ratioA}} \times 100 < \zeta \quad (5.5)$$

เมื่อ ζ เป็นค่าขีดขั้นที่กำหนดไว้ ซึ่งในที่นี้กำหนดไว้ 5% การคำนวณเช่นนี้จะกระทำซ้ำ และหมุนเวียนจนครบ ($q:r$) ระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลา $PA(q)$ เส้นถัดไปจนครบทุกเส้น $PB(r)$ แล้วนำคู่ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาที่สอดคล้องกันไปคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงเพื่อจัดภาพให้ตรงกันต่อไป

5.3 การหาเมตริกซ์การแปลงระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

หลังจากที่เราได้ความสอดคล้องกันของเส้นโค้งเชิงพาราโบลามาได้แล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งเราได้ทั้งความสอดคล้องกันระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและความสอดคล้องกันระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลาด้วย เนื่องจากความสอดคล้องที่ได้มีได้มีเพียงคู่เส้นโค้งเดียว เราจึงต้องนำความสอดคล้องทั้งหมดที่พบมาคำนวณหาเมตริกซ์การแปลง เพื่อการซ้อนทับและการจัดให้ตรงกันของภาพ โดยคำนวณจาก

ให้ p_i เป็นจุดแรงบิดเป็นศูนย์กลางของภาพคู่เทียบที่สอดคล้องกับ p'_i ซึ่งเป็นจุดแรงบิดที่เป็นศูนย์กลางของภาพต้นฉบับ สมมติว่ามีความสอดคล้องกัน n จุด ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพคู่เทียบเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$p'_i = T p_i \quad (5.6)$$

โดยจุดแรงบิดเป็นศูนย์กลางของภาพคู่เทียบ $p_i = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$

จุดแรงบิดที่เป็นศูนย์ของภาพต้นฉบับ $p'_i = \begin{bmatrix} x'_1 & x'_2 & \dots & x'_n \\ y'_1 & y'_2 & \dots & y'_n \\ z'_1 & z'_2 & \dots & z'_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$

เมตริกซ์การแปลงแบบแอฟเฟjne $T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

ดังนั้นถ้าเราทราบ T ก็จะสามารถทำการแปลงเรขาคณิตของภาพให้ภาพคู่เทียบซ้อนทับกับภาพต้นฉบับได้ โดยในการคำนวณหาค่า T นั้น ได้จากการหาค่าที่ทำให้ค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจาก

$$E = \sum_{i=1}^n \|p'_i - T p_i\|^2 \quad (5.7)$$

ถ้า E มีค่าน้อยมากแสดงว่า ภาพต้นฉบับกับภาพคู่เทียบที่ผ่านการแปลงกลับซ้อนทับกันได้ดี ดังนั้นเราจึงต้องคำนวณหาค่า T ที่ทำให้ E ต่ำสุด โดยการหอนุพันธ์ $\partial E / \partial T = 0$ ระหว่าง E เทียบกับ T ให้เท่ากับศูนย์ แล้วแก้สมการหา T โดยให้

$$\begin{aligned} u_i &= x'_i - a_{11}x_i - a_{12}y_i - a_{13}z_i - a_{14} \\ v_i &= y'_i - a_{21}x_i - a_{22}y_i - a_{23}z_i - a_{24} \\ w_i &= z'_i - a_{31}x_i - a_{32}y_i - a_{33}z_i - a_{34} \end{aligned}$$

ดังนั้น $E = \sum_{i=1}^n [u_i \quad v_i \quad w_i \quad 0] \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$

$$E = \sum_{i=1}^n (u_i^2 + v_i^2 + w_i^2) \quad (5.9)$$

จากนี้จัดในรูป $\partial E / \partial T$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial E}{\partial T} = -2 \sum_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ 0 \end{bmatrix} [x_i \quad y_i \quad z_i \quad 1] \quad (5.10)$$

ดังนั้น
$$\frac{\partial E}{\partial A} = -2 \sum_i (p'_i - T p_i) p_i^T \quad (5.11)$$

และให้ $\partial E / \partial T = 0$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial A} &= -2 \sum_i (p'_i - T p_i) p_i^T = 0 \\ \sum_i T p_i p_i^T &= \sum_i p'_i p_i^T \end{aligned} \quad (5.12)$$

นำ $(p_i p_i^T)^{-1}$ ซึ่งเป็น inverse ของ $p_i p_i^T$ คูณทั้งสองข้างเพื่อหา T

$$T = \sum_i p'_i p_i^T (p_i p_i^T)^{-1} \quad (5.13)$$

บทที่ 6

ระบบการถ่ายภาพและการคำนวณตัวแปร

6.1 บทนำ

ขั้นตอนและกระบวนการทดลองและผลการทดลอง เริ่มจากการถ่ายภาพใบหน้ามนุษย์แบบสามมิติ โดยได้ทดลองสร้างระบบการถ่ายภาพสามมิติด้วยกล้องสองตัว เมื่อได้ข้อมูลภาพสามมิติมาแล้ว จึงนำมาวิเคราะห์หาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละใบหน้า เก็บเข้าสู่ฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการจัดภาพให้ตรงกันและซ้อนทับภาพ เพื่อการระบุตัวตนต่อไป

6.2 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคสเตอริโอ [41]

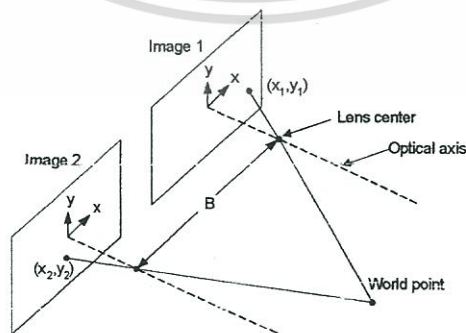
พิกัดต่างๆของวัตถุ สามารถคำนวณออกมาได้เมื่อใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบสเตอริโอ โดยการใช้กล้องถ่ายภาพ 2 ตัววางอยู่ในระนาบเดียวกันและมีแกนที่ขนานกันอย่างสมบูรณ์ อาจเรียกต่อไปว่ากล้องซ้ายและกล้องขวาซึ่งจะถ่ายภาพของวัตถุชิ้นเดียวกัน สามารถคำนวณ พิกัดสามมิติเมื่อเทียบกับพิกัดโลกได้ดังแสดงใน ภาพที่ 6.1 และคำนวณ พิกัดต่างๆได้ด้วยสมการ

$$Z = f \frac{fB}{x_2 - x_1} \quad (6.1)$$

$$X = \frac{x_1}{f} (f - Z) \quad (6.2)$$

$$Y = \frac{y_1}{f} (f - Z) \quad (6.3)$$

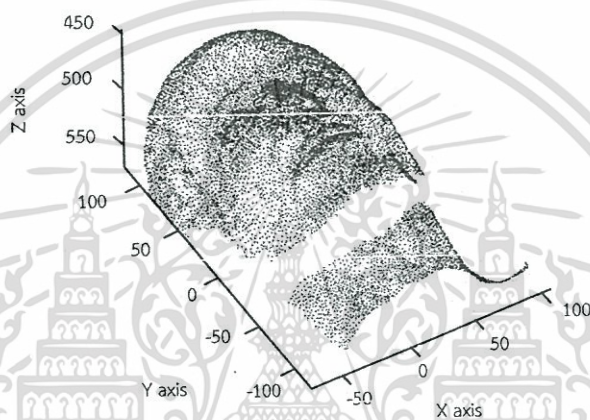
เมื่อ (X, Y, Z) เป็นพิกัด 3 มิติของโลก (x_1, y_1) เป็นพิกัดของโลกในภาพซ้าย (x_2, y_2) เป็นพิกัดของโลกในภาพขวา B เป็นระยะระหว่างจุดศูนย์กลางกล้องซ้ายและกล้องขวา และ f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ในกล้อง



ภาพที่ 6.1 ระบบการถ่ายภาพสเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

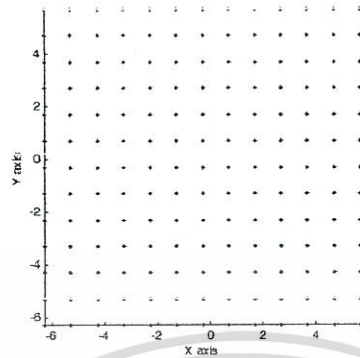
ต่อมาผู้วิจัยได้นำเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์เข้ามาทดลองใช้ เป็นรุ่น eScan3D ของบริษัท 3D digital corp. โดยให้ความละเอียดได้ 0.135-0.210 มิลลิเมตร ที่ระยะการทำงาน 300-650 มิลลิเมตร สแกนใบหน้าหุ่นจำลอง ได้ข้อมูลใบหน้าสามมิติของหุ่นจำลอง ดังภาพที่ 6.2 เป็นตัวอย่างภาพใบหน้าที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบเลเซอร์ ได้ข้อมูลจำนวน 14,837 จุดภาพ



ภาพที่ 6.2 ตัวอย่างข้อมูลภาพสามมิติ ของใบหน้าที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ

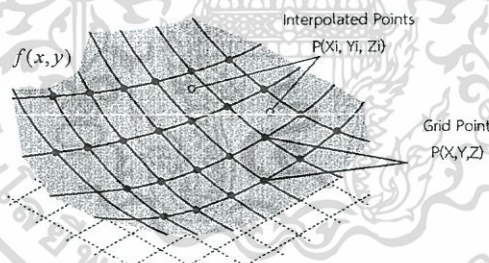
6.3 การสร้างภาพพื้นผิวสามมิติ

การสร้างภาพพื้นผิวสามมิติ ผู้วิจัยได้สร้างจุดกริดซึ่งเป็นเซตของพิกัด (X, Y) โดยคำนวณจาก ขนาดของใบหน้าโดยทั่วไปจะมีขนาดไม่เกิน 300×300 มิลลิเมตร ถ้าต้องการรายละเอียดของจุดภาพที่ 0.5 มิลลิเมตร จะต้องสร้างตารางจุดจำนวน 600×600 จุด ในการวิจัยครั้งนี้ได้สร้างตารางจุดจำนวน 600×600 จุด บนพื้นที่ที่สนใจขนาด 150×150 มิลลิเมตร ทำให้ได้รายละเอียดของจุดภาพในระนาบ (X, Y) ที่ 0.25 มิลลิเมตร ตัวอย่างการสร้างตารางจุดจำนวน 13×13 จุด บนพื้นที่ขนาด -2π ถึง 2π ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ตัวอย่างการสร้างจุดตารางบนพื้นที่ -2π ถึง 2π จำนวน 13×13 จุด

จำนวนตารางจุดที่เหมาะสม ในการทดลองพบว่าจำนวนตารางจุดนั้นยังมีจำนวนจุดมากขึ้นก็ จะให้รายละเอียดในการสร้างภาพที่สูงขึ้น แต่จะใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้นตามไปด้วย ผู้วิจัย จึงเลือกใช้จำนวนที่น้อยที่สุดเท่าที่พอจะยอมรับคุณภาพของภาพได้และไม่เกินความสามารถของ เครื่องสแกนเลเซอร์ จากนั้นจึงคำนวณหาฟังก์ชัน Z บนจุด (X, Y) เพื่อให้ได้ฟังก์ชัน $Z(X, Y)$ โดยการ ประมาณค่าจากข้อมูลภาพสามมิติ $P(X_i, Y_i, Z_i)$ (Point cloud data) ดังภาพที่ 6.4



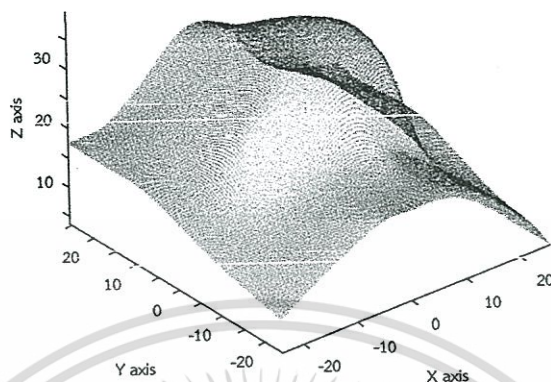
ภาพที่ 6.4 การหาฟังก์ชัน Z ณ ตำแหน่งตารางจุด (X, Y) จากข้อมูลภาพสามมิติ

โดย คำนวณ Z จาก Bicubic interpolation

$$Z(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (6.4)$$

เมื่อ a_{ij} เป็นสัมประสิทธิ์ จำนวน 16 ตัวที่สัมพันธ์กับ $Z(x, y)$
 $x^i y^j$ เป็นฟังก์ชันที่ใกล้กับตารางจุด (x, y) มากที่สุดจำนวน 4 ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



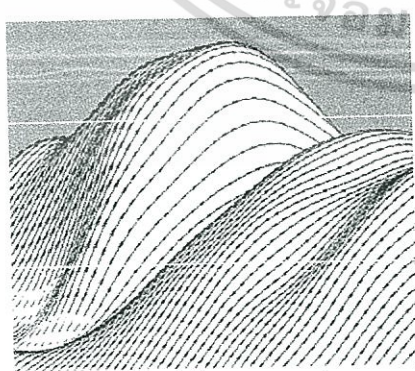
ภาพที่ 6.5 ข้อมูลพื้นผิวภาพ 3 มิติ ที่นำบริเวณปลายจุมกมาแสดงเท่านั้น

การสร้างพื้นผิวสามมิติดังภาพที่ 6.5 ซึ่งเป็นรูปตัวอย่างพื้นผิวบริเวณปลายจุมก จากการกำหนดให้สร้างพื้นผิว 3 มิติ ขึ้นจากตารางจุด (x, y) ที่ห่างกันจุดละ 0.25 มิลลิเมตร

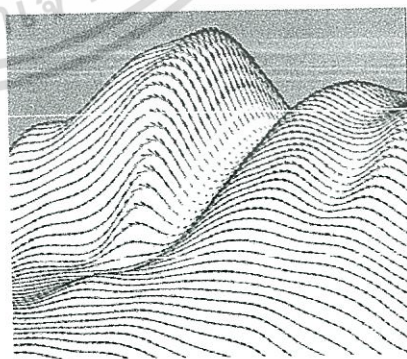
6.4 เวกเตอร์สัมผัส

นำข้อมูลผิวหน้าที่มาคำนวณหาค่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 เพื่อหาเส้นสัมผัสของผิวหน้าเทียบกับแกน X และแกน Y ดังภาพที่ 6.6 ก.และ ข. ตามลำดับ แสดงเส้นสัมผัสผิวหน้าบริเวณปลายจุมก เส้นสัมผัสผิวหน้าเทียบกับแกน X และ Y คำนวณจาก

$$r^{(1,0)} = \frac{\partial r}{\partial u} \quad \text{และ} \quad r^{(0,1)} = \frac{\partial r}{\partial v} \quad (6.5)$$



ก. $(r^{1,0})$ เวกเตอร์



ข. $(r^{0,1})$ เวกเตอร์

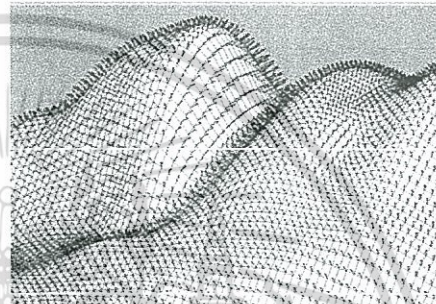
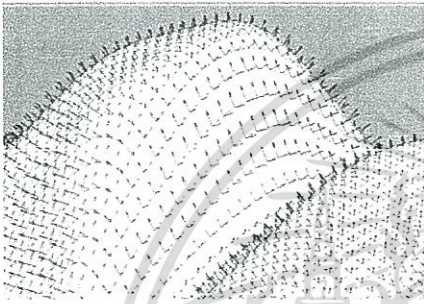
ภาพที่ 6.6 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 เวกเตอร์ปกติ

นำเส้นสัมผัสแกน X และ แกน Y มาคำนวณหา เวกเตอร์ตั้งฉากหรือเวกเตอร์ปกติได้ผล แสดงดังภาพที่ 6.7 ก. ซึ่งแสดงทั้งเวกเตอร์ปกติและเวกเตอร์ที่สัมผัสผิวหน้าในแนวแกน X และแกน Y ส่วนภาพที่ 6.7 ข. แสดงเวกเตอร์ปกติบริเวณปลายจุมูก โดยคำนวณจาก

$$N = \frac{\langle r^{(1,0)} \times r^{(0,1)} \rangle}{|r^{(1,0)} \times r^{(0,1)}|} \quad (6.6)$$



ก. $(r^{1,0})$, $(r^{0,1})$ และเวกเตอร์ปกติ

ข. เวกเตอร์ปกติ (N) ตั้งฉากกับผิวหน้า

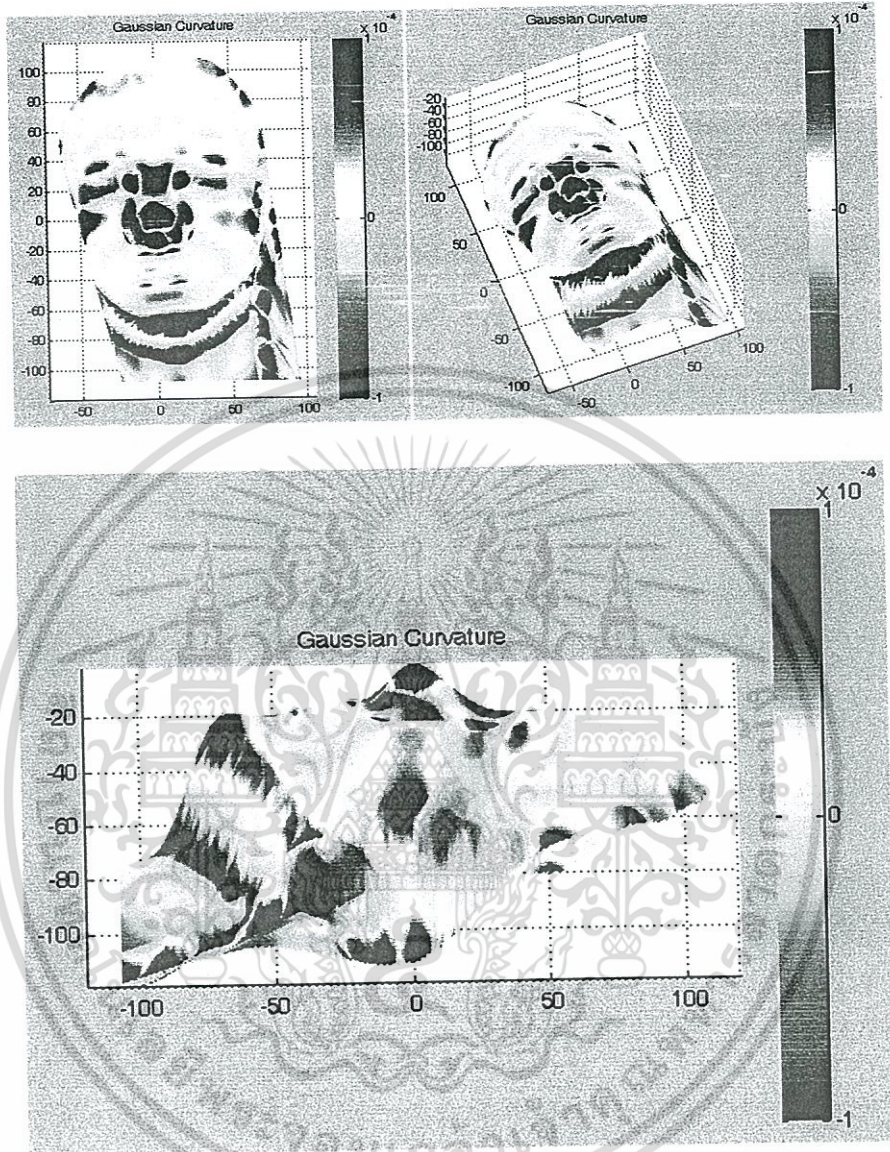
ภาพที่ 6.7 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y และเวกเตอร์ปกติ [42]

6.6 คำนวณหาความโค้งเกาส์เซียน

คำนวณความโค้งเกาส์เซียนได้โดยคำนวณจากอัตราส่วนของดีเทอร์มิแนนท์ของพารามิเตอร์พื้นฐานที่สองและพื้นฐานที่หนึ่ง ภาพที่ 6.8 แสดงค่าระดับความโค้งเกาส์เซียน ที่มุมมองต่างๆ โดยมีแถบสีแสดงค่าความโค้งร่วมด้วย บริเวณสีแดงเข้มหมายถึงบริเวณที่มีค่าความโค้งเกาส์เซียนสูง (พื้นผิวนูนขึ้น) ส่วนบริเวณสีน้ำเงินเข้มหมายถึงบริเวณที่มีค่าความโค้งเกาส์เซียนต่ำ (พื้นผิวเว้าลง)

$$k_G = \frac{\det II}{\det I} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (6.7)$$

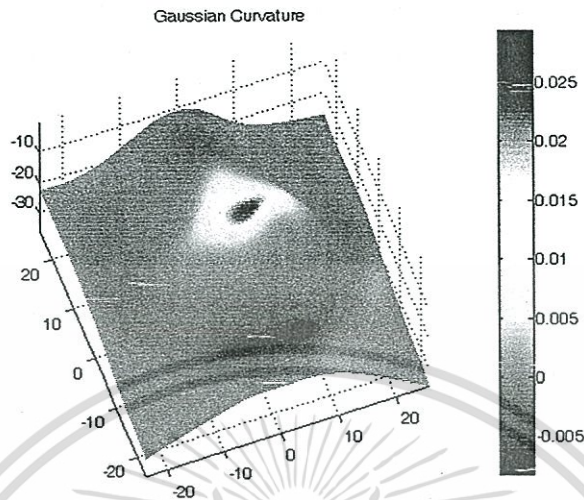
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



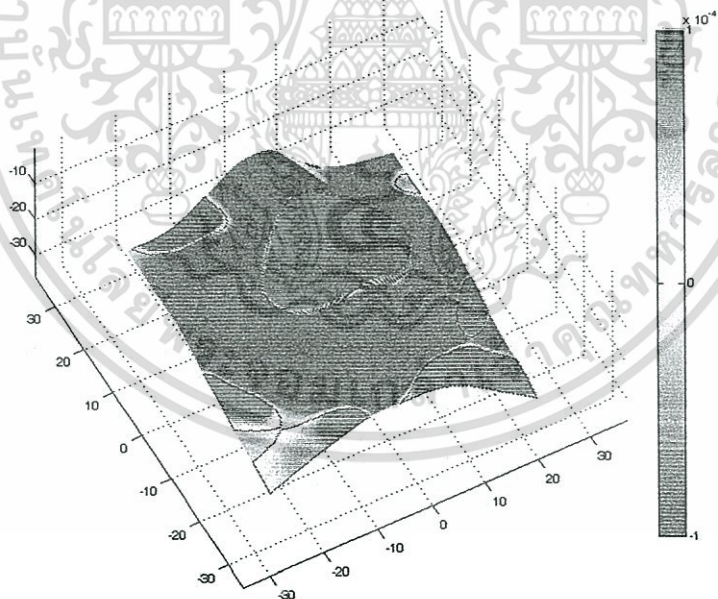
ภาพที่ 6.8 ความโค้งเกาส์เซียน

เพื่อให้เห็นขั้นตอนการทดลองที่ชัดเจนจึงขอภาพเฉพาะบริเวณปลายจมูกขึ้นมาแสดงเท่านั้น ดังในภาพที่ 6.9 เป็นภาพของความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูก แสดงให้เห็นว่ามีค่าความโค้งเกาส์เซียนประมาณ -0.005 ถึง ประมาณ 0.025 mm^2 ภาพที่ 6.10 เป็นภาพความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูกที่ปรับระดับการแสดงผลให้แสดงตั้งแต่ -0.1×10^{-4} ถึง 1×10^{-4} เพื่อให้แสดงรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงค่าความโค้งจากค่าที่เป็นลบผ่านศูนย์สู่ค่าที่เป็นบวกอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.9 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูก



ภาพที่ 6.10 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูกที่ปรับระดับการแสดงผล

6.7 การคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

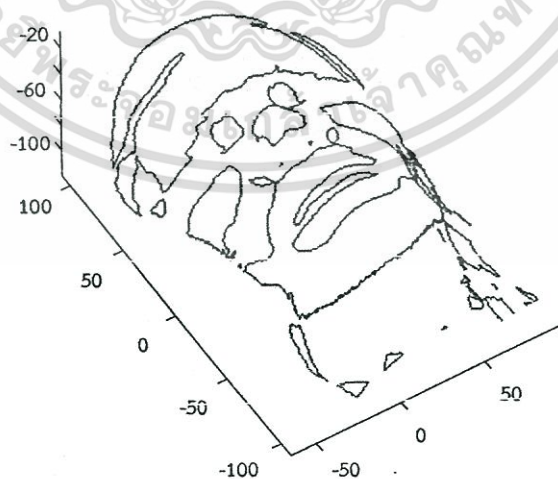
เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคำนวณจากบริเวณที่ความโค้งเกาส์เซียนมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงบริเวณที่มีการโค้งของพื้นผิวที่เปลี่ยนรูปร่างจากรูปโค้งหงายเป็นโค้งคว่ำ

$$k_G = \frac{\det II}{\det I} = \frac{LN-M^2}{EG-F^2} = 0 \quad (6.8)$$

ภาพที่ 6.11 ภาพที่ 6.12 และ ภาพที่ 6.13 แสดงเส้นโค้งเชิงพาราโบลาบริเวณปลายจุ่มกบนไปหน้า และ ความสัมพันธ์กับความโค้งเกาส์เซียน ตามลำดับ

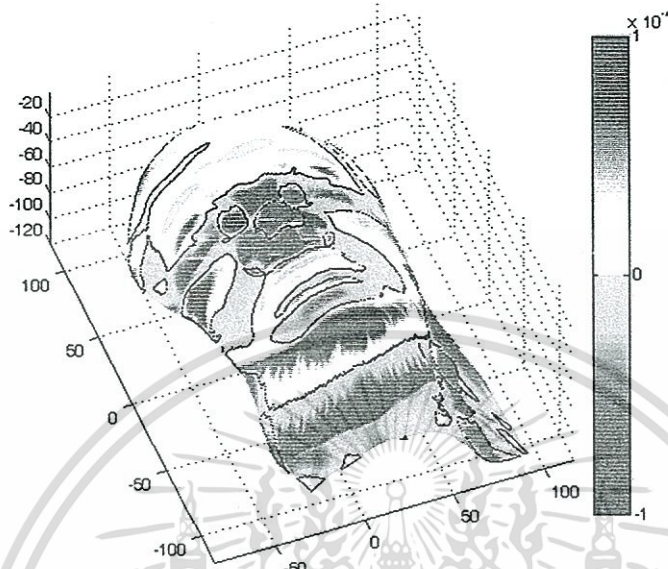


ภาพที่ 6.11 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาบริเวณปลายจุ่มกซึ่งคำนวณจากบริเวณที่ค่าความโค้งเกาส์เซียนเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 6.12 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาบนไปหน้า

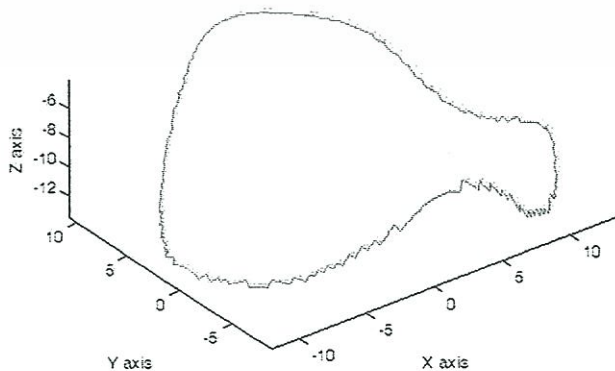
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.13 เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าที่แสดงอยู่บนใบหน้าระดับสีของความโค้งเกาส์เซียน

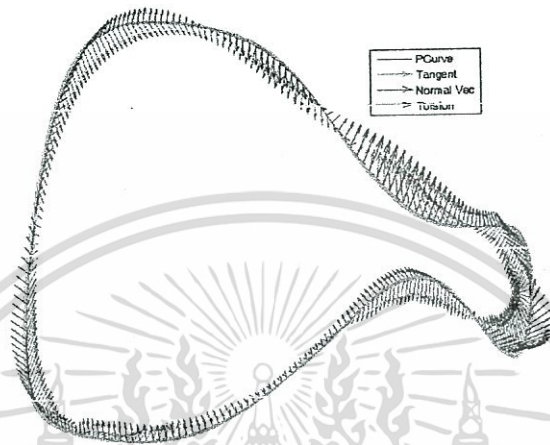
6.8 การคำนวณหาตำแหน่งจุดเด่นเอกลักษณ์

เป็นการคำนวณหาบริเวณที่มีการบิดงอ เปลี่ยนมุมหรือเปลี่ยนระนาบของเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า โดยคำนวณจากบริเวณที่ค่าปริมาตรเท่ากับศูนย์ และค่าแรงบิดเท่ากับศูนย์ โดยคำนวณจากผลลัพท์ของสามเวกเตอร์ ค่าปริมาตรเท่ากับศูนย์ $v_1(t) = \langle r^{(0)}(t) \times r^{(1)}(t), r^{(2)}(t) \rangle$ ค่าแรงบิดเท่ากับศูนย์ $v_2(t) = \langle r^{(1)}(t) \times r^{(2)}(t), r^{(3)}(t) \rangle$ เมื่อ $r^{(0)}, r^{(1)}, r^{(2)}$ และ $r^{(3)}$ คืออนุพันธ์ลำดับต่างๆ ของเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า r ภาพที่ 6.14 เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าบริเวณปลายจมูก

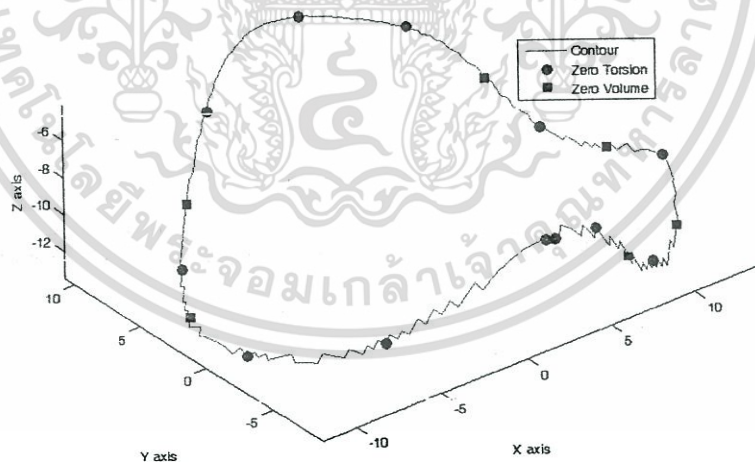


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 6.14 เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าบริเวณปลายจุมก



ภาพที่ 6.15 เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าที่แสดงเวกเตอร์เส้นสัมผัสเป็นสีฟ้า เวกเตอร์ปกติเป็นสีชมพูและเวกเตอร์ที่แสดงแรงบิดเป็นสีน้ำเงิน



ภาพที่ 6.16 เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าบริเวณปลายจุมกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง) และจุดที่ปริมาตรเป็นศูนย์ (จุดสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน)

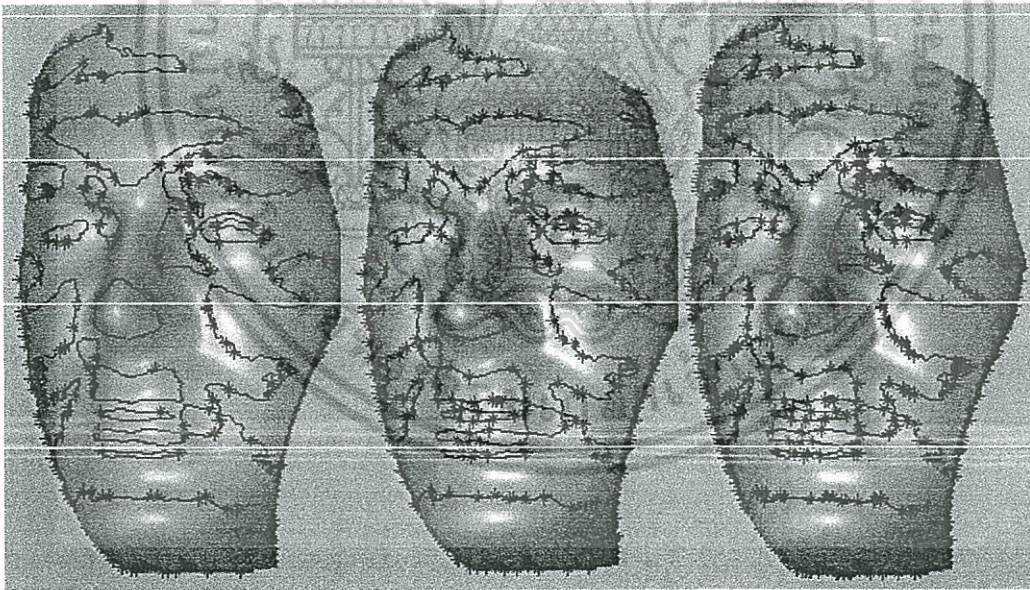
ภาพที่ 6.15 แสดงแรงบิดที่เกิดขึ้นบนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า ส่วนภาพที่ 6.16 แสดงตำแหน่งที่ปริมาตรสามเวกเตอร์และแรงบิดเท่ากับศูนย์ ภาพที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดและตำแหน่งที่ปริมาตรสามเวกเตอร์และแรงบิดเท่ากับศูนย์ ภาพที่ 6.18 จุดเด่นเอกลักษณ์บนภาพใบหน้าตัวอย่าง



ภาพที่ 6.17 เส้นโค้งเชิงพาราโบลามริเวณปลายจุมกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง) จุดที่ปริมาตรเป็นศูนย์ (จุดสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน)



ก. จุดปริมาตรเป็นศูนย์

ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์

ค. จุดปริมาตรเป็นศูนย์
และจุดแรงบิดเป็น
ศูนย์

ภาพที่ 6.18 จุดเอกลักษณ์บนใบหน้า (*) ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลามริเวณ

ก. จุดปริมาตรเป็นศูนย์ Zero-volume (\mathcal{V}_1) points

ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-torsion (\mathcal{V}_2) points

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. จุดปริมาตรเป็นศูนย์และจุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-volume (\mathcal{V}_1) points and Zero-torsion (\mathcal{V}_2) points



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

7.1 บทนำ

ผลการทดลอง แยกออกได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อทดสอบความคงสภาพของความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ ส่วนที่สองเป็นการทดลองเพื่อจัดเรียงให้ตรงกันและลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติ ในเงื่อนไขที่ข้อมูลภาพหายไปบางส่วนและใบหน้าที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน โดยใช้ข้อมูลภาพสามมิติจากเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ สแกนภาพใบหน้าของหุ่นจำลอง ภาพใบหน้าอาสาสมัคร และภาพใบหน้าจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ที่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการทดสอบทฤษฎีการประมวลผลภาพสามมิติ จากผลการทดลองพบว่าความคงสภาพของความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ มีความคงสภาพต่อการแปลงแอฟไฟน์ สามารถนำมาใช้ในการจัดให้ตรงกันและลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันได้

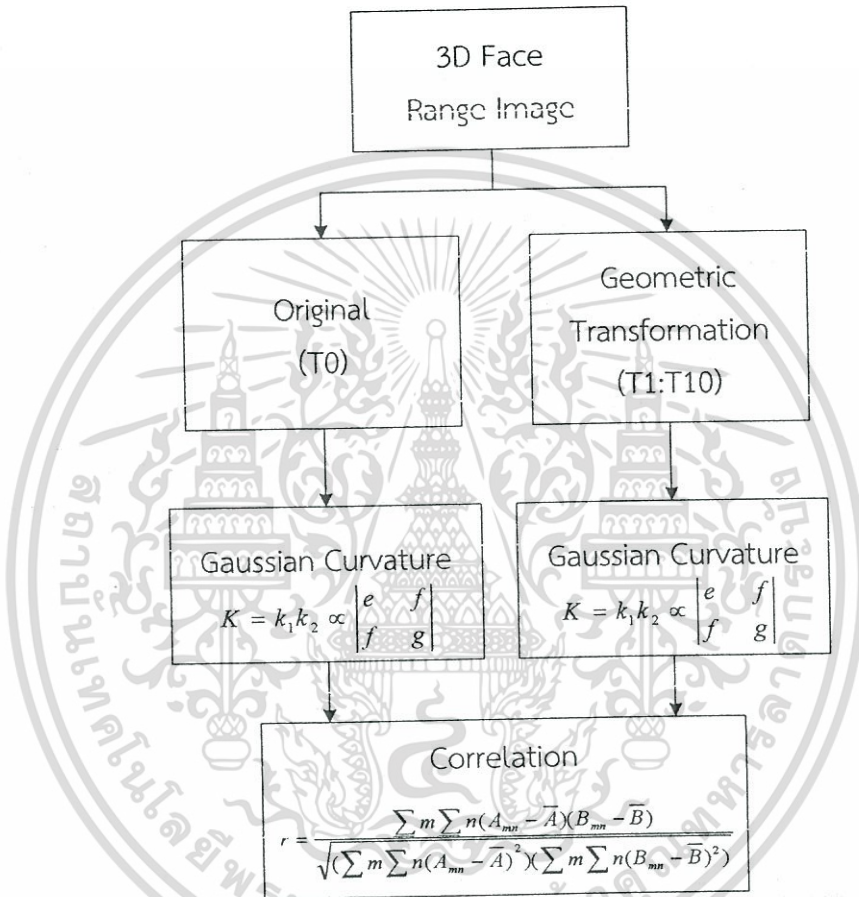
แนวคิดในการออกแบบการทดลองคือ ทำการทดลองพื้นฐานก่อนแล้วเพิ่มระดับการทดลองสู่ความซับซ้อนที่สูงขึ้น เนื่องจากตัวแปรที่ซับซ้อนที่สุดในการทดลองคือ จุดแรงบิดเป็นศูนย์ คำนวณได้จากเส้นโค้งเชิงพาราโบลา เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคำนวณได้จากความโค้งเกาส์เซียน และความโค้งเกาส์เซียนคำนวณได้จากพิกัดพื้นผิวของใบหน้า ดังนั้นจึงเริ่มทดลองจากตัวแปรพื้นฐานก่อนคือ ความโค้งเกาส์เซียน เมื่อทดสอบโปรแกรมจนมั่นใจความถูกต้องแล้วจึงเพิ่มระดับสู่ตัวแปรที่ซับซ้อนขึ้นคือเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และจุดแรงบิดเป็นศูนย์ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Matlab เป็นเครื่องมือ การทดลองทั้งหมดประกอบด้วย หัวข้อที่ 7.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ หัวข้อที่ 7.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ หัวข้อที่ 7.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน หัวข้อที่ 7.5 การทดลองซ้อนทับภาพการและจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติโดยใช้ข้อมูลภาพบริเวณจมูก หัวข้อที่ 7.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอำปาก้าง หัวข้อที่ 7.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล

7.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ

การทดลองหาความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ มีลำดับขั้นตอนการทดลอง ดังภาพที่ 7.1 โดยคำนวณจาก $K = k_1 k_2 \propto \begin{vmatrix} e & f \\ f & g \end{vmatrix}$ และ ค่าเฉลี่ยของความโค้งเกาส์เซียน จาก $K_m = \frac{1}{2} (k_1 k_2)$ ซึ่งจะทำให้เราสามารถบอกรูปร่างของพื้นผิวได้ วัตถุประสงค์ ของการทดลองนี้ เพื่อพิสูจน์ว่าความโค้งเกาส์เซียนสามารถทนต่อการแปลงต่างๆได้หรือไม่ การทดลองทำโดยนำข้อมูลภาพที่ได้จากการสแกนหุ่นจำลองด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท 3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

digital corp. รุ่น eScan3D โดยให้ความละเอียดได้ 0.135-0.210 มิลลิเมตร ที่ระยะการทำงาน 300-650 มิลลิเมตร มาแปลงในลักษณะต่างๆ เช่นการหมุนรอบแกน Z เพื่อจำลองการเอียงคอ การหมุนรอบแกน Y เพื่อจำลองการหันหน้าไปทางซ้ายหรือขวา การหมุนรอบแกน X เพื่อจำลองการก้มเงยหน้า เป็นต้น



ภาพที่ 7.1 ลำดับขั้นตอนการทดสอบความคงสภาพความโค้งเกาส์เซียน

ผลการทดลองแสดงไว้ดังภาพที่ 7.2 รูปใบหน้าต้นฉบับ แสดงรูปร่างของพื้นที่บริเวณต่างๆของใบหน้าด้วยสีที่แตกต่างกัน โดยถ้าค่าความโค้งเกาส์เซียนมีค่าเป็นลบหมายถึงบริเวณที่เว้าลง (concave) แสดงเป็นสีน้ำตาล (เว้ามาก) และสีเหลือง (เว้าน้อย) ส่วนบริเวณที่ค่าความโค้งเกาส์เซียนมีค่าเป็นบวกหมายถึงพื้นที่ที่นูน (convex) ขึ้นมาจากผิวหน้า แสดงเป็นสีน้ำเงิน (นูนมาก) และสีฟ้า(นูนน้อย) ภาพที่ 7.3 ก ข ค และ ง รูปหุ่นจำลองแสดงรูปร่างพื้นผิวภายใต้การแปลงแบบหมุน (Rotate) ภาพที่ 7.4 ก ข และ ค รูปหุ่นจำลองแสดงรูปร่างพื้นผิวภายใต้การแปลงแบบขยายขนาด (Scale) ภาพที่ 7.5 ก ข และ ค รูปหุ่นจำลองแสดงรูปร่างพื้นผิวภายใต้การแปลงแบบเฉือน (Shear)

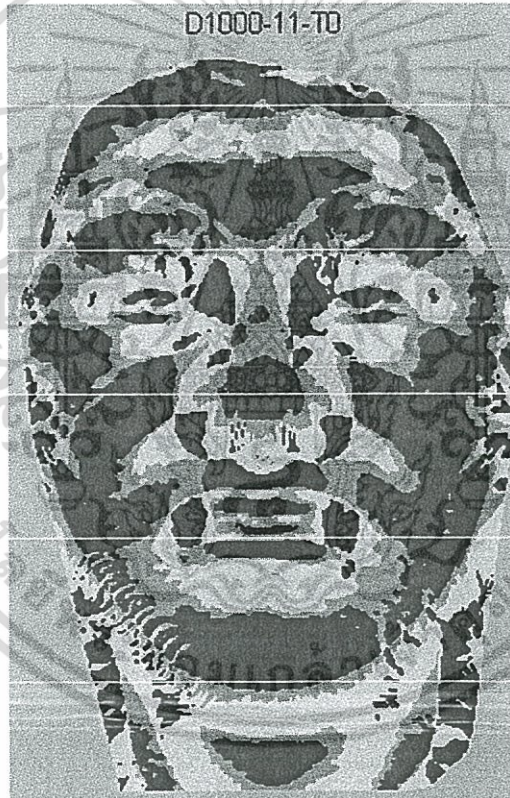
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเชิงปริมาณ ได้ใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติ (3D Correlation coefficient) โดยคำนวณจาก

$$r = \frac{\sum m \sum n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum m \sum n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum m \sum n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (7.1)$$

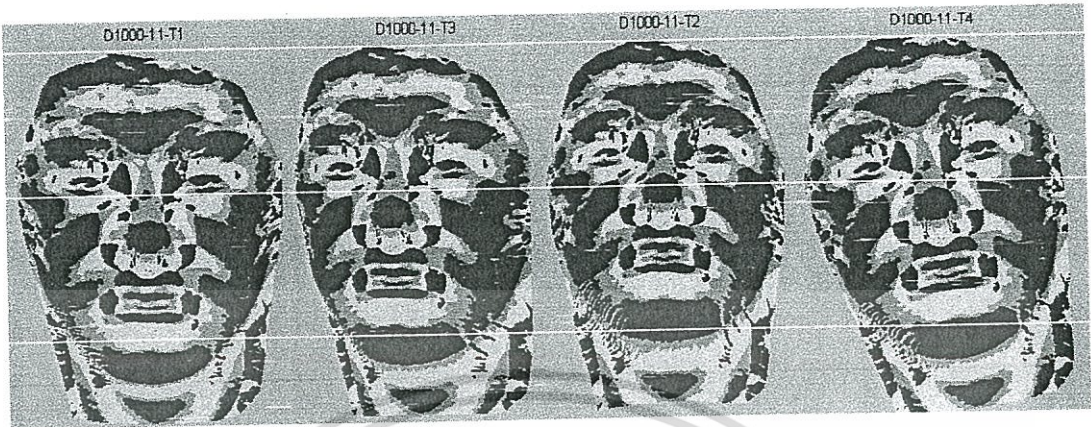
เมื่อ $A_{mn} = [X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}]$ คือพื้นที่ที่สนใจของภาพต้นฉบับ

และ $B_{mn} = [X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}]$ คือพื้นที่ที่สนใจภายใต้การแปลง



ภาพที่ 7.2 รูปร่างพื้นผิวของใบหน้าต้นฉบับหน้าตรง [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.ก้มหน้า 10 องศา ข.หันขวา 10 องศา ค.เงยหน้า 10 องศา ง.เอียงคอไปทางขวา 10 องศา (หมุนรอบแกน X) (หมุนรอบแกน Y) (หมุนรอบแกน X) (หมุนรอบแกน Z)

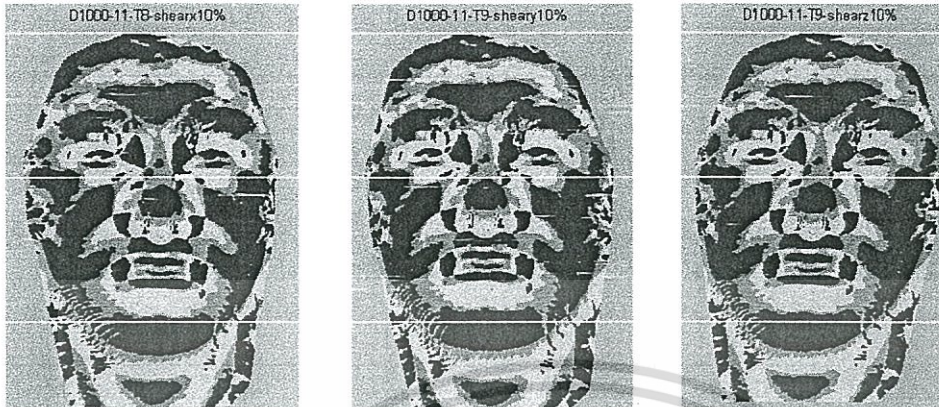
ภาพที่ 7.3 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบหมุน ก.ก้มหน้า 10 องศา ข.หันหน้าไปทางขวา 10 องศา ค.เงยหน้า 10 องศา ง.เอียงคอไปทางขวา 10 องศา



ก.ยืดขนาดตามแกน X 10% ข.ยืดขนาดตามแกน Y 10% ค.ยืดขนาดตามแกน Z 10%
(Scale X) (Scale Y) (Scale Z)

ภาพที่ 7.4 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบยืดขนาด ก.ยืดขนาดตามแกน X 10% ข.ยืดขนาดตามแกน Y 10% และ ค.ยืดขนาดตามแกน Z 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. เฉือนตามแกน X 10%

(Shear X)

ข. เฉือนตามแกน Y 10%

(Shear Y)

ค. เฉือนตามแกน Z 10%

(Shear Z)

ภาพที่ 7.5 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลง

ก. เฉือนตามแกน X 10% ข. เฉือนตามแกน Y 10% และ ค. เฉือนตามแกน Z 10%

ตารางที่ 7.1 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่เว้า (สีน้ำตาล) ภายใต้การแปลงต่างๆ (T0) ใบหน้าต้นฉบับ, (T1) ก้มหน้า 10 องศา (หมุนรอบแกน X), (T2) หันหน้าไปทางขวา 10 องศา (หมุนรอบแกน Y), (T3) เงยหน้า 10 องศา (หมุนรอบแกน X), (T4) เอียงคอไปทางขวา 10 องศา (หมุนรอบแกน Z), (T5) ยืดขนาดตามแกน X 10% (Scale X), (T6) ยืดขนาดตามแกน Y 10% (Scale Y), (T7) ยืดขนาดตามแกน Z 10% (Scale Z), (T8) เฉือนตามแกน X 10%, (T9) เฉือนตามแกน Y 10%, (T10) เฉือนตามแกน Z 10%

ตารางที่ 7.1 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่เว้า (สีน้ำตาล) ภายใต้การแปลงต่างๆ

TABLE I THE 3D CORRELATION OF THE VARIOUS GEOMETRIC TRANSFORMATIONS FOR A CONCAVE REGION

Concave	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
T0	1	0.9848	0.983	0.9908	0.9921	0.9982	0.9992	0.9985	0.9976	0.9974	0.9983
T1	0.9848	1	0.9363	0.9688	0.9783	0.9752	0.9845	0.9906	0.9851	0.9713	0.9844
T2	0.983	0.9363	1	0.9813	0.974	0.9899	0.9812	0.9742	0.978	0.992	0.9801
T3	0.9908	0.9688	0.9813	1	0.9904	0.9896	0.9902	0.9887	0.9809	0.9913	0.9845
T4	0.9921	0.9783	0.974	0.9904	1	0.9892	0.9911	0.9919	0.985	0.9892	0.9848
T5	0.9982	0.9752	0.9899	0.9896	0.9892	1	0.9963	0.9944	0.9962	0.9984	0.9965
T6	0.9992	0.9845	0.9812	0.9902	0.9911	0.9963	1	0.9971	0.9966	0.9968	0.9976
T7	0.9985	0.9906	0.9742	0.9887	0.9919	0.9944	0.9971	1	0.9961	0.9931	0.9967
T8	0.9976	0.9851	0.978	0.9809	0.985	0.9962	0.9966	0.9961	1	0.9937	0.9988
T9	0.9974	0.9713	0.992	0.9913	0.9892	0.9984	0.9968	0.9931	0.9937	1	0.9952
T10	0.9983	0.9844	0.9801	0.9845	0.9848	0.9965	0.9976	0.9967	0.9968	0.9952	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่นูน (สีน้ำเงิน) ภายใต้การแปลงต่างๆ

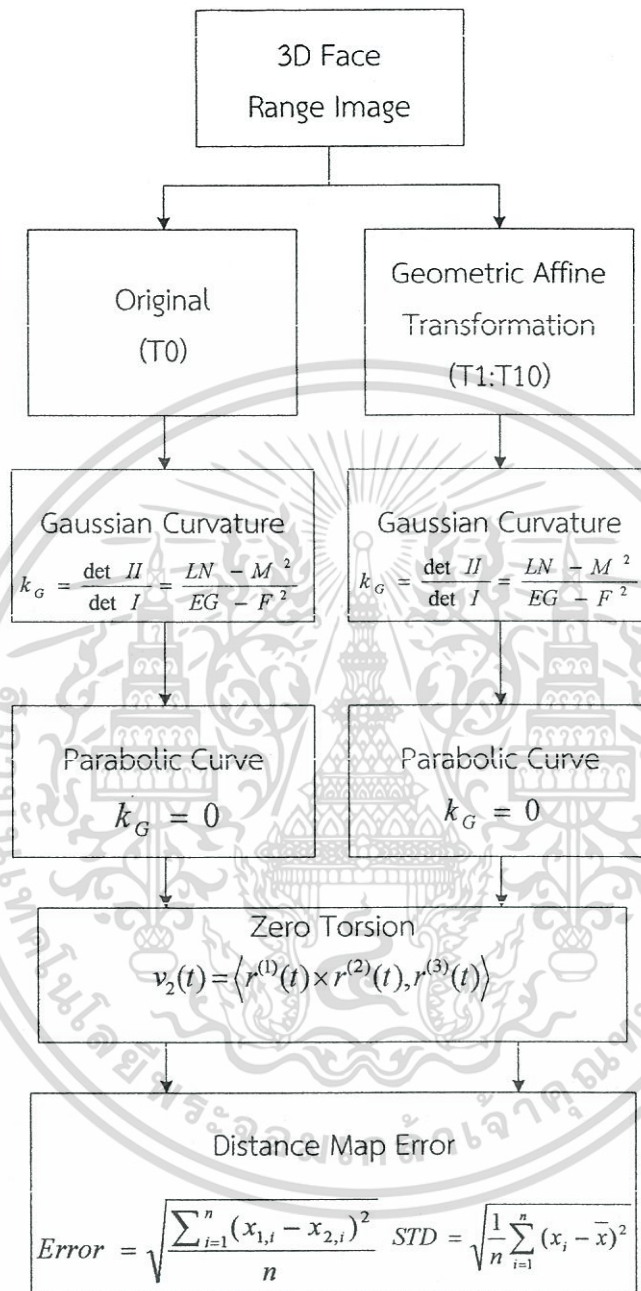
TABLE II THE 3D CORRELATION OF THE VARIOUS GEOMETRIC TRANSFORMATIONS FOR A CONVEX REGION

Convex	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
T0	1	0.9888	0.988	0.9934	0.9886	0.999	0.9991	0.9986	0.9988	0.9988	0.9974
T1	0.9888	1	0.954	0.9782	0.9782	0.9856	0.988	0.9896	0.9893	0.9835	0.9862
T2	0.988	0.954	1	0.9856	0.9762	0.9896	0.9864	0.9847	0.9852	0.9911	0.9853
T3	0.9934	0.9782	0.9856	1	0.984	0.9917	0.9929	0.9925	0.9884	0.9939	0.9897
T4	0.9886	0.9782	0.9762	0.984	1	0.9873	0.9872	0.988	0.9862	0.9871	0.9769
T5	0.999	0.9856	0.9896	0.9917	0.9873	1	0.9976	0.9963	0.9985	0.9987	0.9964
T6	0.9991	0.988	0.9864	0.9929	0.9872	0.9976	1	0.9964	0.9978	0.9978	0.9967
T7	0.9986	0.9896	0.9847	0.9925	0.988	0.9963	0.9964	1	0.9969	0.9966	0.9958
T8	0.9988	0.9893	0.9852	0.9884	0.9862	0.9985	0.9978	0.9969	1	0.9967	0.9969
T9	0.9988	0.9835	0.9911	0.9939	0.9871	0.9987	0.9978	0.9966	0.9967	1	0.9961
T10	0.9974	0.9862	0.9853	0.9897	0.9769	0.9964	0.9967	0.9958	0.9969	0.9961	1

สรุปผลการทดลอง จากภาพที่ 7.2 ถึงภาพที่ 7.5 แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวที่นูน (สีน้ำเงิน) และพื้นผิวที่เว้า (สีน้ำตาล) ของใบหน้า ที่ผ่านการแปลงชนิดต่างๆนั้น ไม่มีความแตกต่างกันจนสังเกตเห็นได้ และเมื่อวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ ดังในตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์นั้น พบว่าพื้นที่ทั้งเว้าและนูนของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้า que ผ่านการแปลงชนิดต่างๆนั้น ไม่มีความแตกต่างกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์มากกว่า 7.9

7.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการทดสอบความคงสภาพ ของจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ภายใต้การแปลงแบบแอฟเฟน ในการทดลองนี้ ได้ใช้ภาพข้อมูลใบหน้าจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D นำมาแปลงแบบต่างๆ เช่น ก้มหน้า เงยหน้า เอียงคอ ปรับขนาด และการเฉือน แล้วนำไปคำนวณหาความโค้งเกาส์เซียนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ดังภาพที่ 7.6 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 7.7 ภาพจุดแรงบิดเป็นศูนย์ (ดอกจันทร์สีแดง) บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา (เส้นสีดำ) บนใบหน้าต้นฉบับ ภาพที่ 7.8 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับ และใบหน้าภายใต้การแปลงแบบหมุน ก. ก้มหน้า 10 องศา ข. เงยหน้า 10 องศา ค. หันหน้าไปทางขวา 10 องศา และ ง. เอียงคอไปทางขวา 10 องศา ภาพที่ 7.9 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงขยายขนาด ก. ขยายขนาดตามแกน X 10% ข. ขยายขนาดตามแกน Y 10% และ ค. ขยายขนาดตามแกน Z 10% สำหรับภาพที่ 7.10 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงแบบเฉือน ก. เฉือนตามแกน X 10% ข. เฉือนตามแกน Y 10% และ ค. เฉือนตามแกน Z 10%

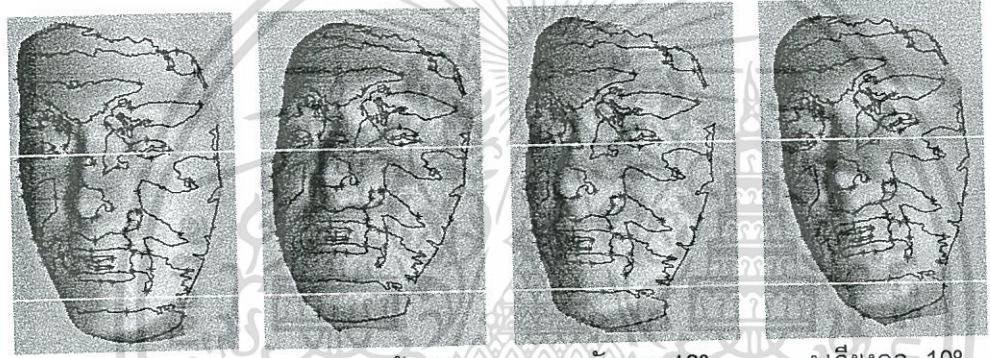


ภาพที่ 7.6 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.7 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับ



ก.ก้มหน้า 10° (Rotate +X) ข.เงยหน้า 10° (Rotate -X) ค.หันขวา 10° (Rotate Y) ง.เอียงคอ 10° (Rotate Z)

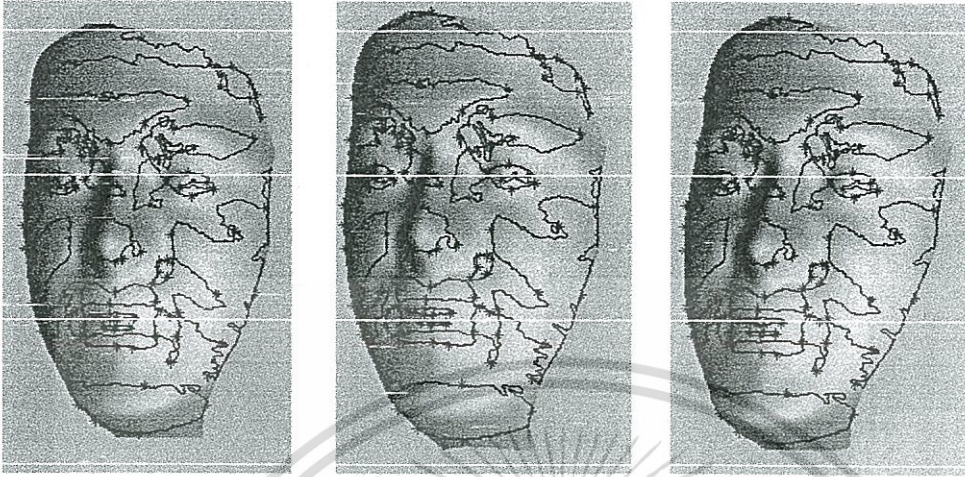
ภาพที่ 7.8 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้าภายใต้การแปลงแบบหมุน



ก.ขยายขนาดตามแกน X 10% ข.ขยายขนาดตามแกน Y 10% ค.ขยายขนาดตามแกน Z 10%

ภาพที่ 7.9 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงขยายขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.เฉือนตามแกน X 10%

ข.เฉือนตามแกน Y 10%

ค.เฉือนตามแกน Z 10%

ภาพที่ 7.10 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงแบบเฉือน

ตารางที่ 7.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของมิลลิเมตรระหว่างภาพต้นฉบับกับภายภายใต้การแปลงต่างๆ โดยที่ T1 เป็นการก้มหน้า 10 องศา (หมุนรอบแกน X), T2 หันหน้าไปทางขวา 10 องศา (หมุนรอบแกน Y), T3 เงยหน้า 10 องศา (หมุนรอบแกน X), T4 เอียงคอไปทางขวา 10 องศา (หมุนรอบแกน Z), T5 ยืดขนาดตามแกน X 10% (Scale X), T6 ยืดขนาดตามแกน Y 10% (Scale Y), T7 ยืดขนาดตามแกน Z 10% (Scale Z), T8 เฉือนตามแกน X 10% (Shear X), T9 เฉือนตามแกน Y 10% (Shear Y) และ T10 เป็นการแปลงแบบเฉือนตามแกน Z 10% (Shear Z)

ตารางที่ 7.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของมิลลิเมตรระหว่างภาพต้นฉบับกับภายภายใต้การแปลงต่างๆ

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Mean Error (mm)	1.45	2.73	2.13	1.42	1.98	2.03	2.38	1.77	0.96	3.22
STD (mm)	0.81	1.74	1.24	0.75	1.34	1.48	2.45	1.45	0.73	2.71

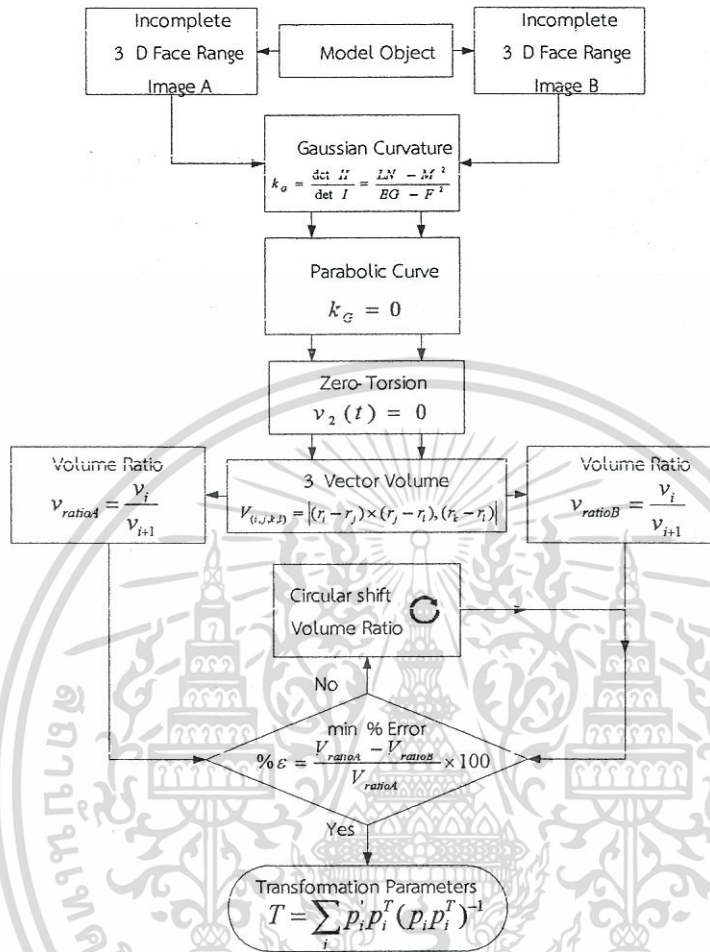
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ผ่านการแปลงชนิดต่าง ๆ นั้น พบว่าค่าความผิดพลาดของภาพที่ผ่านการแปลงแบบหมุน (T1-T4) ไม่เกิน 2.75 มิลลิเมตร แบบขยายขนาด (T5-T7) ไม่เกิน 2.4 มิลลิเมตร และแบบเฉือน (T8-T10) ซึ่งสูงสุดอยู่ที่การแปลงแบบเฉือนตามแกน Z ไม่เกิน 3.22 มิลลิเมตร โดยการแปลงทุกชนิดนั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 2.71 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ความคงทนของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์นั้น มีความคงสภาพ

7.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน

การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถใช้ในกรณีที่ข้อมูลภาพบางส่วนขาดหายไปหรือไม่ ในการทดลองนี้ ทำตามขั้นตอนดังภาพที่ 7.11 โดยใช้เครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ เช่นเดียวกับการทดลองแรก สร้างภาพของหุ่นจำลองมนุษย์ โดยวางเครื่องสแกนห่างจากหุ่น 50 เซนติเมตร และสแกนสองครั้ง โดยครั้งแรกตั้งการทำงานของเครื่องสแกนให้สร้างภาพใบหน้าโดยที่ข้อมูลใบหน้าด้านขวาขาดหายไปประมาณ 10% ดังภาพที่ 7.12 ก. และการสแกนครั้งที่สองของหุ่นจำลองหุ่นเดียวกัน แต่ครั้งนี้ตั้งเครื่องให้สแกนใบหน้าโดยให้ข้อมูลทางด้านซ้ายของใบหน้าขาดหายไปประมาณ 10% ดังภาพที่ 7.12 ก. ผลการทดลองหลังการซ้อนทับภาพสามมิติในกรณีที่ข้อมูลของภาพบางส่วนขาดหายไป แสดงไว้ในภาพที่ 7.12 ข. และ ง. ภาพที่ 7.13 ค เป็นภาพมุมมองด้านล่างก่อนการซ้อนทับภาพ ส่วน ภาพที่ 7.13 ข. ภาพมุมมองด้านล่างหลังการซ้อนทับภาพใบหน้าในกรณีที่ข้อมูลของภาพขาดหายไปบางส่วน



ภาพที่ 7.11 ลำดับขั้นตอนการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน



ก.ภาพด้านหน้า ก่อนการซ้อนทับภาพ

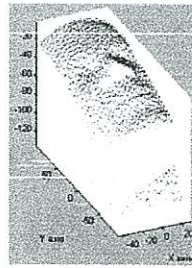


ข.ภาพด้านหน้า หลังการซ้อนทับภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ข้อมูลภาพหลังการซ้อนทับทั้งหมด

ข. ข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกันของ
ข้อมูลภาพ

ภาพที่ 7.14 บริเวณใบหน้าที่นำมาใช้ในการคำนวณความผิดพลาดของระยะทาง

ตารางที่ 7.4 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพในกรณีที่ข้อมูลภาพสามมิติไม่สมบูรณ์

หลังการจัดให้ตรงกัน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ข้อมูลทั้งใบหน้า (ภาพที่ 7.14 ก.)	11.0758	16.6376
ข้อมูลเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกัน (ภาพที่ 7.14 ข.)	1.5045	0.7891

7.5 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติโดยใช้ ข้อมูลภาพบริเวณจมูก

การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติระหว่างใบหน้าต้นฉบับกับข้อมูลภาพบริเวณจมูกของใบหน้าเดียวกันที่สแกนต่างเวลากัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่า เส้นโค้งเชิงพาราโบลาเพียงเส้นเดียวสามารถนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพได้หรือไม่ ในการทดลองนี้เป็นการซ้อนทับภาพของใบหน้าหุ่นที่สแกนด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D แบบเต็มหน้ากับใบหน้าหุ่นที่สแกนเฉพาะบริเวณจมูกเท่านั้น มีลำดับการทำงานเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ดังภาพที่ 7.11 ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 7.15

ตารางที่ 7.5 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพระหว่างใบหน้าต้นฉบับทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น

หลังการจัดให้ตรงกัน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ข้อมูลทั้งใบหน้ากับจมูก	28.4132	25.3149
ข้อมูลเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกัน	1.3592	0.5784

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.ภาพด้านหน้า ก่อนการซ้อนทับภาพ



ข.ภาพด้านหน้า หลังการซ้อนทับภาพ



ค.ภาพด้านข้าง ก่อนการซ้อนทับภาพ



ง.ภาพด้านข้าง หลังการซ้อนทับภาพ



ค.ภาพด้านล่าง ก่อนการซ้อนทับภาพ



ง.ภาพด้านล่าง หลังการซ้อนทับภาพ

ภาพที่ 7.15 ภาพก่อนและหลังการซ้อนทับภาพระหว่างใบหน้าทั้งหมดกับเฉพาะบริเวณจมูก

ผลการทดลองเชิงปริมาณของการจัดใบหน้าให้ตรงกันของใบหน้าทั้งใบหน้ากับข้อมูลภาพเฉพาะบริเวณจมูก ได้ใช้ค่าความผิดพลาดของระยะทางของจุดที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ผลดัง

ตารางที่ 7.5 คำนวณโดย $Distance\ map\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$ เมื่อ $x_{1,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าทั้งใบหน้า และ $x_{2,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าบริเวณจมูก ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้จาก $STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ เมื่อ x_i คือ ค่าผลต่างระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันของข้อมูลภาพใบหน้าทั้งหมดกับบริเวณจมูกของอีกข้อมูลใบหน้าหนึ่งหลังการซ้อนทับภาพ และ $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

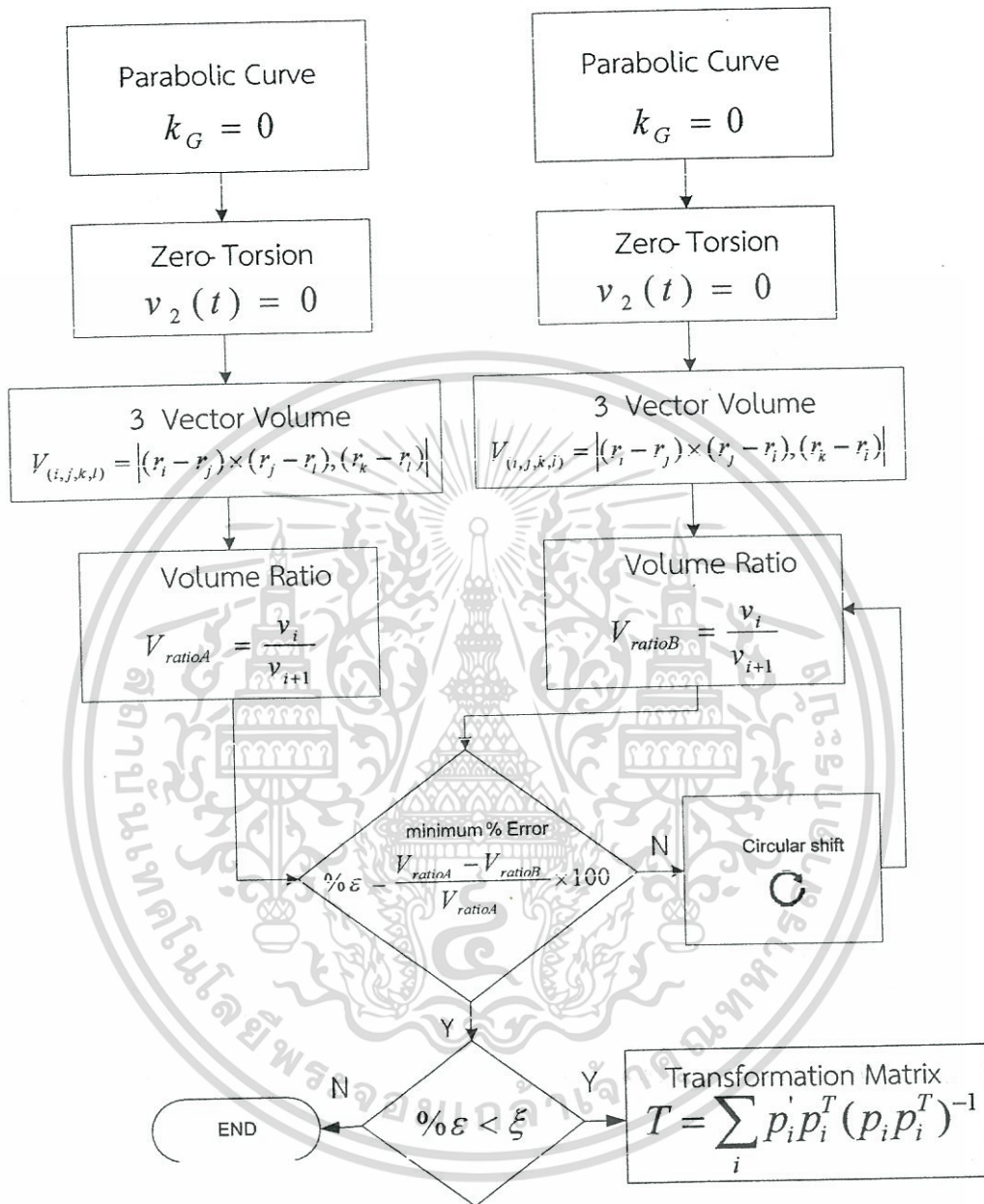
จากผลการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพสามมิติของใบหน้าทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น พบว่าเมื่อนำข้อมูลภาพที่จัดให้ตรงกันแล้วมาคำนวณหาความผิดพลาด พบว่าสูงมาก และเมื่อนำข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกันเท่านั้นมาคำนวณค่าความผิดพลาด พบว่าได้ค่าที่ต่ำลงมาก โดยลดลงเหลือเพียง 1.35 มิลลิเมตร และความเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงเหลือ 0.57 มิลลิเมตร

7.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติ ที่แสดงอารมณ์ปกติและอ้าปากค้าง

การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้ สามารถใช้ลงทะเยนภาพใบหน้าที่มีอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันได้หรือไม่ ในการทดลองนี้ได้ใช้ เครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D โดยให้ความละเอียดได้ 0.135-0.210 มิลลิเมตร ที่ระยะการทำงาน 300-650 มิลลิเมตร มาสร้างภาพอาสาสมัครขณะแสดงอารมณ์สีหน้าปกติและขณะอ้าปากค้างอยู่ มีลำดับขั้นตอนการทดลองดัง

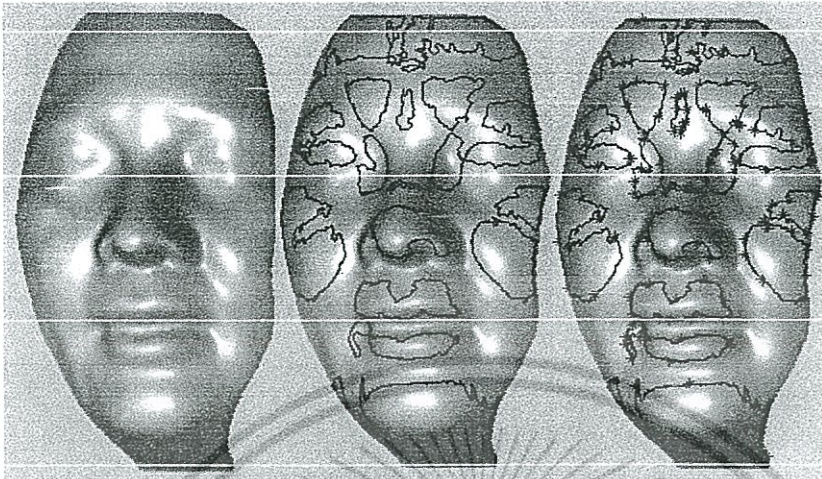
ภาพที่ 7.16 โดยกำหนดระดับขีดขึ้นไว้ว่าถ้าค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยกว่า 5% จะถือว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาที่จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์วิ่งอยู่นั้น สอดคล้องกัน แล้วจึงนำคู่สอดคล้องทั้งหมดของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาไปคำนวณหาเมตริกซ์การแปลง เพื่อนำไปแปลงภาพเปรียบเทียบกับกลับมาซ้อนทับกับภาพต้นฉบับ ได้ผลแสดงดังภาพที่ 7.17 ก.ภาพใบหน้าอาสาสมัครขณะอารมณ์สีหน้าปกติ ข.ภาพใบหน้าอาสาสมัครอารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าปกติ ซึ่งเป็นจุดที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

ภาพที่ 7.18 ภาพใบหน้าอาสาสมัครขณะอ้าปากค้าง ส่วนภาพที่ 7.19 เป็นภาพใบหน้าก่อนและหลังการจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติและขณะอ้าปากค้าง



ภาพที่ 7.16 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอัปากค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.อารมณ์สีหน้าปกติ ข.อารมณ์สีหน้าปกติ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บน
และเส้นโค้งเชิง ไบหน้าปกติ
พาราโบล่า

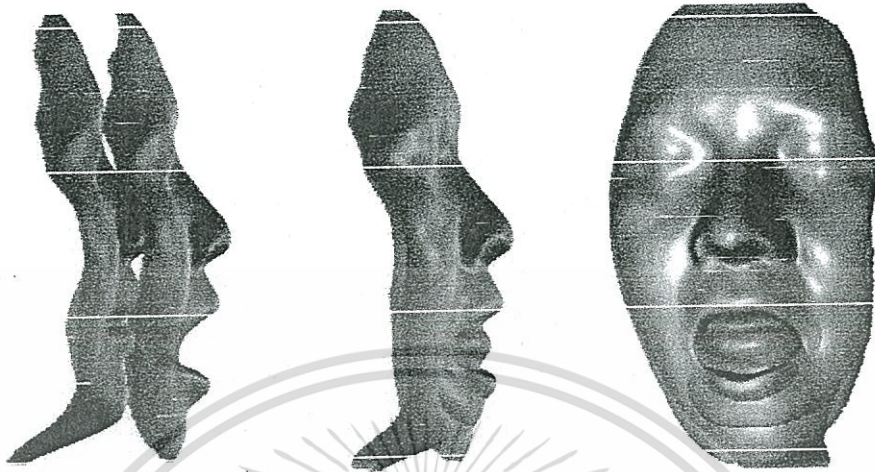
ภาพที่ 7.17 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าของไบหน้าอารมณ์ปกติ ก.อารมณ์สีหน้าปกติ ข.อารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์ที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนไบหน้าอารมณ์ปกติ [44]



ก.ไบหน้าขณะอ้าปาก ข.เส้นโค้งเชิง ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บน
ค้าง พาราโบล่า ไบหน้าขณะอ้าปากค้าง
ขณะอ้าปากค้าง

ภาพที่ 7.18 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าของไบหน้าขณะอ้าปากค้าง ก.ไบหน้าขณะอ้าปากค้าง ข.เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าขณะอ้าปากค้าง และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนไบหน้าขณะอ้าปากค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. มุมมองด้านขวาของ
ใบหน้าก่อนจัดให้ตรงกัน

ข. มุมมองด้านขวาของ
ใบหน้าหลังการจัดให้ตรงกัน

ค. มุมมองด้านหน้าของใบหน้า
หลังการจัดให้ตรงกัน

ภาพที่ 7.19 ภาพใบหน้าก่อนและหลังการซ้อนทับและจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติและขณะ
อ้าปากค้าง [44]

ผลการทดลองเชิงปริมาณของการจัดใบหน้าให้ตรงกันของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง ได้
ใช้ค่าความผิดพลาดของระยะทางของจุดที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ผลดังตารางที่ 7.6 คำนวนโดย

$Distance\ map\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$ เมื่อ $x_{1,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัด
ของใบหน้าปกติ และ $x_{2,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ส่วนค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้จาก $STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ เมื่อ x_i คือ ค่าผลต่าง
ระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันของข้อมูลภาพใบหน้าอารมณ์ปกติกับใบหน้าอ้าปากค้างหลังการซ้อนทับ
ภาพ และ $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

ตารางที่ 7.6 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง

หลังการจัดให้ตรงกัน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ข้อมูลทั้งใบหน้า	2.4464	1.8508
ไม่รวมบริเวณปาก	1.6364	0.7553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพสามมิติของใบหน้าที่แสดงอารมณ์ปกติกับใบหน้าที่อัปคาง พบว่าเมื่อนำข้อมูลภาพที่จัดให้ตรงกันแล้วมาคำนวณหาความผิดพลาด พบว่าค่าความผิดพลาดจะสูงเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณหาความผิดพลาด และลดลงเมื่อนำข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือริมฝีปากบนขึ้นไปมาคำนวณเท่านั้น โดยพบค่าความผิดพลาดเพียง 1.6 มิลลิเมตร และความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.75 มิลลิเมตร

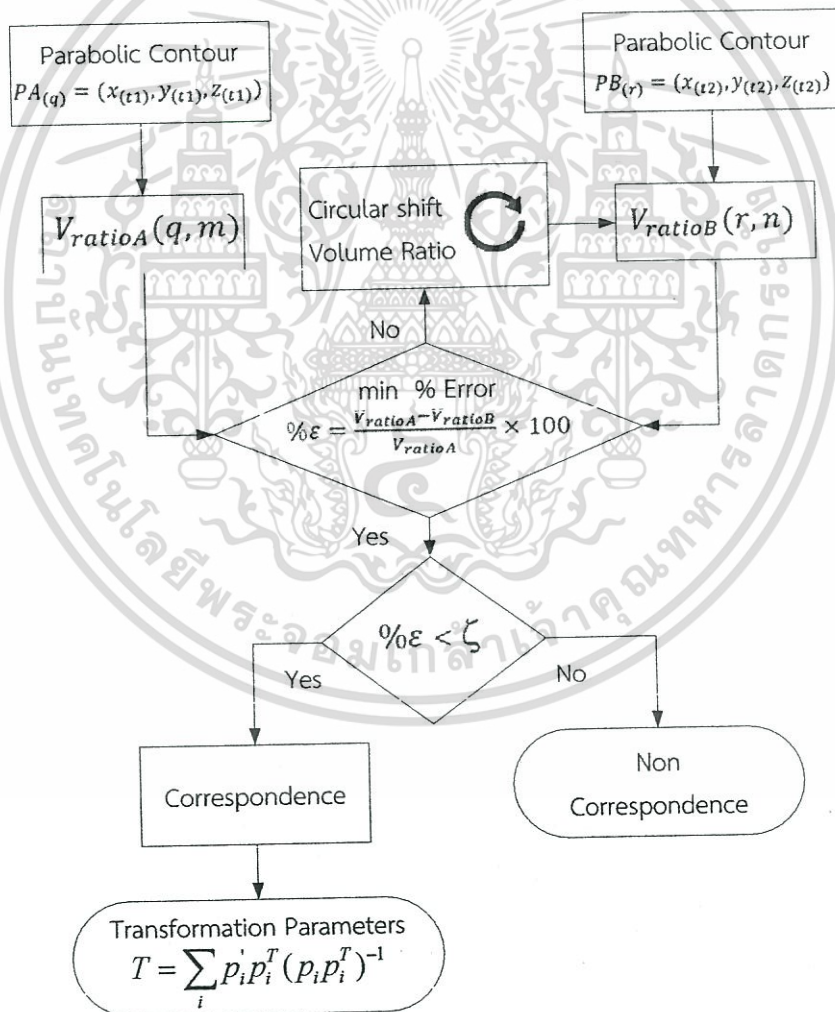
7.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล

ในการทดลองสุดท้ายนี้ได้ทดลองจัดให้ตรงกันและลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันของภาพใบหน้าสามมิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการระบุตัวบุคคล แม้ว่าบุคคลนั้นจะมีสีหน้าไม่เหมือนกับภาพต้นฉบับที่ได้ลงทะเบียนไว้ และได้เปรียบเทียบกับวิธีการที่เป็นที่นิยมอีกสองวิธี คือ ICP และ CPD โดยการนำข้อมูลภาพจากฐานข้อมูลที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมาทดสอบ

ฐานข้อมูลภาพใบหน้าสามมิติ GavabDB [45] เป็นฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบทฤษฎีที่ใช้ในการซ้อนทับภาพสามมิติและการรู้จำภาพใบหน้าสามมิติ เป็นที่นิยมใช้และรู้จักอย่างกว้างขวางในการนำมาทดสอบทฤษฎีการประมวลผลภาพสามมิติ เพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ฐานข้อมูลนี้ได้จากการสแกนใบหน้าอาสาสมัครจำนวน 61 คน ด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ของบริษัท Minolta รุ่น VI-700 digitizer อาสาสมัครแต่ละคนจะถูกถ่ายภาพคนละ 7 ภาพที่มุมมองต่างๆกัน ประกอบด้วย ภาพถ่ายหน้าตรงสองภาพ ภาพเงยหน้า ภาพก้มลง ภาพยิ้ม ภาพหัวเราะ และภาพสும்(ตามใจอาสาสมัคร)

ขั้นตอนการทดลอง เริ่มจากสุ่มข้อมูลใบหน้าจากฐานข้อมูลจำนวน 10 ภาพที่มีใช้คนๆเดียวกันขึ้นมา กำหนดให้เป็นภาพต้นฉบับ แล้วสุ่มข้อมูลภาพของบุคคลเดิมที่มีใช้ข้อมูลต้นฉบับกำหนดให้เป็นภาพเทียบ คำนวณหาความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลา จุดแรงบิดเป็นศูนย์เชิงพาราโบลา และอัตราส่วนปริมาตรสามแฉกเดอริ์ แล้วนำมาลงทะเบียนภาพ ตามลำดับขั้นตอนการทำงานตามภาพที่ 7.20 โดยจะนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลาทุกเส้นของภาพต้นฉบับมาหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างอัตราส่วนปริมาตร ซึ่งจะพิจารณาที่ค่าต่ำที่สุดแล้วตรวจสอบว่าต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าต่ำกว่าจะถือว่าคู่เส้นโค้งเชิงพาราโบลานี้สอดคล้องกัน ทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดนี้จนครบทุกคู่ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา แล้วนำไปหาพารามิเตอร์การแปลง เพื่อแปลงภาพเทียบไปซ้อนให้ตรงกับภาพต้นฉบับ แสดงผลในเชิงคุณภาพด้วยภาพผลการจัดภาพให้ตรงกัน แสดงผลเชิงปริมาณด้วยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของระยะทาง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 7.21 ซึ่งเป็นตารางภาพ โดยใบหน้าแถวแรกเป็นภาพต้นฉบับจำนวน 10 ภาพ ภาพในหลักแรกเป็นภาพที่สุ่มจากภาพบุคคลในแถวแรกแต่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน

นำมาจัดให้ตรงกันกับภาพต้นฉบับ โดยได้แสดงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจัดให้ตรงกัน(ค่าบน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(ค่าล่าง) กำกับไว้ที่ด้านล่างของผลการจัดให้ตรงกันของภาพแต่ละคู่ด้วย การทดลองนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการจัดให้ตรงกันของภาพและการซ้อนทับภาพสามมิติ กับวิธีการ ICP (Iterative Closed Points)[46] และวิธี CPD (Coherent Points Drift) [17] ได้ผล แสดงดังภาพที่ 7.22 และภาพที่ 7.23 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ผลค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการจับคู่ (ผลค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตามแนวหมุมซ้ายบนซ้ายไปล่างขวา) และผลค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการจับคู่ (ผลค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอื่นๆ ยกเว้นตามแนวหมุมซ้ายบนซ้ายไปล่างขวา) นำไปแสดงในตารางที่ 7.7 ซึ่งได้แสดงเวลาที่ใช้ในการทำงานของแต่ละวิธี นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าวิธีการ ICP จำเป็นต้องมีการจัดให้ตรงกันแบบหยาบก่อนด้วย



ภาพที่ 7.20 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกัน ของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันเพื่อการระบุตัวบุคคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reference										
Query										
	2.5643 1.6692	10.7672 6.8649	12.0333 10.7059	9.3588 7.7743	17.2062 11.7894	9.0489 6.2824	6.8356 5.5077	13.9021 8.7295	20.9340 11.2835	14.2164 8.1131
	7.6133 5.4139	2.4644 1.3442	9.8550 7.2603	16.8821 11.0456	16.1265 12.3078	6.7069 4.8506	7.6484 5.5253	6.9767 5.0161	25.6540 19.0114	16.0708 10.0689
	9.6120 8.3935	13.1664 10.4277	2.1669 1.4027	10.9464 6.9338	13.2603 9.6698	18.4997 11.4094	10.6203 6.3471	6.9331 4.8686	12.5192 8.9417	10.9984 8.8320
	9.4153 6.4825	33.5730 23.3092	20.8306 13.9505	1.5082 0.7806	21.5194 13.6289	9.8636 7.3977	18.5631 11.4936	14.0611 11.2956	17.7258 14.0817	26.3414 16.9444
	10.6230 7.2367	23.3767 15.3488	8.5667 5.7807	7.0946 5.5317	1.5548 0.8116	12.5411 7.3099	16.9850 14.3967	13.8533 10.2304	21.5598 15.8189	15.8410 11.3618
	31.2977 20.1926	17.3812 9.3099	10.5474 7.6347	9.3805 8.7951	25.8506 14.4769	1.8776 0.9425	6.3859 4.6327	9.1447 7.3682	14.3964 11.0952	26.7102 18.4743
	9.1019 7.4067	14.0174 10.1811	11.1050 8.3224	13.8816 9.4966	17.7700 13.2174	10.6731 7.6277	2.0160 1.0423	8.2376 5.9747	15.3397 9.8081	10.2715 6.3222
	17.0113 12.6795	11.3995 6.8978	8.3168 6.3508	13.8955 9.9595	14.8340 11.0189	16.2401 11.6120	10.7833 7.7944	2.3555 1.4561	9.4453 7.0899	10.2222 7.5573
	6.6186 5.5848	22.1522 13.3269	10.1889 6.7368	8.3752 5.5175	9.7373 6.7155	13.0486 8.8677	6.8454 5.1201	28.7809 20.4989	3.6881 3.0411	17.8662 11.1877
	14.1803 11.0180	30.5296 21.5472	13.1324 8.9796	16.7648 10.2082	16.3452 11.2897	15.1857 11.9198	5.3057 3.6319	24.5680 15.5037	20.2437 12.4688	3.0597 2.3223

ภาพที่ 7.21 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูล GavabDB โดยแสดงผลค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ที่ด้านล่างของคู่ภาพด้วย [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reference										
Query										
	1.7739 1.0007	1.9880 1.0160	3.4149 2.1347	2.1193 1.1407	2.6069 1.4545	2.4441 1.4735	2.7916 1.3834	3.1075 1.8139	3.5837 2.2131	2.8844 1.9541
	2.8189 1.7895	2.6121 1.8693	4.1347 2.4939	2.8085 1.8249	2.6780 1.5114	3.2112 1.8309	3.2280 1.5500	4.0624 2.5749	3.8283 2.2917	3.2600 2.1091
	2.7365 1.8574	2.6241 1.4666	2.3280 1.6014	2.4621 1.5249	3.0319 1.5916	3.3731 2.0617	3.3022 1.7422	3.1456 2.0105	2.6210 1.9985	2.4147 1.8246
	2.4231 2.0273	2.1839 1.2962	3.1930 2.1891	1.4366 0.7828	2.4258 1.5523	2.7416 1.6669	2.9381 1.5943	3.2607 2.1292	3.4235 2.2974	2.6786 2.0576
	2.6778 1.3964	2.7997 1.5463	3.4589 2.6126	2.5058 1.3234	1.4199 0.7763	3.0601 2.6734	3.6062 2.0500	3.5505 2.4871	3.0388 2.4336	2.9906 2.1549
	2.9482 2.7986	2.3347 1.5080	4.0164 2.7191	2.8525 1.2147	4.3854 2.9777	1.9032 1.3766	2.3092 1.3827	2.8441 1.8937	4.3713 3.1408	2.9557 2.3201
	3.1826 1.8517	3.4370 2.3389	4.2448 2.9214	3.7716 2.8328	4.8642 3.0620	3.5182 2.1179	2.8804 1.6285	3.9207 2.5143	4.7326 3.7440	1.8924 2.7457
	3.2831 2.5730	3.0096 1.8928	2.4961 1.2840	2.8947 1.5922	4.3681 2.8928	3.5327 1.9792	3.0569 1.6614	2.0388 1.5200	2.9977 1.8990	2.6047 1.9700
	3.4673 2.0019	3.6189 2.0254	4.5025 3.4759	3.4236 2.0090	2.3572 1.3858	4.3508 2.9774	4.6318 3.1915	4.0870 3.1698	3.6712 3.1829	3.8039 2.8674
	2.8984 1.5775	2.7429 1.5698	4.1261 2.8196	2.5925 1.3490	2.5400 1.7277	3.4479 2.2889	3.8108 2.0678	3.4658 2.6383	3.5358 2.7101	2.7951 2.3462

ภาพที่ 7.22 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ ICP แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reference										
Query										
	1.3833 0.5695	1.6566 0.7284	2.0682 1.1092	1.6369 0.7442	1.5714 0.6450	1.7174 0.7791	1.8738 0.9225	1.9785 1.0746	1.9814 1.2842	1.9123 1.5528
	1.7961 0.8178	1.8118 0.9347	2.2313 1.0738	1.8424 0.8815	1.3863 0.7442	1.9715 0.9753	2.1224 1.1062	2.1797 1.1022	2.2271 1.6562	2.1989 1.5459
	1.5424 0.7470	1.5700 0.6866	1.5751 1.0243	1.5428 0.6870	1.4425 0.6982	1.7900 0.5073	1.9150 1.0188	1.8036 0.9572	1.8317 1.7162	1.8464 1.6781
	1.5020 0.7371	1.5579 0.7791	1.7768 1.0510	1.0930 0.4389	1.2730 0.6047	1.6697 0.8554	1.7676 0.9213	1.8528 1.0726	1.7571 1.4765	1.7991 1.6356
	1.5480 0.6781	1.5722 0.6663	1.9990 1.0593	1.8886 0.6340	1.2840 0.5896	1.7848 0.5599	1.8597 0.9442	2.1736 1.1622	2.0283 1.7911	1.9698 1.5995
	1.6210 0.7970	1.5635 0.7815	1.5342 0.7393	1.4218 0.6257	1.7281 0.8989	1.4259 0.7042	1.6305 0.8813	1.5100 0.8603	1.6009 1.1859	1.5733 1.4104
	1.8415 0.8584	2.0672 1.9922	2.2729 1.3394	2.1007 1.0830	1.6847 0.8254	2.1174 1.1658	2.0414 1.1134	2.4392 1.4389	2.2634 1.7852	2.2595 1.7310
	1.8698 0.8271	1.8453 0.8513	1.9066 0.8883	1.6979 0.6934	1.8787 0.9353	1.7245 0.8408	1.8193 0.9159	1.4844 0.6819	1.8349 0.9596	1.9403 1.6872
	1.5727 0.7789	1.7938 0.8604	2.2292 1.1984	1.6289 0.7611	1.7771 0.9041	1.7377 0.8615	1.8460 0.9242	1.8849 1.0867	2.1551 1.8949	1.9789 1.3974
	1.6920 0.8411	1.8148 0.6929	2.2595 1.3574	1.5082 0.6646	1.7573 0.9123	1.7789 0.9255	1.8283 0.9868	1.3901 1.1182	2.1590 1.9687	1.9324 1.6395

ภาพที่ 7.23 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ CPD และแสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลสุดท้ายของการทดลอง เป็นการนำค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR :Signal to noise ratio) มาใช้ในการประเมินความสามารถในการจับคู่ได้ถูกต้อง โดยถ้ามีค่ามาก หมายถึง มีความสามารถในการจับคู่ได้ถูกต้องที่สูงกว่า โดยคำนวณจาก

$$SNR = \frac{|\mu_M - \mu_{NM}|}{\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{NM}^2}} \quad (8.2)$$

เมื่อ μ_M คือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจับคู่ถูกต้อง (ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยตามแนวแยงมุมในภาพที่ 7.21 ภาพที่ 7.22 หรือภาพที่ 7.23)

σ_M คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการจับคู่ถูกต้อง (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยตามแนวแยงมุมในภาพที่ 7.21 ภาพที่ 7.22 หรือภาพที่ 7.23)

μ_{NM} คือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจับคู่ไม่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยนอกแนวแยงมุมในภาพที่ 7.21 ภาพที่ 7.22 หรือภาพที่ 7.23)

σ_{NM} คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการจับคู่ไม่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยนอกแนวแยงมุมในภาพที่ 7.21 ภาพที่ 7.22 หรือภาพที่ 7.23)

ตารางที่ 7.7 ความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการจับคู่ภาพถูกคู่และผิดคู่

Method	Average True Match Error (Average Standard deviation)	Average Non-match Error (Average Standard deviation)	Between-to-Within Variation (SNR)	Time (s)	Initial Alignment Required
ICP (Centroid)	2.24592(1.58912)	3.22308(2.076946)	0.3737	3.5190	YES
CPD	1.61864(0.95909)	1.824056(1.034541)	0.1456	183.192	YES
Zero-Torsion	2.32655(1.48826)	14.40281(9.957481)	1.1995	1.9448	NO

สรุปผลการทดลอง

การใช้จุดแรงบิดเป็นศูนย์กลางบนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการจัดภาพใบหน้าสามมิติให้ตรงกันนั้น เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันสามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับวิธี ICP แต่ด้อยกว่าวิธี CPD แต่ CPD ใช้เวลาในการคำนวณนานมาก นานกว่าวิธี ICP 52 เท่า และนานกว่า

วิธีที่นำเสนอ (Zero-Torsion) ถึง 94 เท่า เมื่อเปรียบเทียบในด้านประสิทธิภาพการจับคู่หรือรู้จำภาพนั้น วิธีการที่นำเสนอให้ผลดีที่สุด เนื่องจากให้ผลความแตกต่างระหว่างการจับคู่ถูกต้องและการจับคู่ผิดพลาดที่สูง ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างการจับคู่ถูกต้องและการจับคู่ผิดพลาดสูงถึง 1.19 ในขณะที่วิธี ICP และ CPD ให้ผลที่ 0.37 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงวิธีการทั้งสองนั้นสามารถใช้ในการจัดให้ตรงกันและลงทะเบียนภาพได้ดี แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในการรู้จำใบหน้าบุคคลได้เนื่องจากผลการทดลองพบว่า แม้ว่าจะมีไซไบของบุคคลคนเดียวกัน ก็ยังสามารถจัดให้ตรงกันได้ โดยผลความผิดพลาดเฉลี่ยของการจับคู่ถูกต้องและจับคู่ผิดนั้นใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่วิธีการที่เสนอมสามารถแยกแยะหว่างจับคู่ได้ถูกต้องและจับคู่ผิดพลาดได้ดีกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะของการจัดภาพสามมิติให้ตรงกัน และการซ้อนทับภาพ

งานวิจัยนี้ เริ่มศึกษาจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิคการถ่ายภาพแบบสเตอริโอ โดยการใช้กล้องสองตัว ถ่ายภาพใบหน้าบุคคล ด้วยกล้องวิดีโอที่ติดตั้งขนานกัน ขณะที่ฉายภาพจุดแสงที่เข้ารหัสไว้ด้วยเครื่องแอลซีดีโปรเจคเตอร์ แล้วนำภาพที่ได้มาถอดรหัสจนได้ภาพใบหน้าสามมิติ ใช้เวลาในการถ่ายภาพประมาณ 20 วินาที และใช้เวลาในการคำนวณเพื่อสร้างภาพสามมิติน้อยกว่า 3 วินาที เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องฉายภาพแอลซีดีที่ใช้ มีรายละเอียดในการแสดงภาพเพียง 800x600 พิกเซล ทำให้เมื่อฉายจุดแสงออกไปที่วัตถุที่ระยะทาง 50 เซนติเมตร ขนาดของจุดแสงหนึ่งจุดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น ประมาณ 6x6 พิกเซล ของกล้องวิดีโอและการรับภาพ ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ที่ 768x576 พิกเซล ทำให้ได้รายละเอียดของภาพในระนาบ X และ Y อยู่ที่ 7x5 มิลลิเมตร แนวทางในการพัฒนาการถ่ายภาพ ควรเพิ่มรายละเอียดของแอลซีดีโปรเจคเตอร์ให้มากขึ้น

การศึกษาคงสภาพของความโค้งเคาส์เซียนเมื่อนำใบหน้าสามมิติที่ได้จากเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์มาแปลงแบบระดับแอฟไฟน์นั้น พบว่าความโค้งเคาส์เซียนมีความคงสภาพต่อการแปลงมาก โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์กับภาพต้นฉบับมากกว่า 0.9 จึงเป็นเหตุผลให้เกิดการทดลองต่อมาคือ การศึกษาเกี่ยวกับคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ เพื่อการทดสอบคงสภาพ ของจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์เช่นเดียวกัน พบว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ ก็มีความคงทนต่อการแปลงเรขาคณิตระดับแอฟไฟน์เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเส้นโค้งเชิงพาราโบลานั้นคำนวณมาจากความโค้งเคาส์เซียนที่คงสภาพอยู่แล้ว จากการทดลองเชิงปริมาณพบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ผ่านการแปลงแบบคงที่ (rigid transformation) ขยายขนาดตามแกน X และ Y (Scale X, Scale Y) และ ฉีกตามแกน X และ Y (Shear X, Shear Y) ไม่เกิน 1.75 มิลลิเมตร และสูงขึ้นไม่เกิน 2.75 มิลลิเมตร เมื่อขยายขนาดตามแกน Z (Scale Z และ ฉีกตามแกน Z (Shear Z) ที่ระดับการแปลงถึง 10% ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมากในชีวิตจริง เพราะการเปลี่ยนอารมณ์สีหน้าของบุคคลมักเป็นการแปลงในระนาบ X, Y เช่นการยิ้ม อ้าปาก หรือหัวเราะ เป็นต้น ส่วนการแปลงขยายขนาดหรือฉีกจะเกิดขึ้นเมื่อบุคคลนั้นทำปากยื่นออกมา เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่เราสามารถนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดบนเส้นโค้งพาราโบลาเป็นศูนย์ มาใช้ในการซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกัน หรืออาจนำไปสู่การรู้จำบุคคลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นการทดสอบว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดบนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาจะสามารถนำมาใช้ในการลงทะเบียนภาพสามมิติของใบหน้าได้ จึงได้ทำการทดลองเพื่อดูว่าในกรณีที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วนแล้ว เรายังสามารถลงทะเบียนภาพได้หรือไม่ และอาจจะทำให้เราตัดพื้นที่ที่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงออกไปจากพื้นที่ที่สนใจได้ จากการทดลองสแกนใบหน้าหุ่นจำลองสองครั้งที่มีมุมมองแตกต่างกัน แล้วนำมาลงทะเบียนภาพสามมิติและจัดให้ภาพทั้งสองตรงกัน พบว่าสามารถทำได้ถ้าใบหน้าทั้งสองนั้นยังคงมีพื้นที่ร่วมกันที่สามารถคำนวณความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้พิสูจน์อีกว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเพียงเส้นเดียวนั้น สามารถนำมาใช้ในการลงทะเบียนภาพได้หรือไม่ ในการทดลองต่อมา จากผลการทดลองก็พบว่าสามารถทำได้ อย่างไรก็ตาม การนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลาหลายเส้นและหลากหลายบริเวณ ให้ผลการจัดภาพให้ตรงกันที่ต่ำกว่า

ต่อมาผู้วิจัยได้ทดลองลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติที่มีอารมณ์สีหน้าแตกต่างกัน ระหว่างใบหน้าปกติกับใบหน้าที่อ้าปากค้าง เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าวิธีการที่นำเสนอ นั้นสามารถนำมาใช้กับใบหน้าบุคคลได้จริง เนื่องจากใบหน้าที่อ้าปากค้างนั้นเมื่อแสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการแปลงระดับแอมพลิจูดขึ้น ในกรณีที่อ้าปากนี้ จะเกิดแรงเฉือนตามแนวแกน Y ถ้าทำปากเบี้ยวด้วยก็จะเกิดแรงเฉือนตามแกน X ส่วนการทำปากยื่นออกมานั้นจะเป็นการเฉือนตามแนวแกน Z ดังนั้นในการทดลองนี้เป็นการทดสอบการแปลงแบบแอมพลิจูดที่เกิดการเฉือนตามแกน Y จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สามารถทำได้ โอกาสต่อไปน่าจะได้มีการทดสอบการลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติ สำหรับอารมณ์สีหน้าอื่นๆต่อไป

เพื่อเป็นการทดสอบว่าเราสามารถนำวิธีการของการหาจุดที่แรงบิดบนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา มาใช้กับใบหน้ามนุษย์ที่หลากหลายอารมณ์ได้นั้น ผู้วิจัยได้นำฐานข้อมูลภาพใบหน้าสามมิติขนาดใหญ่ที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมาทดสอบ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำวิธีการที่เสนอนี้ไปใช้ในการรู้จำบุคคล พบว่าวิธีการ ICP และ CPD นั้น น่าจะเหมาะกับการซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกันมากกว่า ในขณะที่วิธีการ Zero-torsion ที่นำเสนอ นั้นสมควรนำไปใช้ในงานการรู้จำบุคคลได้ เนื่องจาก ICP และ CPD ให้ผลการจัดภาพให้ตรงที่ดี แม้ว่าใบหน้าจะเป็นของต่างบุคคลก็ตาม จึงเหมาะกับการจัดภาพให้ตรงกันในกรณีที่รู้ว่าเป็นภาพของบุคคลคนเดียวกันอยู่แล้ว หรือใช้ในกรณีที่ต้องการรวมข้อมูลภาพจากการสแกนบุคคลหรือวัตถุเดิมจากหลากหลายมุมมองเพื่อการรวบรวมภาพข้อมูลสามมิติที่สมบูรณ์ ในขณะที่วิธีการที่เสนอนั้นให้ผลดีพอสมควรสำหรับใบหน้าของบุคคลคนเดียวกันแต่ให้ผลที่แย่มากในกรณีที่ใบหน้าเป็นของคนละคนกัน ทำให้โอกาสที่จะตัดสินว่าสองใบหน้าที่เข้าสู่การทดสอบนั้นเป็นคนเดียวกันได้ถูกต้องมากกว่า

นอกจากนี้วิธีการ Zero-torsion ที่นำเสนอ นั้นยังเหมาะกับการนำไปเก็บเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ระบุตัวบุคคลได้ดี เนื่องจากเราสามารถเก็บข้อมูลเฉพาะ อัตราส่วนปริมาตรที่ประจำอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ก็เพียงพอต่อการยืนยันตัวบุคคลได้ ทำให้ฐานข้อมูลมีขนาดที่เล็กมากเนื่องจากไม่ต้องเก็บข้อมูลภาพทั้งใบหน้า ซึ่งจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำงานอีกด้วย

กระบวนการทำงานที่เด่นประการหนึ่งของวิธีที่เสนอนี้คือ การที่สามารถคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงได้ภายในรอบเดียวของการทำงาน ในขณะที่ ICP และ CPD จำเป็นต้องทำงานซ้ำกับข้อมูลภาพขนาดใหญ่ทั้งหมด ในขณะที่การคำนวณซ้ำของวิธีที่เสนอนั้นเกิดขึ้นในช่วงของการค้นหาคู่สอดคล้องของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ซึ่งเป็นข้อมูลขนาดเล็กมากและมีจำนวนครั้งที่จำกัดเพียงหมดจำนวนเส้นของเส้นโค้งพาราโบลาเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาทั้งใบหน้านั้นมีเส้นโค้งพาราโบลาไม่เกิน 20 เส้น

สำหรับคำแนะนำ มีความเป็นไปได้ที่เราสามารถนำวิธีที่เสนอไปใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เพื่อการรู้จำบุคคลก็ได้ อาจเป็น ICP เนื่องจาก ICP นั้นจำเป็นต้องมีการจัดให้ตรงกันแบบหยาบเป็นการเริ่มต้นก่อน ส่วน CPD นั้นเหมาะกับการทำงานที่ไม่สนใจเวลาว่าจะมากน้อย

บทที่ 9

บทนำการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ลายพิมพ์นิ้วมือถือเป็นลักษณะทางกายภาพ ที่มีความนิยมในการนำมาใช้เป็นมาตรวัดทางชีววิทยา เนื่องจากในการดำรงชีวิตของมนุษย์ทุกคนจะต้องมีการใช้นิ้วมือในกิจกรรมต่างๆ ยกเว้นในกรณีของผู้ที่มีความผิดปกติที่เกี่ยวข้องกับมือ ซึ่งมีประโยชน์ในการรักษาความปลอดภัยของอาคาร ธนาคาร รวมถึงการเข้าถึงระบบอินเทอร์เน็ตหรือคอมพิวเตอร์ การใช้หนังสือเดินทาง การแยกแยะตัวบุคคลเพื่อการบริการทางด้านสุขภาพและสังคม ใช้ประกอบกับงานสอบสวนทางด้านอาชญากรรม หรือนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยภาพลายพิมพ์นิ้วมือจะนำมาใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคล การยืนยันตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ เป็นการเปรียบเทียบภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่สแกนได้ กับภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับพื้นฐานข้อมูลว่ามาจากนิ้วเดียวกันหรือไม่ เพื่อยืนยันว่าเป็นบุคคลนั้นจริง ซึ่งถือเป็นการเปรียบเทียบแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ผลการยืนยันที่ได้จะมีแค่ใช่หรือไม่ใช่ ส่วนในกรณีของการระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ จะเป็นการหว่านนิ้วมือที่สแกนมาเป็นของบุคคลใด โดยการเปรียบเทียบภาพที่สแกนได้กับภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับทั้งหมดในฐานข้อมูล ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างภาพจำนวนมากกับภาพหนึ่งภาพ

การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคล โดยการจับคู่ลายพิมพ์นิ้วมือด้วยวิธี minutiae-based methods ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงเรขาคณิตแบบเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear transformation) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความยืดหยุ่นของนิ้วมือ นั่นคือ เมื่อมีการกดนิ้วมือลงบนเซนเซอร์ของเครื่องสแกนลายพิมพ์นิ้วมือ อาจทำให้รายละเอียดของนิ้วมือซึ่งมีลักษณะเป็นสามมิติ ซ้อนทับกันหรือตำแหน่งเส้นลายพิมพ์นิ้วมือบิดเบือนไป และแรงกดของนิ้วมือที่ไม่ตั้งฉากกับพื้นผิวของเซนเซอร์ทำให้ได้ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เส้นลายพิมพ์นิ้วมือ (ridges) อยู่ใกล้กันหรือห่างกันมากกว่าความเป็นจริง รวมทั้งกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่มีสัญญาณรบกวน (noises) และมีภาพลายนิ้วบางส่วนขาดหายไป (partial occlusion)

บทที่ 10

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ และการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

10.1 บทนำ

คุณลักษณะหรือพฤติกรรมของมนุษย์ที่นำมาใช้เป็นมาตรวัดทางชีววิทยา สำหรับการรู้จำหรือการแยกแยะบุคคล ตัวอย่างเช่น โบทู โบทน้า ความร้อนหรือรูปร่างทางเรขาคณิตของมือ ลายพิมพ์นิ้วมือ ม่านตา เรตินา ลายมือ หรือเสียง เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดังนี้ การรักษาความปลอดภัยของอาคาร ธนาคาร รวมถึงการเข้าถึงระบบอินเทอร์เน็ตหรือคอมพิวเตอร์ การใช้หนังสือเดินทาง การแยกแยะตัวบุคคลเพื่อการบริการทางด้านสุขภาพและสังคม เป็นต้น ซึ่งในบรรดาคคุณลักษณะเหล่านี้ ลายพิมพ์นิ้วมือถือเป็นลักษณะทางกายภาพที่มีความนิยมในการนำมาใช้เป็นมาตรวัดทางชีววิทยา เนื่องจากในการดำรงชีวิตของมนุษย์ทุกคนจะต้องมีการใช้นิ้วมือในกิจกรรมต่างๆ ยกเว้นในกรณีของผู้ที่มีความผิดปกติที่เกี่ยวข้องกับมือ ซึ่งนำไปใช้ประกอบกับงานสอบสวนทางด้านอาชญากรรม หรือนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

คุณลักษณะทางโครงสร้างของลายพิมพ์นิ้วมือที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ส่วนที่เป็นแนวสัน (ridges) และส่วนที่เป็นร่อง (valleys) ของนิ้วมือ โดยในภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ส่วนที่เป็น ridges จะปรากฏเป็นสีดำ ส่วนที่เป็น valleys จะปรากฏเป็นสีขาว โดยรายละเอียดของ ridges สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับคือ ระดับที่หนึ่ง global level เป็นการรวมของ ridges ทำให้เกิดเป็นจุดที่มีลักษณะเฉพาะขึ้น เรียกว่า loop และ delta ซึ่งมีประโยชน์ในการแยกประเภทและการบ่งชี้ลายนิ้วมือ แต่ไม่มีความจำเพาะเพียงพอที่จะนำมาใช้เพื่อการจับคู่ที่ถูกต้อง ระดับที่สองเป็นรูปแบบของจุด minutiae (local level) ซึ่งหาได้จากจุดที่ไม่มีความต่อเนื่องของ ridges เช่น จุดสิ้นสุด (ridge ending) หรือจุดที่มีการแยก (bifurcation) ของ ridges โดยทั่วไปจุด minutiae นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงและคงทนต่อลายพิมพ์นิ้วมือที่มีแรงกดมาก และระดับที่สามเป็นรายละเอียดภายใน ridges โดยรายละเอียดที่สำคัญคือ จุดเล็กๆ (sweat pores) ภายใน ridges

วิธีการจับคู่ลายพิมพ์นิ้วมือ [48] แบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ Correlation-based techniques, Minutiae-based methods, และ Non-minutiae feature-based matching techniques โดยวิธี Correlation-based techniques ทำได้โดยนำภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองมาซ้อนทับกันพอดี จากนั้นทำการหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างพิกเซลที่สอดคล้องกัน เพื่อนำไปหาเมตริกซ์ของการแปลง วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สองคือ Minutiae-based methods เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด โดยหาตำแหน่งของจุด minutiae ในภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสอง แล้วนำมาเก็บไว้ในรูปของชุดข้อมูลของจุด จากนั้นสามารถหาเมตริกซ์การแปลงได้จากจุดที่สอดคล้องกันของภาพทั้งสอง วิธีที่สามคือ Non-minutiae feature-based matching techniques จะใช้กับภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพไม่ดีทำให้ยากต่อการหาจุด minutiae จึงใช้คุณลักษณะของรูปแบบของ ridges อย่างอื่นแทน เช่น ทิศทางการเรียงตัว จำนวนของ ridges ต่อหนึ่งหน่วยความยาว หรือรูปร่างของ ridges เป็นต้น

10.2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจับคู่โดยวิธี Minutiae-based methods [49-51] เป็นการจับคู่โดยอาศัยจุด minutiae ซึ่งเป็นคุณลักษณะระดับ local ที่มีคุณสมบัติในการไม่แปรผันต่อการแปลง จึงมีความเหมาะสมในการนำมาหาคู่ โดยไม่ต้องมีการจัดวางลายพิมพ์นิ้วมือในระดับ global ก่อน โดยเป็นการจับคู่รูปแบบของจุด (point pattern matching) [52], [53] เพื่อหาจุดที่เป็นคู่สอดคล้องกันระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ต้องการตรวจสอบ วิธีการสร้างสามเหลี่ยมจากจุด minutiae ยังเป็นวิธีหนึ่งที่เป็นที่สนใจกันอยู่ในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น การสร้างสามเหลี่ยมแบบ Delaunay จากจุด minutiae [54] เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งและทิศทางที่สัมพันธ์กันของแต่ละ minutiae ที่มีต่อจุดที่อยู่ใกล้เคียงที่ได้จากการสร้างสามเหลี่ยมนั้นๆ หรือการดึงคุณลักษณะต่างๆ จากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae [55]-[57] แล้วนำพิกัดของรูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันมาใช้คำนวณหาเมตริกซ์การแปลง เพื่อจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองภาพให้ตรงกัน หรือการนำวิธีการสร้างสามเหลี่ยมแบบ Delaunay จากจุด minutiae มาใช้ร่วมกับเทคนิค growing and fusing regions [58]

การจับคู่ลายพิมพ์นิ้วมือโดยวิธี Minutiae-based methods ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงเรขาคณิตแบบเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear transformation) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความยืดหยุ่นของนิ้วมือ ดังนั้นเมื่อมีการกดนิ้วมือลงบนเซนเซอร์ของเครื่องสแกนลายพิมพ์นิ้วมือ อาจทำให้รายละเอียดของนิ้วมือซึ่งเป็นสามมิติซ้อนทับกันหรือตำแหน่งบิดเบือน และแรงกดของนิ้วมือที่ไม่ตั้งฉากกับพื้นผิวของเซนเซอร์ทำให้ได้ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ ridge อยู่ใกล้กันหรือห่างกันมากกว่าความเป็นจริง จึงมีนักวิจัยที่พยายามศึกษาและค้นคว้าเพื่อแก้ไขปัญหานี้

ในการแก้ไขปัญหาคัดในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีนักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาแบบจำลองการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นจากระยะทางระหว่าง

ridges เฉพาะที่ [59] และจากการกระจายตัวของจุด minutiae [60], [61] จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาใช้ในการจัดวางภาพต้นฉบับกับภาพที่ต้องการตรวจสอบ จนกระทั่งค่าความผิดพลาดของการจัดวางมีค่าน้อยที่สุด โดยที่ Chen และคณะ [60] ได้นำเสนอการจับคู่โดยอาศัยคุณลักษณะ fuzzy จากรูปสามเหลี่ยมเฉพาะที่ของทั้งสองภาพลายพิมพ์นิ้วมือ Ratha และคณะ [62] ทำการหา minutiae ที่สอดคล้องกันจากโครงสร้างใกล้เคียงเฉพาะที่ Wahab และคณะ [63] ได้ทำการหาคุณลักษณะจากโครงสร้างเฉพาะที่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือ เพื่อนำมาหาจุดสอดคล้องบนภาพ ข้อเสียของการหาแบบจำลองการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นจากการกระจายตัวของ minutiae คือ เนื่องจากการกระจายตัวของ minutiae จะกระจายอยู่ทั่วภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ทำให้มีข้อจำกัดในการจับคู่ภาพที่มีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป ทำให้ข้อมูลของ minutiae ขาดหายไปด้วย นอกจากนี้ Ross และคณะ ได้นำเสนอการหาเส้นโค้ง ridges ที่สอดคล้องกันเพื่อประมาณค่าการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งทำได้โดยเริ่มจากการหา minutiae ที่สอดคล้องกันก่อน แล้วจึงหาเส้นโค้ง ridges ที่สัมพันธ์กับ minutiae นั้น จากนั้นจุดแยกและจุดที่ดึงมาจากเส้นโค้ง ridges จะถูกนำมาใช้ในการหาพารามิเตอร์การแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น การหาจุดสอดคล้องโดยอาศัยเส้นโค้ง ridges มีข้อดีกว่าวิธีที่อาศัย minutiae อยู่ 2 แห่ง คือ จำนวนจุดบนเส้นโค้ง ridges มีจำนวนมาก และเส้นโค้ง ridges มีการกระจายตัวทั่วทั้งภาพ รวมทั้งบริเวณที่ไม่มี minutiae ปรากฏอยู่ แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของเส้นโค้ง ridges คือแปรผันต่อการแปลงที่ซับซ้อนกว่าการแปลงแบบ similarity จึงไม่เหมาะสมกับภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่มีการแปลงแบบ affine หรือแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ในปัจจุบัน มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอคุณลักษณะอื่นที่ไม่ใช่ minutiae เพื่อใช้ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ เช่นการหาคุณลักษณะจากรูปแบบของ ridges ในรูปของรูปร่างและความถี่ [59], [61], [64], [65] ซึ่งถือว่าเป็นคุณลักษณะในระดับ global ซึ่งแตกต่างจาก minutiae ที่เป็นคุณลักษณะในระดับเฉพาะที่ (local) ตัวอย่างของการใช้คุณลักษณะจากรูปแบบ ridges คือการใช้ทิศทางการวางตัวของ ridges [66] และการใช้จุดที่เป็นเอกลักษณะ (singularity) ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือ แต่อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะเหล่านี้มีความไวต่อสัญญาณรบกวนมาก โดยสามารถแก้ปัญหาได้ตามที่นำเสนอใน [67] นอกจากนี้ Jain และคณะ [65] ได้นำเสนอคุณลักษณะที่อาศัยการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง เรียกว่า Gabor filter หรือ Gabor filterbank เพื่อหาคุณลักษณะทั้งในระดับ global (ridges และ valleys) และ local (minutiae) ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ถือได้ว่าเป็นวิธีการจับคู่แบบผสมผสาน เช่นเดียวกับวิธีของ Gu และคณะ [68] ที่ใช้ทิศทางการวางตัวของลายพิมพ์นิ้วมือเป็นคุณลักษณะระดับ global ร่วมกับคุณลักษณะของ minutiae ที่เป็นระดับ local ในการลงทะเบียนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

ในงานวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือโดยอาศัยความไม่แปรผันทางเรขาคณิตสัมบูรณ์ ซึ่งได้จากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจากกลุ่มจุดของ minutiae เพื่อนำมาใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ในขั้นตอนของการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ หลังจากได้คู่ของรูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันจากทั้งสองภาพลายพิมพ์นิ้วมือแล้ว จุดยอดของสามเหลี่ยมเหล่านี้จะถูก

นำมาใช้หาค่าเมตริกซ์การแปลง เพื่อจัดวาง (fingerprint alignment) ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบ (query fingerprint) เข้ากับภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับแบบ (template fingerprint) นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอค่าฟังก์ชันความผิดพลาดเพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการตรวจสอบว่าทั้งสองภาพลายพิมพ์นิ้วมือมาจากนิ้วเดียวกันหรือไม่ (fingerprint verification) หรือเพื่อระบุว่าภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบมาจากนิ้วใดหรือคนใด (fingerprint identification) ซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากที่มีการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือให้ตรงกันแล้ว โดยค่าความผิดพลาดนี้จะคำนวณจากค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด minutiae ที่อยู่ใกล้กันของทั้งสองภาพลายพิมพ์นิ้วมือ (distance map error) ร่วมกับค่าความต่างของคุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง (directional filterbank features: DFB)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 11

แนวคิดและทฤษฎีของการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

โดยอาศัยความไม่แปรผันทางเรขาคณิต

11.1 การสร้างสามเหลี่ยมจากกลุ่มจุด minutiae

จากกลุ่มจุด minutiae ที่ได้จากภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบและภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับ มี การพิจารณาจำนวนสามเหลี่ยมที่จะสร้างได้เป็นสามกรณีตามชนิดของการแปลงทางเรขาคณิต นั่นคือ การแปลงแบบ rigid, affine และแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear transformation) โดยกำหนดให้จำนวน minutiae เท่ากับ m จุด ดังนั้นจำนวนสามเหลี่ยมที่เป็นไปได้ซึ่งสร้างจากจุด minutiae สามจุดที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน คือ $\binom{m}{3}$ ในกรณีของการแปลงแบบ rigid จะใช้การสร้างสามเหลี่ยม Delaunay [55] ทำให้ได้จำนวนสามเหลี่ยมที่เป็นไปได้คือ m รูป และนำความยาวของด้าน มุมและพื้นที่ของรูปสามเหลี่ยมมาใช้เป็นคุณลักษณะที่ไม่แปรผันสัมบูรณ์ (absolute invariant) เพื่อใช้ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ส่วนในกรณีของการแปลงแบบ affine การสร้างสามเหลี่ยมจะอาศัยหลักการของ convex hull [69-71] ดังนั้นได้จำนวนสามเหลี่ยมที่เป็นไปได้มีจำนวนน้อยกว่า m รูป และใช้อัตราส่วนของพื้นที่ของสามเหลี่ยมเป็นคุณลักษณะที่ไม่แปรผันสัมบูรณ์ และในกรณีของการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะใช้คุณลักษณะที่ไม่แปรผันสัมบูรณ์ของทั้งการแปลงแบบ rigid และ affine มาใช้ร่วมกัน เนื่องจากในภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่มีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ยังคงมีบางบริเวณที่สามเหลี่ยมที่สร้างได้มีการแปลงแบบ rigid และ affine อยู่

11.2 การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือโดยอาศัยจุด minutiae

ขั้นตอนโดยรวมของการจับคู่และการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือแสดงดังภาพที่ 11.1 โดยเริ่มจากการสร้างรูปสามเหลี่ยมจากจุด minutiae ของทั้งภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบและภาพต้นฉบับ และเรียงลำดับสามเหลี่ยมตามพื้นที่จากค่าน้อยไปหาค่ามาก หลังจากผ่านขั้นตอนการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อนี้ จะได้คู่ของสามเหลี่ยมที่สอดคล้องกัน และสามารถนำพิกัดของจุดยอดหรือ minutiae ที่สอดคล้องกันนี้มาคำนวณหาเมตริกซ์การแปลง เพื่อจัดวางภาพที่ต้องการตรวจสอบกับภาพต้นฉบับให้ตรงกัน ท้ายที่สุด จะมีการคำนวณหาค่าความ

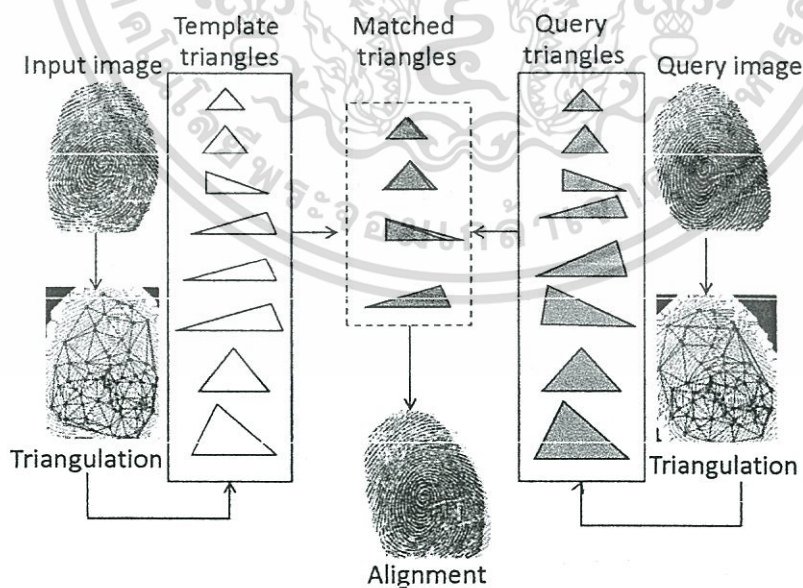
ผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสอง เพื่อนำไปใช้ในการระบุหรือยืนยันตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือต่อไป

11.2.1 การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือในกรณีการแปลงแบบ rigid

กรณีที่พบว่าภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงแบบ rigid คือกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบ ได้มาจากการใช้เครื่องสแกนลายพิมพ์นิ้วมือเครื่องเดียวกันกับที่ใช้สแกนภาพต้นฉบับ โดยภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการหมุนหรือตำแหน่งของภาพต่างจากภาพต้นฉบับ โดยในกรณีนี้จะมีการสร้างสามเหลี่ยม Delaunay จากจุด minutiae ซึ่งมีความไม่แปรผันต่อการแปลงแบบ rigid [55] เพื่อนำมาใช้ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยใช้ความยาวของด้าน มุม และพื้นที่ของสามเหลี่ยมเป็นคุณลักษณะที่ไม่แปรผัน

อัลกอริทึมสำหรับหาสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันจากชุดของสามเหลี่ยมที่ได้จากภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 11.2 มีขั้นตอนดังนี้คือ

- 1) สร้างชุดของรูปสามเหลี่ยม Delaunay จากจุด minutiae ของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ แสดงดังภาพที่ 11.2(a) และ 11.2(g) ตามลำดับ
- 2) เรียงลำดับรูปสามเหลี่ยมตามขนาดพื้นที่โดยเรียงจากค่าน้อยไปหาค่ามาก แสดงดังภาพที่ 11.2(b) และ 11.2(f) ตามลำดับ



ภาพที่ 11.1 ขั้นตอนโดยรวมของการจับคู่และการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) จัดทิศทางของแต่ละรูปสามเหลี่ยมให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน คือ กำหนดด้านที่มีความยาวมากที่สุดเป็นฐานของสามเหลี่ยม และด้านที่ยาวรองลงมาคือด้านที่ติดกับฐานในทิศตามเข็มนาฬิกา รูปสามเหลี่ยมในรูปแบบมาตรฐานของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ แสดงดังภาพที่ 11.2(c) และ 11.2(e) ตามลำดับ
- 4) ใช้อัลกอริทึม list-matching [72], [73] เพื่อหาคู่ของสามเหลี่ยมที่เหมือนกันจากสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ โดยจะหาค่าความแตกต่างของคุณลักษณะของสามเหลี่ยมที่ได้จากภาพที่ต้องการตรวจสอบและที่ได้จากภาพต้นฉบับ โดยเปรียบเทียบทุกคุณลักษณะของภาพที่ต้องการตรวจสอบกับทุกคุณลักษณะที่ได้จากภาพต้นฉบับในลักษณะวน ค่าความแตกต่างของคุณลักษณะสามารถหาได้ตามสมการที่ 11.1

$$\% \varepsilon^2 = \frac{\|F_i - F_j\|^2}{\|F_i\|^2} \times 100 < \xi \quad (11.1)$$

โดยที่ $F_i = F_i(d_1, d_2, d_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, A)$ คือ เวกเตอร์คุณลักษณะของสามเหลี่ยมรูปที่ i ดังแสดงในภาพที่ 11.3 โดยมี d_1, d_2 และ d_3 เป็นความยาวของด้านของสามเหลี่ยม, α_1, α_2 และ α_3 เป็นมุมของสามเหลี่ยม, A เป็นพื้นที่ของสามเหลี่ยม และกำหนดให้ ξ เป็นค่าระดับกัน (threshold) ค่าหนึ่ง

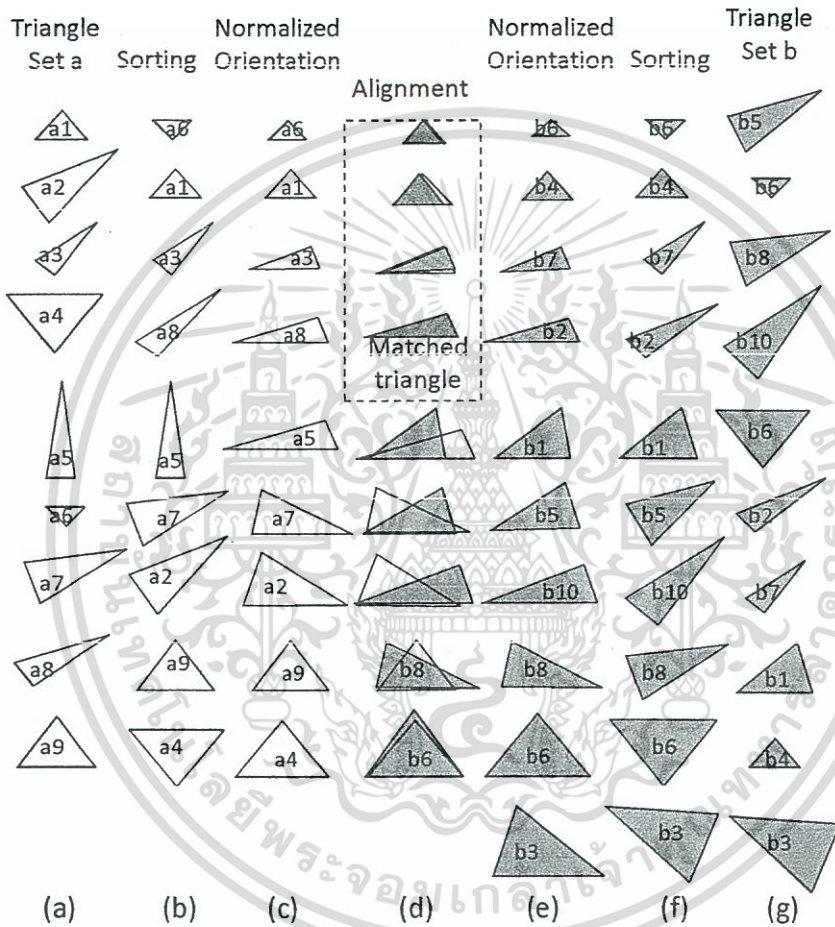
- 5) จากสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กัน (ที่ให้ค่าความแตกต่างน้อยกว่าค่าระดับกัน) ที่อยู่ติดกันซึ่งอาจพบมากกว่าหนึ่งชุด ชุดของคู่สามเหลี่ยมที่จะนำมาใช้คือจำนวนคู่ของสามเหลี่ยมที่ต่อเนื่องกันยาวที่สุด และให้ค่าความแตกต่างเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยคำนวณจาก $\frac{\sum i \% \varepsilon_i^2}{N}$

3.2.2 การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือในกรณีการแปลงแบบ affine

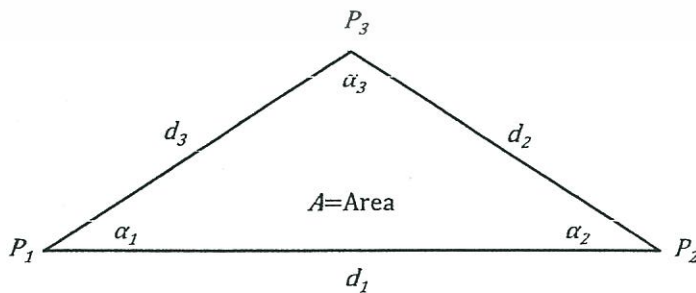
เนื่องจากสามเหลี่ยม Delaunay แปรผันต่อแปลงแบบ affine จึงต้องมีการสร้างสามเหลี่ยมชนิดอื่นโดยอาศัยหลักการ convex hull [69-71] โดยสามเหลี่ยม convex hull จะสร้างจาก minutiae ที่อยู่ใกล้กับตำแหน่ง minutia ที่สนใจมากที่สุด minutiae ที่อยู่โดยรอบหาได้จาก การสร้างสามเหลี่ยมจาก minutiae สองจุดใดๆ กับจุด minutia ที่สนใจ จุดโดยรอบใดที่เป็นส่วนประกอบของสามเหลี่ยมและทำให้ได้พื้นที่สามเหลี่ยมน้อยที่สุด (ไม่นับรวมพื้นที่เล็กผิดปกติ) จะถือว่าจุด minutiae นั้นเป็น minutiae ที่อยู่ใกล้ตำแหน่ง minutiae ที่สนใจมากที่สุด (nearest neighbors) โดยกำหนดให้หาจุดที่อยู่ใกล้ตำแหน่ง minutiae ที่สนใจที่สุดจำนวน N จุด

หลังจากได้ minutiae ที่อยู่โดยรอบใกล้กับตำแหน่ง minutiae ที่สนใจใดๆ จำนวน n จุด สามเหลี่ยม convex hull ที่จะสร้างได้ คือ $\binom{n}{3}$ โดยสามเหลี่ยม convex hull คือ

สามเหลี่ยมที่สามารถสร้างได้ทั้งหมดจากจุดโดยรอบ minutia ที่สนใจ ดังนั้นจำนวนสามเหลี่ยมทั้งหมดที่ได้บนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ คือ $m \cdot \binom{n}{3}$ โดยที่ m คือจำนวน minutiae ทั้งหมดบนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ รูปสามเหลี่ยมทั้งหมดที่ได้ในแต่ละกลุ่มจะถูกนำมาเรียงลำดับตามขนาดพื้นที่เพื่อที่จะนำไปหาคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลงแบบ affine ต่อไป



ภาพที่ 11.2 การจับคู่รูปสามเหลี่ยมในกรณีที่เกิดภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงแบบ rigid



ภาพที่ 11.3 เวกเตอร์คุณลักษณะของรูปสามเหลี่ยม โดยที่ d_1, d_2 และ d_3 เป็นความยาวของด้านของสามเหลี่ยม, α_1, α_2 และ α_3 เป็นมุมของสามเหลี่ยม, A เป็นพื้นที่ของสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบมีการเงื่อนไขของภาพ ภาพที่ได้จะอยู่ในกรณีการแปลงแบบ affine มากกว่าที่จะเป็นการแปลงแบบ rigid ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ด้านและมุมของรูปสามเหลี่ยมมาเป็นคุณลักษณะที่ไม่แปรผันได้อีก แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ของรูปสามเหลี่ยมยังคงเป็นคุณลักษณะที่ไม่แปรผันสัมพัทธ์ (relative invariant) นั่นคือรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับและของภาพที่ต้องการตรวจสอบมีความสัมพันธ์กันด้วยค่า determinant ของเมตริกซ์การแปลงเชิงเส้น T โดยมีฟังก์ชันการแปลงคือ (T, b) โดย b คือเวกเตอร์ของการย้ายตำแหน่ง กำหนดให้พื้นที่ของรูปสามเหลี่ยมที่เรียงลำดับกันของภาพต้นฉบับคือ $[A_a(1), \dots, A_a(n)]$ และพื้นที่ของรูปสามเหลี่ยมที่เรียงลำดับกันของภาพที่ต้องการตรวจสอบคือ $A(k)$ รูปสามเหลี่ยมของทั้งสองภาพที่สอดคล้องกันหรือเป็นคู่กันจะมีความสัมพันธ์กันด้วยความไม่แปรผันสัมพัทธ์

$$A_a(k) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} A(k), k = 1, 2, \dots, n \quad (11.2)$$

โดยที่ $|T|$ คือ determinant ของเมตริกซ์การแปลงเชิงเส้น T เนื่องจากเราไม่ทราบค่าเมตริกซ์การแปลงเชิงเส้น จึงทำการหาความไม่แปรผันต่อ affine สมบูรณ์ (absolute affine invariant) โดยการหาอัตราส่วนของพื้นที่สามเหลี่ยมที่อยู่ติดกันในลำดับที่เรียงจากค่าน้อยไปหาค่ามาก เพื่อตัดค่า determinant ของเมตริกซ์การแปลงเชิงเส้น T ทิ้งออกไป ดังนั้นจะได้ความไม่แปรผันสมบูรณ์แสดงดังสมการที่ 11.3 และ 11.4

$$I_a(k) = \frac{\pm A_a(k)}{|A_a(k+1) \bmod n|} \quad (11.3)$$

และ

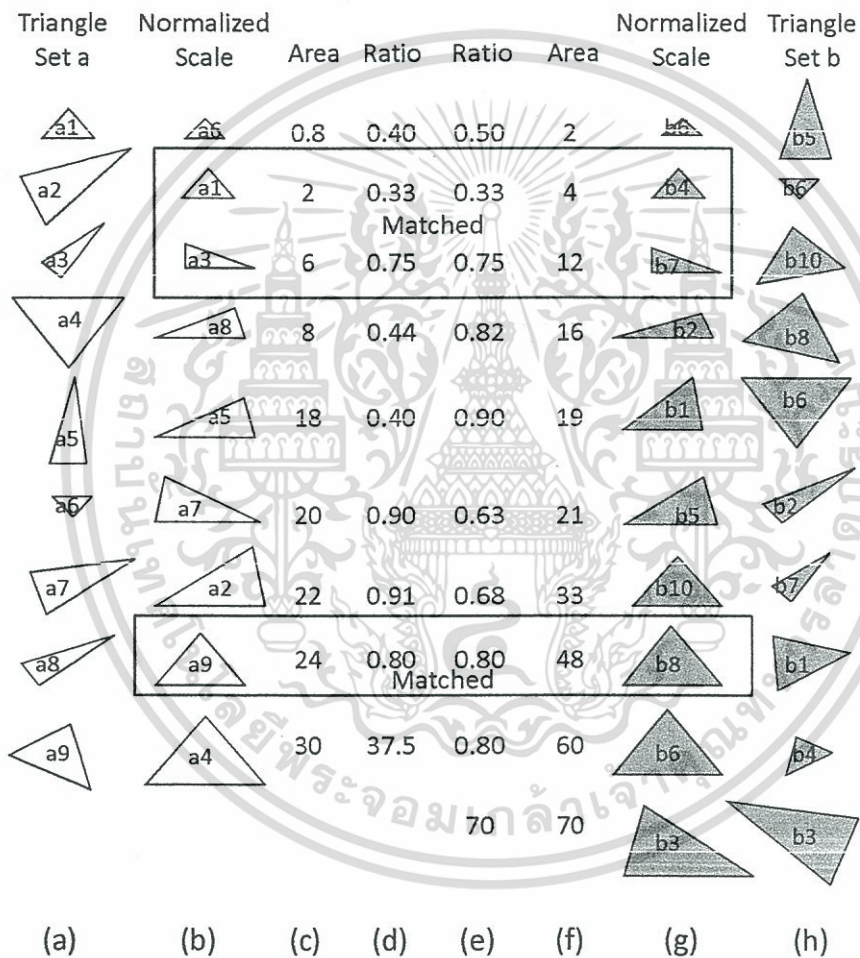
$$I(k) = \frac{\pm A(k)}{|A(k+1) \bmod n|} \quad (11.4)$$

ห้ $k = 1, 2, \dots, n$ ในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบไม่มีสัญญาณรบกวน ค่าความไม่แปรผันสมบูรณ์ของภาพต้นฉบับ จะมีค่าเท่ากับความไม่แปรผันสมบูรณ์ของภาพที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีสัญญาณรบกวน และมีภาพลายพิมพ์นิ้วมือบางส่วนขาดหายไป ยังคงมีคุณลักษณะที่ไม่แปรผันจากทั้งสองภาพที่เป็นคู่กัน โดยกำหนดให้คุณลักษณะที่ไม่แปรผันที่เป็นคู่กันมีค่าความแตกต่างกันไม่เกินค่าระดับกันค่าหนึ่ง โดยในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5% ค่าความแตกต่างของคุณลักษณะที่ไม่แปรผัน ของรูปสามเหลี่ยมที่ได้จากภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบคำนวณได้ตามสมการนี้

$$\%e^2 = \frac{(I(i) - I_a(j))^2}{I(i)^2} \times 100 < \xi \quad (11.5)$$

คู่ของรูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กัน จะตัดสินจากจำนวนคู่ของสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กัน (M) ต่อเนื่องกันยาวที่สุด และให้ค่าความแตกต่างเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยคำนวณจาก $\frac{\sum_i \%e_i^2}{M}$

หลังจากหารูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันได้แล้ว จุดยอดของรูปสามเหลี่ยมจะถูกนำมาใช้ในการหาค่าเมตริกซ์การแปลงแบบ affine อัลกอริทึมสำหรับการจับคู่สามเหลี่ยมที่ได้จากภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบในกรณีที่มีการแปลงแบบ affine แสดงดังภาพที่ 11.4



ภาพที่ 11.4 การจับคู่รูปสามเหลี่ยมของภาพลายพิมพ์นิ้วมือในกรณีที่มีการแปลงแบบ affine; (a) ชุดของรูปสามเหลี่ยมที่ได้จากภาพต้นฉบับ; (b) รูปสามเหลี่ยมซึ่งเรียงลำดับจากพื้นที่น้อยไปมาก; (c) พื้นที่ของ (b); (d) อัตราส่วนของพื้นที่ (c); (h) ชุดของรูปสามเหลี่ยมที่ได้จากภาพที่ต้องการตรวจสอบ; (g) รูปสามเหลี่ยมซึ่งเรียงลำดับจากพื้นที่น้อยไปมาก; (f) พื้นที่ของ (g); (e) อัตราส่วนของพื้นที่ (f); สามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันระหว่าง (d) และ (e) แสดงในกรอบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.2.3 การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือในกรณีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ในขณะที่มีการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือ นิ้วมือที่กดลงบนเซนเซอร์ด้วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอ จะทำให้ได้ภาพลายพิมพ์ที่มีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ ridges และ valleys บนภาพจะมีลักษณะชิดกันหรือห่างกันมากกว่าบนนิ้วมือจริง เนื่องจากการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถประมาณค่าได้จากบางตำแหน่งบนภาพที่มีการแปลงแบบ affine หรือบางตำแหน่งบนภาพที่มีการแปลงแบบ rigid ดังนั้น ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือในกรณีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้ จะทำการหารูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันเฉพาะที่ในบริเวณที่มีการแปลงแบบ rigid หรือการแปลงแบบ affine โดยอาศัยคุณลักษณะของรูปร่างซึ่งนำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.1 ร่วมกับคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลง affine ซึ่งนำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.2 และมีการถ่วงน้ำหนักแต่ละคุณลักษณะตามความเหมาะสม โดยที่การหาคู่ของรูปสามเหลี่ยมเพียง 2-3 คู่ก็สามารถนำมาใช้ในการหาพารามิเตอร์ของการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้

เวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้จากสามเหลี่ยมที่สร้างจากจุด minutiae ประกอบด้วยชนิดของ minutiae, จำนวนของรูปสามเหลี่ยม, รูปสามเหลี่ยมที่อยู่โดยรอบ minutia ที่สนใจ และอัตราส่วนของพื้นที่ของสามเหลี่ยมที่เรียงติดกัน โดยชนิดของ minutiae ที่ใช้มี 2 ชนิด คือ จุดสิ้นสุด (ending) และ จุดแยก (bifurcation) การจับคู่เวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้กล่าวไปแล้ว ทำได้โดยหาความเหมือนระหว่างคุณลักษณะที่แสดงรูปร่างและขนาดของรูปสามเหลี่ยม ดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.1 ร่วมกับคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลง affine ซึ่งก็คืออัตราส่วนของพื้นที่สามเหลี่ยมดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.2 อัลกอริทึมประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

- 1) หาเวกเตอร์คุณลักษณะจากภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับนิ้ว นั่นคือ ที่จุด minutia จุดใดๆ ที่สนใจ ทำการสร้างรูปสามเหลี่ยม convex hull ตามวิธีการในหัวข้อที่ 11.2.2 ซึ่งเป็นการสร้างสามเหลี่ยมจากจุด minutiae จำนวน N จุด ที่อยู่โดยรอบ minutia ที่สนใจ โดยที่ minutiae ที่อยู่โดยรอบนี้เป็น minutiae ที่อยู่ใกล้ที่สุด และทำให้ได้พื้นที่สามเหลี่ยมน้อยที่สุดเมื่อมีการสร้างสามเหลี่ยมจาก minutia ที่สนใจกับ minutiae ที่อยู่โดยรอบ การสร้างสามเหลี่ยม convex hull นี้ จุด minutia ที่สนใจ จะไม่ถูกนำไปสร้างสามเหลี่ยม convex hull ด้วย ดังนั้น เวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้ต่อหนึ่งจุดของ minutia ที่สนใจ จะเท่ากับ $\binom{n}{3}$ รูป โดยเวกเตอร์คุณลักษณะนี้ ประกอบด้วยชนิดของ minutiae, จำนวนของรูปสามเหลี่ยมอยู่โดยรอบ minutia ที่สนใจ และอัตราส่วนของพื้นที่ของสามเหลี่ยมที่เรียงติดกันซึ่งอยู่โดยรอบจุด minutia เดียวกัน ภาพที่ 11.5(a) แสดงตัวอย่างเวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้จากภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับนิ้ว
- 2) หาเวกเตอร์คุณลักษณะจากภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบ แสดงดังภาพที่ 11.5(b)
- 3) ที่จุด minutia ใดๆ ของภาพที่ต้องการตรวจสอบ ทำการหา minutia ของภาพต้นฉบับที่เป็นคู่กัน โดยหาจากค่าความเหมือน (similarity) ระหว่างเวกเตอร์คุณลักษณะระหว่างภาพที่ต้องการตรวจสอบกับภาพต้นฉบับ ซึ่งค่าความเหมือนคำนวณได้จาก $S = 1/E$ โดยที่ E คำนวณได้จาก

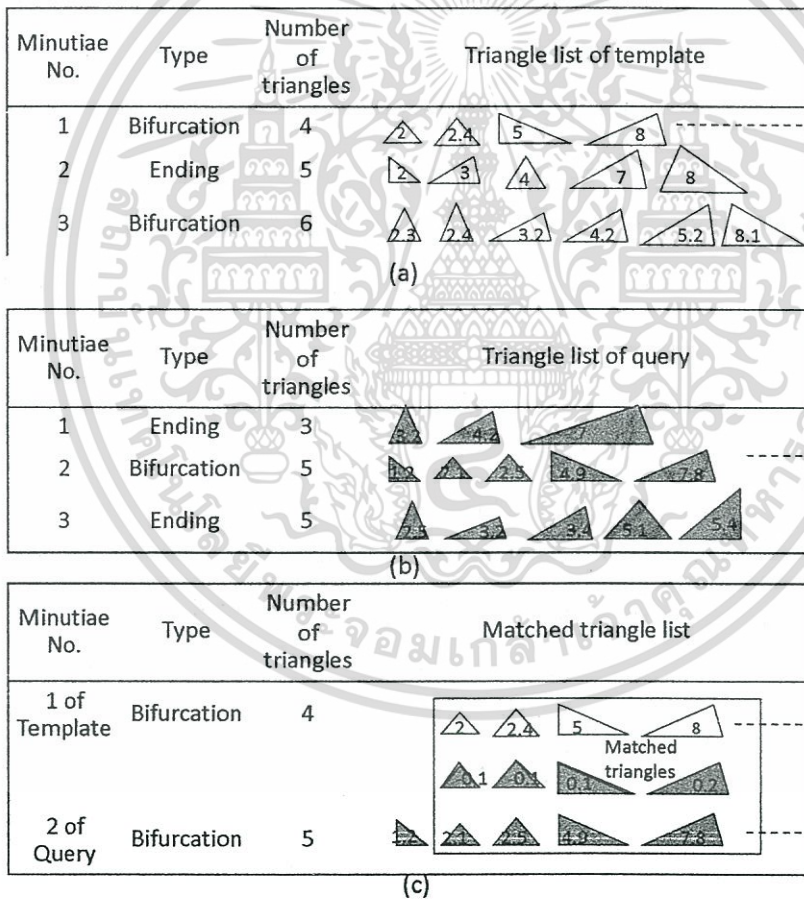
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการดังนี้

$$E = \alpha \frac{\sum_i \%e_i^2}{N} + (1 - \alpha) \frac{\sum_i \%e_i^2}{M} \tag{11.6}$$

โดยที่ α คือแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก มีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq \alpha \leq 1$ โดยค่าของ α หาได้จากสัดส่วนของ $\frac{N}{N+M}$ โดยที่ N และ M คือจำนวนของสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันและอยู่ติดกันยาวที่สุด, $\%e_i^2$ และ $\%e_i^2$ คำนวณได้จากสมการที่ (11.1) และ (11.5) คู่ของเวกเตอร์คุณลักษณะที่มีค่าความต่างกันไม่เกิน ค่าระดับกันที่กำหนด จะตัดสินว่าเป็นสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กัน โดยกำหนดให้ค่าระดับกันเท่ากับ 5%

4) จุด minutiae ที่สอดคล้องเป็นคู่กัน จะถูกนำไปหาเมตริกซ์การแปลง แล้วแปลงภาพที่ต้องการตรวจสอบ เพื่อจัดวางให้อยู่ในพิกัดเดียวกับภาพต้นฉบับ หรือภาพที่ถูกเลือก (candidate)



ภาพที่ 11.5 การจับคู่สามเหลี่ยมในกรณีที่มีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (a) เวกเตอร์คุณลักษณะของภาพต้นฉบับ (b) เวกเตอร์คุณลักษณะของภาพที่ต้องการตรวจสอบ (c) ขั้นตอนการหา minutia ที่เป็นคู่กัน จากรูปแสดงการเปรียบเทียบเวกเตอร์คุณลักษณะของจุด minutia ที่หนึ่งของภาพต้นฉบับกับจุด minutia ที่สองของภาพที่ต้องการตรวจสอบ คู่ของสามเหลี่ยมที่ได้แสดงในกรอบสี่เหลี่ยม ตัวเลขที่ระบุในรูปสามเหลี่ยมคือค่าความไม่แปรผันสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.3 การตรวจสอบและการระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

หลังจากการจัดวางหรือแปลงภาพที่ต้องการตรวจสอบ ให้อยู่ในพิกัดเดียวกับภาพต้นฉบับ (กรณีการตรวจสอบภาพลายพิมพ์นิ้วมือ) หรือภาพที่ถูกเลือก (กรณีระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ) แล้ว จะมีการหาจุด minutiae บนภาพต้นฉบับหรือภาพที่ถูกเลือกที่อยู่ใกล้ที่สุดกับจุด minutiae บนภาพที่ต้องการตรวจสอบที่แปลงมา การหาจุดที่อยู่ใกล้ที่สุด และหาระยะระหว่างจุดที่สอดคล้องกันนี้ จะหาโดยวิธี distance map ทำให้ได้ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด minutiae ที่สอดคล้องกันทั้งหมด (average distance map error) บนภาพทั้งสอง ในการระบุตัวบุคคล ที่มี candidates จำนวนมากกว่าหนึ่งนิ้ว (คน) การเปรียบเทียบภาพที่ต้องการตรวจสอบและภาพที่ถูกเลือก ที่ให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยที่สุด จะได้ว่า ภาพที่ต้องการตรวจสอบมาจากนิ้วนั้นหรือคนนั้นที่ถูกเลือกมา (candidate) ส่วนในการยืนยันตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ภาพที่ต้องการตรวจสอบจะมาจากริ้วเดียวกับภาพต้นฉบับ ก็ต่อเมื่อค่าผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าค่าระดับกันที่กำหนด

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้คุณลักษณะของลายพิมพ์นิ้วมือภายในรูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันร่วมกับการหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด เพื่อใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยคุณลักษณะภายในรูปสามเหลี่ยม หาได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทางกระทำกับเส้นลายพิมพ์นิ้วมือภายในรูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันของภาพที่ถูกแปลงมาและภาพต้นฉบับ (หรือภาพที่ถูกเลือกมา) การฟิลเตอร์ภาพแบบหลายทิศทาง ริเริ่มโดย Bamberger and Smith [74] ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการประมวลผลภาพที่มีลักษณะเป็นทิศทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นการวิเคราะห์วัตถุหรือตัวอักษร การแยกองค์ประกอบ การกำจัดสัญญาณรบกวน การแยกส่วนและการปรับปรุงภาพ การรับรู้ระยะไกล และการวิเคราะห์ข้อมูล [75] เหตุผลที่การฟิลเตอร์แบบหลายทิศทางเหมาะสมในการนำมาใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ คือ 1) ภาพลายพิมพ์นิ้วมือประกอบด้วยพื้นหน้าและพื้นหลังเท่านั้น นั่นคือ ridges และ valleys 2) ภาพลายพิมพ์มีลักษณะเป็นทิศทางในตัวเอง

บทที่ 12

คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง ที่นำมาใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

ในบทนี้ เป็นการอธิบายการหาคุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง (directional filter bank: DFB) และการนำคุณลักษณะที่ได้ไปใช้ร่วมกับค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด minutiae เพื่อใช้ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 11.3 แนวคิดในการนำคุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทางมาใช้ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ถูกนำเสนอโดย Jain และคณะ [63] ซึ่งจะมีการหาจุดอ้างอิงบนภาพลายพิมพ์นิ้วมือก่อน เรียกว่า singular point จากนั้นทำการแบ่งพื้นที่บริเวณที่สนใจออกเป็น ส่วนๆ โดยรอบจุดอ้างอิง บริเวณที่สนใจจะถูกฟิลเตอร์ด้วยฟิลเตอร์ที่มีทิศทางต่างกันทั้งหมดแปดทิศ เรียกว่าฟิลเตอร์ Gabor ดังนั้นในแต่ละส่วนที่สนใจจะประกอบเวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของค่าระดับเทา

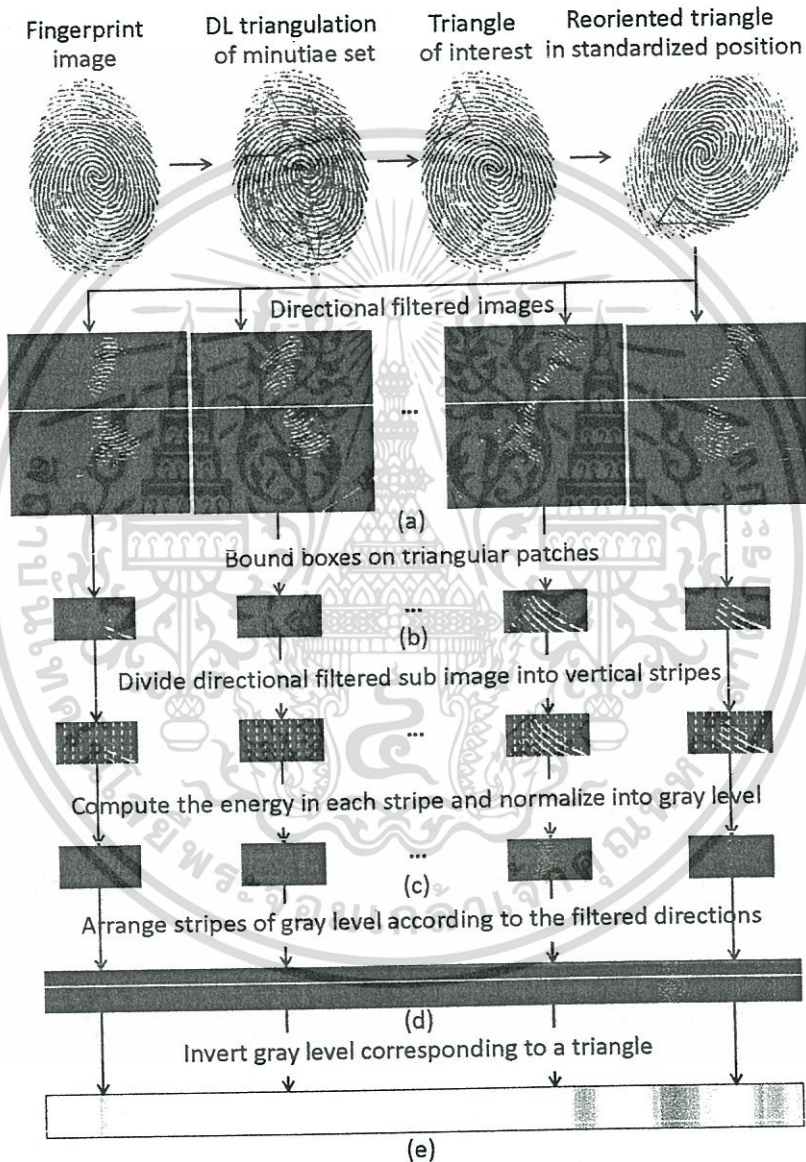
ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอคุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทางโดยไม่ต้องกำหนดจุดอ้างอิงก่อน แต่เป็นการฟิลเตอร์เส้นลายพิมพ์นิ้วมือภายในรูปสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นจาก minutiae

12.1 การหาคุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง

พิจารณาคู่ของรูปสามเหลี่ยมใดๆ ที่ได้จากการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ลายพิมพ์นิ้วมือภายในรูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันจะถูกฟิลเตอร์แบบ 8 ทิศ ทำให้ได้ภาพลายพิมพ์นิ้วมือเป็นภาพไบนารีที่สอดคล้องกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ทิศทางต่างๆ แสดงดังภาพที่ 12.1(a) ซึ่งแสดงภาพไบนารีของภาพที่ต้องการตรวจสอบ หลังจากนั้นจะกำหนดให้สามเหลี่ยมย่อยที่ได้จากการฟิลเตอร์ในแต่ละทิศ อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมทำให้ได้ภาพย่อย 8 รูปจากรูปสามเหลี่ยมหนึ่งรูป แสดงดังภาพที่ 12.1(b) ภาพย่อยที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 20 แถบในแนวตั้ง โดยในแต่ละแถบจะมีการคำนวณค่าพลังงานและนอร์มอลไลซ์ไปเป็นค่าระดับเทา ค่าระดับเทาที่ได้จะกลายเป็นค่าระดับเทาของแต่ละแถบ แสดงดังภาพที่ 12.1(c) ดังนั้นจะได้เวกเตอร์คุณลักษณะของรูปสามเหลี่ยมใดๆ โดยการรวมแถบค่าระดับเทาที่ได้เข้าด้วยกัน เรียกว่า เวกเตอร์คุณลักษณะจาก DFB ชั้นปฐมภูมิ แสดงดังภาพที่ 12.1(d) นอกจากนี้ เพื่อให้การมองเห็นแถบระดับเทาชัดเจนมากขึ้น จึงมีการแปลงกลับภาพระดับเทาที่ได้

ของคุณลักษณะชั้นปฐมภูมิ แสดงในภาพที่ 12.1(e) หลังจากนั้น ทำการค้นหาเวกเตอร์คุณลักษณะ เช่นเดียวกันนี้จากรูปสามเหลี่ยมที่สอดคล้องกันของภาพต้นฉบับ (ภาพที่ถูกเลือก)

หลังจากนั้น นำคุณลักษณะที่ได้จากวิธี DFB ของสามเหลี่ยมทั้งภาพลายพิมพ์นิ้วมือมา รวมกันนั้นคือคุณลักษณะปฐมภูมิที่ได้จากแต่ละสามเหลี่ยมจะถูกเรียงลำดับตามพื้นที่ของสามเหลี่ยม



ภาพที่ 12.1 คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง (DFB) (a) ภาพไบนารีที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์ที่ทิศทางต่างๆ (b) สามเหลี่ยมย่อยที่ได้จากการฟิลเตอร์ในแต่ละทิศ อยู่ภายในกรอบสี่เหลี่ยม (c) ภาพย่อยที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 20 แถบในแนวตั้ง (d) เวกเตอร์คุณลักษณะจาก DFB ชั้นปฐมภูมิ (e) การแปลงกลับภาพระดับเทาของคุณลักษณะชั้นปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อยู่รอบจุด minutia ใดๆ ที่สนใจ ทำให้ได้คุณลักษณะจาก DFB ชั้นทุติยภูมิ และจากนั้นทำการรวมคุณลักษณะชั้นทุติยภูมิ ตามชนิดของ minutiae ที่สนใจ (จุดสิ้นสุดและจุดแยก) จะได้คุณลักษณะจาก DFB ชั้นตติยภูมิ แสดงดังภาพที่ 12.2

12.2 การจับคู่เวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง

หลังจากที่มีการหาเวกเตอร์คุณลักษณะที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แบบหลายทิศทาง (DFB) จากรูปสามเหลี่ยมของภาพที่ต้องการตรวจสอบ (ที่ถูกแปลงมาให้อยู่ในพิกัดเดียวกับภาพต้นฉบับหรือภาพที่ถูกเลือก) การตัดสินใจคู่ของสามเหลี่ยมที่ได้จากภาพที่ต้องการตรวจสอบกับภาพที่ถูกเลือก เป็นสามเหลี่ยมที่สร้างจากจุด minutia เดียวกันหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากฟังก์ชันความแตกต่างของคุณลักษณะ DFB (E_{DFB}) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการดังนี้

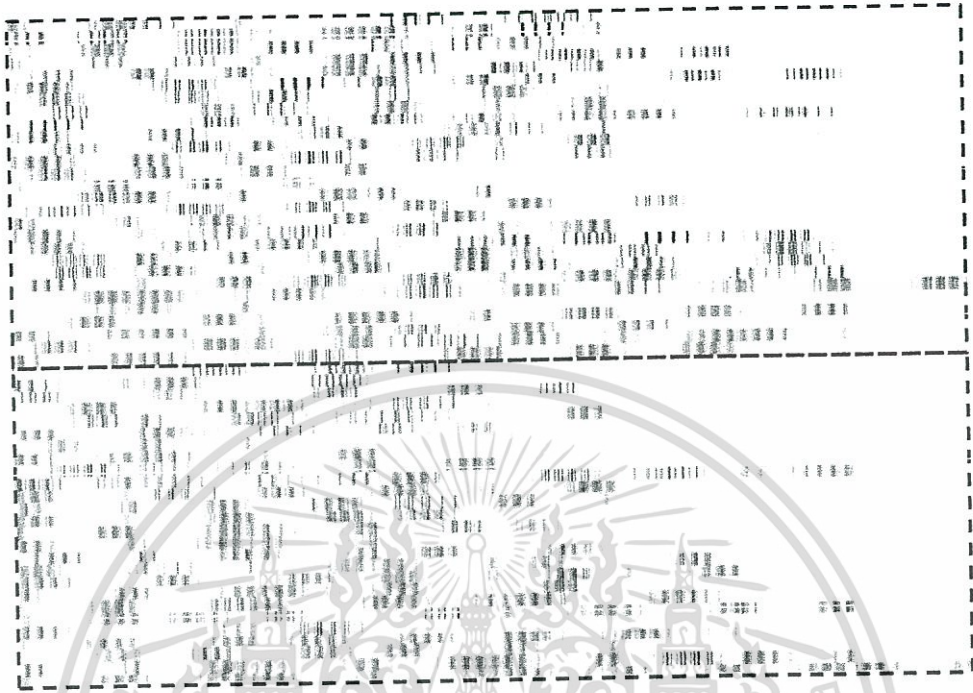
$$E_{DFB} = \frac{\sum_i \sum_j (S_c(i,j) - S_q(i,j))^2}{\sum_i \sum_j S_c^2(i,j)} \times 100 \quad (12.7)$$

โดยที่ S_c และ S_q คือแถบของคุณลักษณะ DFB ตามภาพที่ 12.1(e) ของรูปสามเหลี่ยมที่ (i,j) ใดๆ ที่สอดคล้องกันระหว่างภาพที่ถูกเลือก และภาพที่ต้องการตรวจสอบตามลำดับ โดยที่ผลรวมเป็นการหาผลรวมของค่าความแตกต่างของรูปสามเหลี่ยมทุกคู่ที่สอดคล้องกัน

ดังนั้น การนำการหาความแตกต่างของคุณลักษณะที่ได้จากวิธี DFB มาใช้ร่วมกับการหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด ทำให้ได้สมการหาค่าความแตกต่างแสดงดังสมการที่ 12.8 เพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

$$\tilde{E} = \beta E_{DFB} + (1 - \beta) E_{MAP} \quad (12.8)$$

โดยที่ β คือ แฟคเตอร์ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยอาจมีค่าเท่ากับ, มากกว่า หรือน้อยกว่า 0.5 ขึ้นกับว่าต้องการให้ค่าความผิดพลาดใดมีน้ำหนักมากกว่ากัน



ภาพที่ 12.2 DFB ชั้นตติยภูมิ โดยแต่ละแถวแนวนอนคือ คุณลักษณะจาก DFB ชั้นทุติยภูมิ และภายในรูปสี่เหลี่ยมประดับบนคือ DFB ชั้นตติยภูมิที่สอดคล้องกับ minutiae ที่สนใจนิตจุดแยกด้านล่างคือ DFB ชั้นตติยภูมิที่สอดคล้องกับ minutiae ที่สนใจนิตจุดสิ้นสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 13

วิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัย การยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

การดำเนินการวิจัยและผลการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ 1) การลงทะเบียนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยการจับคู่ของจุด minutiae ที่ได้นำเสนอไปข้างต้น โดยจะแสดงผลของการจับคู่ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid, affine, การแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และภาพที่มีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (occlusion) 2) การยืนยันภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่นำเสนอไป และการหาค่าความแตกต่างโดยอาศัยคุณลักษณะที่ได้จากวิธี DFB มาใช้ร่วมกับการหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด โดยทำการทดลองกับฐานข้อมูลของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เก็บมา

13.1 การลงทะเบียนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยการจับคู่ของจุด minutiae

ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ใช้ในการทดลองส่วนนี้ เป็นภาพลายพิมพ์ของนิ้วหัวแม่มือที่ได้จากเครื่องสแกนลายพิมพ์นิ้วมือ รุ่น L SCAN 100R โดยมีความละเอียดเท่ากับ 500 พิกเซลต่อนิ้ว (pixels per inch: ppi) เพื่อให้ได้ภาพที่มีการแปลงทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ได้จะผ่านกระบวนการประมวลผลภาพเพื่อหาตำแหน่งของ minutiae ก่อนที่จะทำการสร้างรูปสามเหลี่ยม ขั้นตอนการประมวลผลภาพประกอบด้วย การนอร์มอลไลซ์ภาพ การฟิลเตอร์ภาพ การหาโครงร่างของลายพิมพ์นิ้วมือ และการหาตำแหน่งของ minutiae โดยชนิดของ minutiae ที่นำมาใช้คือ จุดสิ้นสุด (ending) และจุดแยก (bifurcation)

การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ จะดำเนินการตามขั้นตอนการจับคู่ของรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 11.2 โดยหลังจากที่หาคู่ของสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันได้แล้ว จุดยอดของรูปสามเหลี่ยม ซึ่งคือ minutiae ที่สอดคล้องกันจะถูกนำมาหาค่าพารามิเตอร์ของการแปลงเพื่อนำไปใช้ในการลงทะเบียนภาพและจัดวางภาพที่ต้องการตรวจสอบให้ตรงกับภาพต้นฉบับ โดยมีการแสดงผลการหาคู่ของรูปสามเหลี่ยมและการจัดวางภาพ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid, affine, การแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และภาพที่มีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (occlusion)

13.1.1 ผลการจับคู่รูปสามเหลี่ยมในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid คู่ของรูปสามเหลี่ยมระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ที่ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการจับคู่ที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.1 แสดงดังภาพที่ 13.1(a) และ 13.1(b) ตามลำดับ ภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองก่อนและหลังการจัดวางให้ตรงกัน แสดงดังภาพที่ 13.2(a) และ 13.2(b) ตามลำดับ นอกจากนี้ มีการหาค่าความผิดพลาดของการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือ จากค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่าง minutiae ที่อยู่ใกล้กันที่สุด (distance map error) ระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ถูกแปลงมา การหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนการจัดวางภาพทำได้โดย การจัดวางจุดศูนย์กลางของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน โดยคำนวณหาจุดศูนย์กลางของภาพลายพิมพ์นิ้วมือได้จาก ridges ทั้งหมด จากนั้นคำนวณระยะห่างเฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง minutiae ทั้งหมด ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการทดสอบ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพทั้งสองแสดงดังตารางที่ 13.1 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางภาพทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.864% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ

13.1.2 ผลการจับคู่รูปสามเหลี่ยมในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine การหาของรูปสามเหลี่ยมจะอาศัยคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลงแบบ affine ซึ่งได้มาจากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก convex hull ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 11.2.2 รูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 13.3(a) และ (b) ตามลำดับ การจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองให้ตรงกันแสดงดังภาพที่ 13.4 หลังการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองให้ตรงกัน ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่าง minutiae ที่อยู่ใกล้กันที่สุด ระหว่างทั้งสองภาพก่อนและหลังการจัดวางภาพแสดงดังตารางที่ 13.2 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางมีค่าเท่ากับ 2.575% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ



ภาพที่ 13.1 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid



ภาพที่ 13.2 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid

ตารางที่ 13.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.041	0.018
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	4.349	1.864



ภาพที่ 13.3 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

ภาพที่ 13.4 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine

ตารางที่ 13.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ
ความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.084	0.015
ความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	14.872	2.575

13.1.3 ผลการจับคู่สามเหลี่ยมกรณีภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ในขณะที่มีการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือ นิ้วมือที่ตกลงบนเซนเซอร์ด้วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอ จะทำให้ได้ภาพลายพิมพ์ที่มีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ ridges และ valleys บนภาพจะมีลักษณะชิดกันหรือห่างกันมากกว่าบนนิ้วมือจริง การจับคู่สามเหลี่ยมกระทำโดยอาศัยคุณลักษณะที่แสดงรูปร่างและขนาดของรูปสามเหลี่ยมร่วมกับคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลง affine ดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.3 รูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 13.5(a) และ (b) การจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองให้ตรงกันแสดงดังภาพที่ 13.6 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่าง minutiae ที่อยู่ใกล้กันที่สุด ระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ต้องการตรวจสอบก่อนและหลังการจัดวางภาพแสดงดังตารางที่ 13.3 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางภาพทั้งสองมีค่าเท่ากับ 4.327% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

ภาพที่ 13.5 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น



(a)



(b)

ภาพที่ 13.6 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 13.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.075	0.038
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	8.672	4.327

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.1.4 ผลการจับคู่สามเหลี่ยมในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (occlusion)

ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป คู่ของรูปสามเหลี่ยมที่หาได้จากวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือตามหัวข้อที่ 11.2.1 แสดงดังภาพที่ 13.7 นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีการจับคู่โดยอาศัยคุณลักษณะร่วมตามหัวข้อที่ 11.2.3 เพื่อหาคู่ของรูปสามเหลี่ยม โดยผลการจับคู่แสดงดังภาพที่ 13.8 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางภาพทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.397% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ แสดงดังตารางที่ 13.4



ภาพที่ 13.7 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับนิ้วและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป ซึ่งได้จากการจับคู่โดยอาศัยคุณลักษณะที่แสดงรูปร่างและขนาดของรูปสามเหลี่ยม



ภาพที่ 13.8 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับนิ้วและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป ซึ่งได้จากการจับคู่โดยอาศัยคุณลักษณะร่วม ตามหัวข้อที่ 11.2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13.4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ	
		การจับคู่โดยอาศัย คุณลักษณะรูปร่างและ ขนาดของสามเหลี่ยม	การจับคู่โดยอาศัย คุณลักษณะร่วม
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.048	0.011	0.010
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	6.337	1.397	1.346

13.2 การยืนยันตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยคุณลักษณะที่ร่วมซึ่งได้จากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae

ฐานข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย ได้มาจากการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือของ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และนักศึกษาสาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จำนวน 40 คน โดยมีอายุอยู่ในช่วง 20-30 ปี และ 60% ของนักศึกษาเป็นผู้หญิง ในแต่ละคนจะมีการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือจากทั้งหมด 6 นิ้ว ได้แก่ นิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลางของทั้งมือขวาและมือซ้าย โดยในแต่ละนิ้วมือจะมีการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งหมด 7 ท่าทาง นั่นคือ 1) ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับ โดยจะกำหนดให้วางนิ้วมือในแนวตั้งตรงและตั้งฉากกับเซนเซอร์ด้วยแรงกดปกติ 2) ภาพที่ได้จากการกดของนิ้วเบาๆ 3) ภาพที่บางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป 4) และ 5) ภาพที่ได้จากการกลิ้งนิ้วมือไปทางด้านข้าง (lateral roll) พร้อมกับแรงกดนิ้ว 6) และ 7) ภาพที่ได้จากการเอียงนิ้วมือ พร้อมกับแรงกดนิ้วโดยที่นิ้วมือเอียงอย่างอิสระ ด้วยมุมที่มากกว่าหรือเท่ากับ ± 45 องศา กระทำกับแนวตั้งของเซนเซอร์ ตัวอย่างภาพลายพิมพ์นิ้วมือแต่ละท่าทางแสดงดังภาพที่ 13.9 โดยขณะที่เก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ไม่ได้มีการทำความสะอาดเซนเซอร์เพลตอย่างมีระบบ จากภาพลายพิมพ์นิ้วมือในฐานข้อมูล มีทั้งภาพที่ได้จากนิ้วมือที่แห้งและชื้นเนื่องจากเหงื่อ ทำให้มีภาพรบกวนบนภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ได้

ดังนั้น จะได้ฐานข้อมูลที่ประกอบด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งหมด 1680 (40 x 6 x 7) ภาพที่เก็บได้จากนิ้วมือ 240 นิ้ว โดยที่แต่ละภาพมีขนาด 620 x 620 พิกเซล ฐานข้อมูลนี้จะถูกนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ จากฐานข้อมูลจะได้ว่า จำนวนคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นคู่กันจริง (genuine matches) มีค่าเท่ากับ 5,040 คู่ (คำนวณได้จาก คู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นไปได้ 21 คู่จากนิ้วเดียวกัน x 6 นิ้วมือต่อคน x 40 คน = 5,040) จำนวนคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ไม่ได้เป็นคู่กัน (impostor matches) มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 28,680 คู่ (คำนวณได้จาก การเปรียบเทียบภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับจากนิ้วที่แตกต่างกัน จำนวนคู่ที่เป็นไปได้คือ $(240 \times 239) / 2 = 28,680$)

ในการยืนยันภาพลายพิมพ์นิ้วมือ การจับคู่ภาพกระทำโดยการจับคู่ของรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae โดยอาศัยคุณลักษณะร่วมที่ไม่แปรผันสัมบูรณ์ ตามที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.3 ถ้าสามารถหาคู่ของสามเหลี่ยมระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ต้องการตรวจสอบได้ ภาพที่ต้องการตรวจสอบจะถูกแปลงให้อยู่ในตำแหน่งที่สอดคล้องกับภาพต้นฉบับ โดยใช้พารามิเตอร์การแปลงที่คำนวณได้จาก minutiae ที่สอดคล้องเป็นคู่กัน จากนั้นทำการหาค่าความผิดพลาดรวม (\bar{E}) ที่นำเสนอในหัวข้อที่ 12.2 ซึ่งหาได้จากค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุดและค่าความแตกต่าง



ภาพที่ 13.9 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้ง 7 ท่าทาง (a) ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับ โดยจะกำหนดให้วางนิ้วมือในแนวตั้งตรงและตั้งฉากกับเซนเซอร์ด้วยแรงกดปกติ (b) ภาพที่ได้จากการกดของนิ้วเบาๆ (c) ภาพที่บางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (d) และ (e) ภาพที่ได้จากการกลิ้งนิ้วมือไปทางด้านข้าง (lateral roll) พร้อมกับแรงกดนิ้ว (f) และ (g) ภาพที่ได้จากการเอียงนิ้วมือ พร้อมกับแรงกดนิ้ว โดยที่นิ้วมือเอียงอย่างอิสระ ด้วยมุมที่มากกว่าหรือเท่ากับ ± 45 องศา กระทำกับแนวตั้งของเซนเซอร์

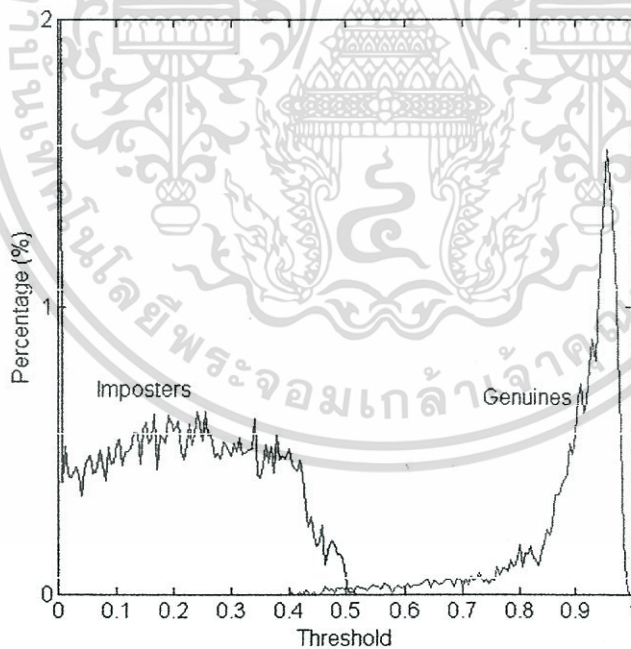
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณลักษณะที่ได้จากวิธี DFB โดยที่แต่ละค่าความผิดพลาดจะถ่วงน้ำหนักด้วยค่าแฟกเตอร์เท่ากับ 0.5 ท้ายที่สุดจะมีการแปลงค่าความผิดพลาดรวมไปเป็นคะแนนการจับคู่ (matching score) แสดงดังสมการที่ 13.1

$$\tilde{S} = 1 - (\tilde{E}/100) \quad (13.1)$$

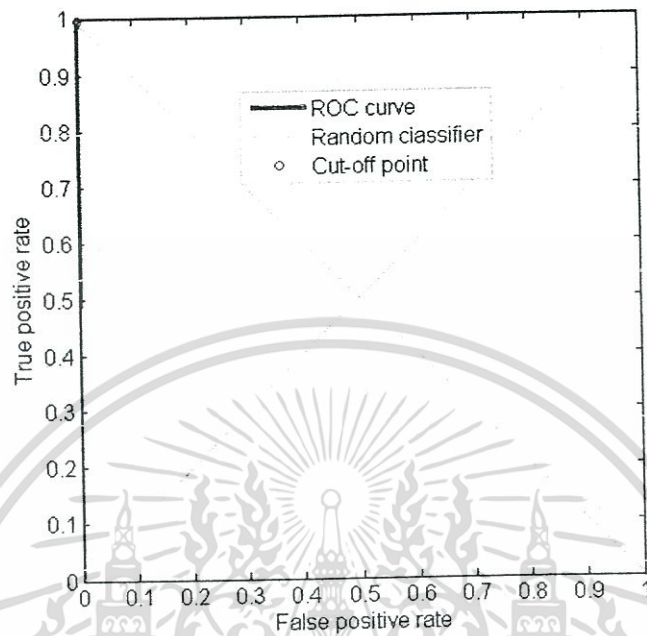
โดยที่ \tilde{S} คือ คะแนนการจับคู่ และ \tilde{E} คือ ค่าความผิดพลาดรวม ซึ่งคำนวณได้สมการที่ 11.8

หลังจากนั้น นำคะแนนการจับคู่ที่ได้จากการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นคู่กันจริง และที่ได้จากการจับคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ไม่ได้เป็นคู่กัน มาสร้างฮิสโตแกรมการกระจายของคะแนนการจับคู่ แสดงดังภาพที่ 13.10 จากการกระจายที่ได้ สามารถสร้างกราฟ ROC (receiver operating characteristic) ดังภาพที่ 13.11 และภาพขยายของกราฟ ROC แสดงดังภาพที่ 13.12 พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่ากับ 0.99967 จากภาพที่ 13.10 พบว่าค่าระดับกัน (ที่ฮิสโตแกรมทั้งสองตัดกัน) ของ Bayesian classifier เท่ากับ 0.505 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเฉลี่ย (average probability of error) ที่ค่าระดับกันนี้ มีค่าเท่ากับ 0.713%

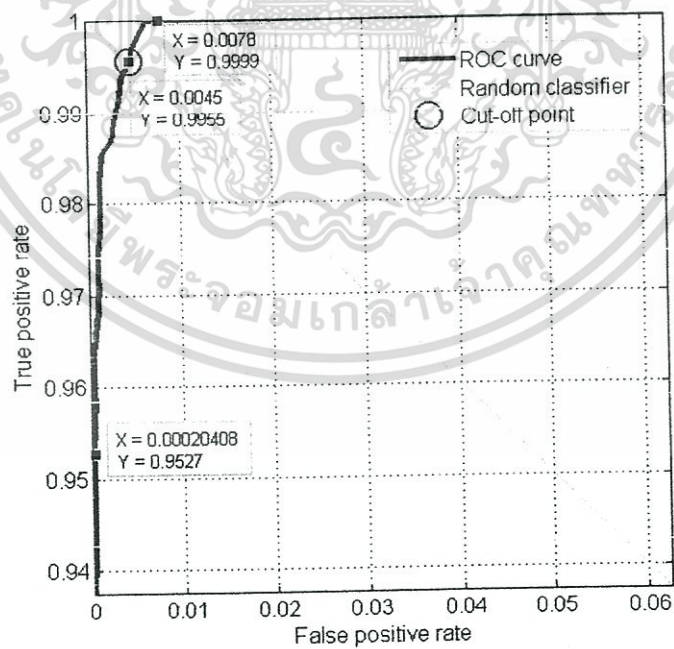


ภาพที่ 13.10 ฮิสโตแกรมการกระจายของคะแนนการจับคู่ ของคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นคู่กันจริง และคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ไม่ได้เป็นคู่กัน แกนนอนคือค่าระดับกันของคะแนนการจับคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



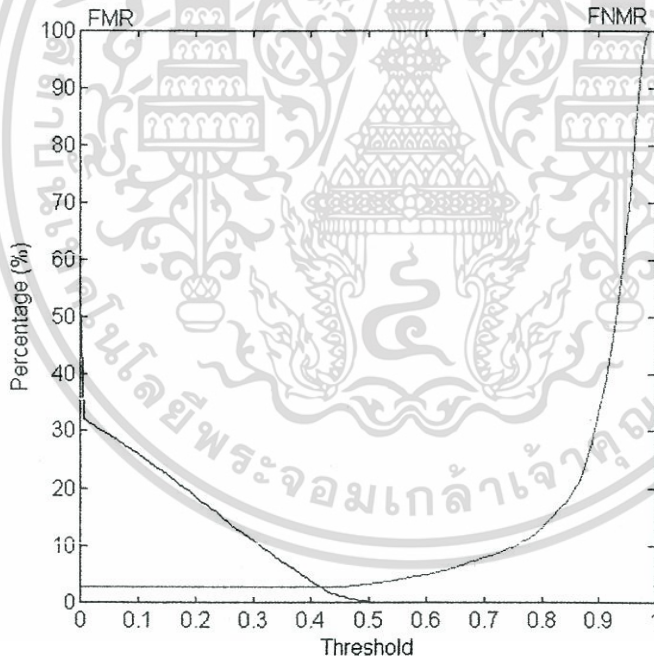
ภาพที่ 13.11 กราฟ ROC (receiver operating characteristic) เครื่องหมายวงกลมแสดงตำแหน่งของเส้นแบ่งที่ตัดกับกราฟ



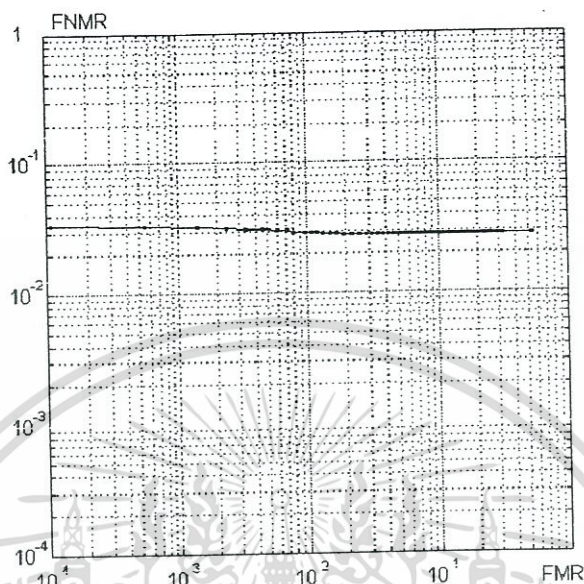
ภาพที่ 13.12 ภาพขยายของกราฟ ROC รูปสี่เหลี่ยมที่บภายในวงกลมแสดงตำแหน่งของเส้นแบ่งที่ตัดกับกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจับคู่ภาพถ่ายลายพิมพ์นิ้วมือที่นำเสนอตามวิธีการประเมินที่กำหนดไว้ใน Fingerprint Verification Competition (FVC) [29] ผลที่ได้ประกอบด้วย กราฟ False Match Rate (FMR) และ False Non-Match Rate (FNMR) ที่แสดงความผิดพลาดของอัลกอริทึมการจับคู่ที่ค่าระดับกันต่างๆ จาก 0 ถึง 1 แสดงดังภาพที่ 13.13 โดยที่ False Match Rate (FMR) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการจับคู่ภาพถ่ายลายพิมพ์นิ้วมือที่มาจากคนละนิ้ว แต่อัลกอริทึมให้ผลว่ามาจากนิ้วเดียวกัน ส่วน False Non-Match Rate (FNMR) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการจับคู่ภาพถ่ายลายพิมพ์นิ้วมือที่มาจากนิ้วเดียวกัน แต่อัลกอริทึมให้ผลว่าภาพทั้งสองมาจากคนละนิ้วกัน จากกราฟได้ค่าอัตราความผิดพลาดเฉลี่ยสมดุล (Equal Error Rate: ERR) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ $2.68 \pm 0.18\%$ โดยถือว่าการจับคู่ภาพถ่ายลายพิมพ์นิ้วมือแต่ละคู่ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน [77], [78] โดยที่ค่าระดับกันที่จุด EER มีค่าเท่ากับ 0.420 กราฟที่พล็อตระหว่าง FMR และ FNMR เรียกว่า Detection-Error Tradeoff (DET) curve แสดงดังภาพที่ 13.14



ภาพที่ 13.13 กราฟ False Match Rate (FMR) และ False Non-Match Rate (FNMR) ที่แสดงความผิดพลาดของอัลกอริทึมการจับคู่ที่ค่าระดับกันต่างๆ จาก 0 ถึง 1



ภาพที่ 13.14 กราฟที่พล็อตระหว่าง FMR และ FNMR (Detection-Error Tradeoff (DET) curve)

การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึมอื่นๆ ดังนี้ วิธีมาตรฐานที่ใช้คุณลักษณะที่ได้จาก minutiae ในการจับคู่ภาพถ่ายพิมพ์นิ้วมือ [53], วิธีที่ใช้คุณลักษณะ DFB ที่เป็นที่รู้จัก [65] และวิธีที่ใช้รูปสามเหลี่ยมร่วมกับการจำลองการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ Radial Basis Function (RBF) [79] แสดงดังตารางที่ 13.5 และ 13.6 จากตารางแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่า FNMR ต่ำกว่าค่า FNMR ของวิธีอื่นๆ โดยเปรียบเทียบกันที่ค่า FMR ที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 13.5 การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึมอื่นที่ค่า FMR เท่ากับ 0.14% โดยประมาณ

อัลกอริทึมการจับคู่ภาพถ่ายพิมพ์นิ้วมือ	False Match Rate (%)	False Non-Match Rate (%)
วิธีมาตรฐานที่ใช้คุณลักษณะที่ได้จาก minutiae [53]	0.16	11.23
วิธีที่ใช้รูปสามเหลี่ยมร่วมกับการจำลองการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ Radial Basis Function (RBF) [79]	0.18	8.48
อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	0.14	3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13.6 การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับ อัลกอริทึมอื่นที่ค่า FMR เท่ากับ 1.09% โดยประมาณ

อัลกอริทึมการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ	False Match Rate (%)	False Non-Match Rate (%)
วิธีที่ใช้คุณลักษณะ DFB ที่เป็นที่รู้จัก [65]	1.07	7.87
อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	1.09	2.89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 14

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์ นิ้วมือ

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือโดยอาศัยคุณลักษณะที่มีความไม่แปรผันต่อการแปลงเรขาคณิต เพื่อนำมาใช้ในการยืนยันและระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยจะมีการสร้างรูปสามเหลี่ยมจากจุด minutiae ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือ แล้วดึงคุณลักษณะของรูปสามเหลี่ยม เพื่อนำมาใช้ในการหาคู่ของรูปสามเหลี่ยมบนภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับกับภาพที่ต้องการตรวจสอบที่มีการแปลงแบบต่างๆ และมีการนำเสนอการใช้คุณลักษณะร่วมเพื่อใช้ในการยืนยันภาพลายพิมพ์นิ้วมือมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งของการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ หลังจากที่หาคู่ของสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันได้แล้ว จะนำพิกัดของ minutiae ที่สอดคล้องกันมาคำนวณเมตริกซ์การแปลงเพื่อจัดวางภาพทั้งสองให้ตรงกัน ผลจากการวิจัยพบว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถใช้ในการหาคู่ของ minutiae ที่สอดคล้องกันและจัดวางภาพให้ตรงกันได้ถูกต้อง ทั้งในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid, affine, ไม่เป็นเชิงเส้น, กรณีที่ภาพมีสัญญาณรบกวน รวมทั้งมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป ทำให้สามารถนำอัลกอริทึมไปใช้งานได้จริงกับภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบที่ได้จากระบบหรือสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างไปจากฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้วก่อนหน้า

ในส่วนของการยืนยันภาพลายพิมพ์นิ้วมือ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุดร่วมกับค่าความผิดพลาดที่ได้จากคุณลักษณะ DFB เพื่อนำมาเป็นหลักเกณฑ์ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยจากการประเมินประสิทธิภาพของการยืนยันภาพลายพิมพ์นิ้วมือนำเสนอด้วยอัลกอริทึมที่อาศัยคุณลักษณะร่วม และหลักเกณฑ์ในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือนำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้พื้นที่ใต้กราฟ ROC เท่ากับ 0.99967 และค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเฉลี่ย (average probability of error) เท่ากับ 0.713% สรุปได้ว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำไปใช้ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ เพื่อการยืนยันหรือระบุตัวบุคคลในกรณีที่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบได้มาจากระบบหรือสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างไปจากฐานข้อมูล นอกจากนี้ ได้มีการเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึมอื่นๆ ที่เป็นที่ยอมรับ ที่ค่าความผิดพลาด FMR ใกล้เคียงกัน พบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าความผิดพลาด FNMR น้อยกว่า ดังนั้นสามารถนำอัลกอริทึมที่นำเสนอไปใช้งานได้จริงกับภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ต้องการตรวจสอบที่ได้จากระบบ หรือสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างไปจากฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้วก่อนหน้า ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย อาจมีการนำวิธีการหาคคุณลักษณะที่นำเสนอ ไปใช้กับลักษณะทางกายภาพอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยืนยันหรือระบุตัวบุคคล

บทที่ 15

สรุป

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการใช้คุณสมบัติความไม่แปรผันต่อการแปลงเรขาคณิตของข้อมูล 2 มิติและ 3 มิติได้ถูกนำมาใช้การซ้อนทับภาพและจัดเรียงภาพให้ตรงกัน กรณีของข้อมูล 3 มิติ เราได้ใช้จุดที่ค่าTorsion เป็นศูนย์กลางบนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา กับข้อมูลสแกน 3 มิติของใบหน้าเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์ เราพบว่า แม้ว่าบุคคลจะมีสีหน้าที่เปลี่ยนไปแต่คุณสมบัติดังกล่าวไม่เปลี่ยน จึงสามารถนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพและจัดเรียงข้อมูลใบหน้า 3 มิติให้ตรงกันได้ งานวิจัยส่วนนี้ได้ถูกตอบรับให้ได้รับการตีพิมพ์ที่ **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering** ในปี 2013 สำหรับกรณีของข้อมูล 2 มิติ เราได้ใช้คุณสมบัติความไม่แปรผันต่อการแปลงเรขาคณิตของคอนเวกซอลส์และอัตราส่วนพื้นที่ที่ล้อมรอบโดยจุด minutia ในการเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์ และนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพและจัดเรียงข้อมูลภาพลายนิ้วมือให้ตรงกัน งานวิจัยส่วนนี้ได้ถูกตอบรับให้ได้รับการตีพิมพ์ที่ **IEICE transactions on information and systems** บทความอยู่ระหว่างการ Review

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Woods, R.P., S.R. Cherry, and J.C. Mazziotta, *Rapid automated algorithm for aligning and reslicing PET images*. J Comput Assist Tomogr, 1992. 16(4): p. 620-633
2. Woods, R.P., J.C. Mazziotta, and S.R. Cherry, *MRI-PET registration with automated algorithm*. J Comput Assist Tomogr, 1993. 17(4): p. 536-546
3. Viola, P. and W.M. Wells, III. *Alignment by maximization of mutual information*. in *Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision*. 1995.
4. Maes, F., et al., *Multimodality image registration by maximization of mutual information*. Medical Imaging, IEEE Transactions on, 1997. 16(2): p. 187 -198.
5. Studholme, C., D.L. Hill, and D.J. Hawkes, *Automated 3-D registration of MR and CT images of the head*. Medical Image Analysis, 1996. 1(2): p. 163-175.
6. Studholme, C., D.L.G. Hill, and D.J. Hawkes, *Automated 3D registration of MR and PET brain images by multi-resolution optimisation of voxel similarity measures*. MedPhys, 1997. 24(1): p. 25-35.
7. Lemieux, L., et al., *A patient-to-computed-tomography image registration method based on digitally reconstructed radiographs*. Medical Physics, 1994. 21(11): p. 1749-1760.
8. Buzug, T., et al., *Image registration: Convex weighting functions for histogram-based similarity measures*, in *CVRMed-MRCAS'97*, J. Troccaz, E. Grimson, and R. Mages, Editors. 1997, Springer Berlin / Heidelberg. p. 203-212.
9. Gottesfeld Brown, L.M. and T.E. Boulton. *Registration of planar film radiographs with computed tomography*. in *Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis*. 1996.
10. Weese, J.u.r., et al. *An approach to 2D/3D registration of a vertebra in 2D X-ray fluoroscopies with 3D CT images*. in *Proceedings of the First Joint Conference on Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine and Medical Robotics and Computer-Assisted Surgery*. 1997. London, UK, UK: Springer-Verlag.
11. Sun, C. and J. Sherrah, *3D symmetry detection using the extended Gaussian image*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1997. 19(2): p. 164 -168.
12. Joseph, L.M. and Z. Andrew, eds. *Geometric invariance in computer vision*. 1992, MIT Press. 540.

13. Andrew, Z., et al., *Recognizing general curved objects efficiently*, in *Geometric invariance in computer vision*, L.M. Joseph and Z. Andrew, Editors. 1992, MIT Press. p. 228-251.
14. Pelizzari Ca, C.G.T.S.D.R.W.R.R. and C. Ct, *Accurate three-dimensional registration of CT, PET, and/or MR images of the brain*. *J Comput Assist Tomogr.*, 1989. 13(1): p. 20-26.
15. Grimson, W.E.L., et al., *An automatic registration method for frameless stereotaxy, image guided surgery, and enhanced reality visualization*. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 1996. 15(2): p. 129 -140.
16. Jian, B. and B.C. Vemuri. *A robust algorithm for point set registration using mixture of Gaussians*. in *Computer Vision, 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference on*. 2005.
17. Myronenko, A. and X. Song, *Point Set Registration: Coherent Point Drift*. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 32(12): p. 2262 -2275.
18. Porrill, J. and J. Ivins, *A semiautomatic tool for 3D medical image analysis using active contour models*. *Informatics for Health and Social Care*, 1994. 19(1): p. 81-90.
19. Joshi, A.A., et al. *A FINITE ELEMENT METHOD FOR ELASTIC PARAMETERIZATION AND ALIGNMENT OF CORTICAL SURFACES USING SULCAL CONSTRAINTS*. in *Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2007. ISBI 2007. 4th IEEE International Symposium on*. 2007.
20. Liu, J., et al., *A Model-Based, Semi-Global Segmentation Approach for Automatic 3-D Point Landmark Localization in Neuroimages*. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 2008. 27(8): p. 1034 -1044.
21. Bookstein, F.L., *Morphometric Tools for Landmark Data Geometry and Biology*. 1991: Cambridge University Press.
22. Miller, M.I., et al., *A mathematical textbook of deformable neuroanatomies*. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1993. 90: p. 11944-11948.
23. Stockman, G., S. Kopstein, and S. Benett, *Matching Images to Models for Registration and Object Detection via Clustering*. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1982. 4(3): p. 229 -241.
24. Ho, H.T. and D. Gibbins. *Multi-scale feature extraction for 3d surface registration using local shape variation*. in *Image and Vision Computing New Zealand, 2008. IVCNZ 2008. 23rd International Conference*. 2008.

25. Van Essen, D.C., et al., *Functional and structural mapping of human cerebral cortex: Solutions are in the surfaces*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1998. 95(3): p. 788-795.
26. Kanai L N, L.B.A.L.D. and S.G. C. *Digital registration of images from similar and dissimilar sensors*. in *Proc. Int. Conf. Cybernetics and Society*. 1981.
27. Goshtasby, A., *Piecewise Linear Mapping Functions for Image Registration*. Pattern Recognition, 1986. 19: p. 459 -466.
28. Cohen, F.S., et al., *Automatic matching of homologous histological sections*. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 1998. 45(5): p. 642 -649.
29. Ali, W.S.I. and F.S. Cohen, *Registering coronal histological 2-D sections of a rat brain with coronal sections of a 3-D brain atlas using geometric curve invariants and B-spline representation*. Medical Imaging, IEEE Transactions on, 1998. 17(6): p. 957 - 966
30. Maurer, C.R., Jr., R.J. Maciunas, and J.M. Fitzpatrick, *Registration of head CT images to physical space using a weighted combination of points and surfaces*. Medical Imaging, IEEE Transactions on, 1998. 17(5): p. 753 -761.
31. Collignon, A.e., et al., *Registration of 3D multi-modality medical images using surfaces and point landmarks*. Pattern Recogn. Lett., 1994. 15(5): p. 461-467.
32. Subsol, G., J.P. Thirion, and N. Ayache. *Non rigid registration for building 3D anatomical atlases*. in *Pattern Recognition, 1994. Vol. 1 - Conference A: Computer Vision Image Processing., Proceedings of the 12th IAPR International Conference on*. 1994.
33. Maintz, J.B.A., P.A. van den Elsen, and M.A. Viergever, *Evaluation of ridge seeking operators for multimodality medical image matching*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1996. 18(4): p. 353 -365.
34. Govindu, V. and C. Shekhar, *Alignment using distributions of local geometric properties*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1999. 21(10): p. 1031 -1043.
35. Carmo, M.P.D., *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. 1 ed. 1976: Prentice Hall. 503.
36. Mynatt, I., S. Bergbauer, and D.D. Pollard, *Using differential geometry to describe 3-D folds*. Journal of Structural Geology, 2007. 29: p. 1256-1266.
37. ปิณฑวิรุจน์, ช., การประมวลผลภาพดิจิทัลด้วย *Matlab*. 2551, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

38. Dhond, U.R. and J.K. Aggarwal, *Structure from stereo-a review*. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 1989. 19(6): p. 1489 -1510.
39. Bosch, T., et al., *Three-dimensional object construction using a self-mixing type scanning laser range finder*. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 1998. 47(5): p. 1326 -1329.
40. Pajdla, T., *Laser Plane Range Finder*, in *The Implementation at the CVL*. 1995.
41. Tosranon, P., et al. *Multiple Correspondences in Stereoscopic Using Frequency-Encoding Light Point*. in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2007. ECTI-CON 2007. 4th International Conference on. 2007.
42. Tosranon, P., et al. *Robustness of novel surface invariance to geometric transformation*. in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on. 2008.
43. Tosranon, P., et al. *Gaussian curvature-based geometric invariance*. in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on. 2009.
44. Pintavirooj, C., P. Tosranon, and F.S. Cohen. *Using intrinsic surface geometry and absolute invariants for 3D face alignment and registration*. in *Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, 2010 10th International Conference on. 2010.
45. Moreno, A.B. and S. A. GavabDB: a 3D Face Database. 2004. Vigo.
46. Besl, P.J. and N.D. McKay, *A Method for Registration of 3-D Shapes*. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 1992. 14(2): p. 239-256.
47. Pintavirooj, C., F.S. Cohen, and P. Tosranon, *3D Face Alignment and Registration in the Presence of Facial Expression Differences*. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2013.
48. D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition*, London: Springer-Verlag, 2009.
49. D. Maio and D. Maltoni, *Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 19, pp. 27-40, Jan. 1997.
50. N. Yager and A. Amin, *Fingerprint verification based on minutiae feature: a Review*, Pattern Anal. Applic., vol. 7, pp. 94-113, Feb. 2004.

51. F. Benhammedi, M.N. Amirouche, H. Hentous, K. Bey Beghdad, and M. Aissami, *Fingerprint matching from minutiae texture maps*, Pattern Recognition, vol. 40, pp. 189-197, 2007.
52. A. K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, and R. Bolle, *An identity-authentication system using fingerprints*, Proc. IEEE, vol. 85, no. 9, pp. 1365-1388, Sept. 1997.
53. A. K. Jain, L. Hong, and R. Bolle, *On-line fingerprint verification*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 19, no. 4, pp. 302-314, Apr. 1997.
54. G. Parziale and A. Niel, *A fingerprint matching using minutiae triangulation*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3072, pp. 241-248, 2004.
55. G. Bebis, T. Deaconu, and M. Georgiopoulos, *Fingerprint identification using Delaunay triangulation*, in Proc. 1999 Int. Conf. Information Intelligence and Systems, ICIS'99, Bethesda, MD, 1999, pp. 452-459.
56. N. Liu, Y. Yin, and H. Zhang, *A fingerprint matching algorithm based on Delaunay triangulation net*, in The 5th Int. Conf. Computer and Information Technology, CIT 2005, Shanghai, 2005, pp. 591-595.
57. X. Chen, J. Tian, X. Yang, and Y. Zhang, *An algorithm for distorted fingerprint matching based on local triangle feature set*, IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol. 1, no. 2, pp. 169-177, Jun. 2006.
58. Wenquan Xu, Xiaoguang Chen, and Jufu Feng, *A Robust fingerprint matching approach: growing and fusing of local structures*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4642, pp. 134-143, 2007.
59. A. Senior and R. Bolle, *Improved fingerprint matching by distortion removal*, IEICE Trans. Inf. & Syst., Spl. Issue on Biometrics, vol. E84-D, no.7, pp.825-832, July 2001.
60. X. Chen, J. Tian, X. Yang, and Y. Zhang, *An algorithm for distorted fingerprint matching based on local triangle feature set*, IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol. 1, no. 2, pp. 169-177, Jun. 2006.
61. A. Ross, S. C. Dass, and A. K. Jain, *Fingerprint warping using ridge curve correspondences*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 28, pp. 19-30, Jan. 2006.

62. N. K. Ratha, R.M. Bolle, V.D. Pandit, and V. Vaish, *Robust fingerprint authentication using local structural similarity*, in 5th IEEE Workshop Applications of Computer Vision, Palm Springs, CA, 2000, pp. 29-34.
63. A. Wahab, S. H. Chin, and E. C.Tan, *Novel approach to automated fingerprint recognition*, Proc. Inst. Elect. Eng. Vision, Image and Signal Processing, vol. 145, no. 3, pp. 160-166, Jun. 1998.
64. Y. L. Yin, X. B. Ning, X. M. Zhang, and Y. L. Wang, *A fingerprint matching algorithm based on ridge comparability*, Pattern recognition and Artificial Intelligence, vol. 15, no. 4, pp. 502-506, 2002.
65. A. K. Jain, S. Prabhakar, L. Hong and S. Pankanti, *Filterbank-based fingerprint matching*, IEEE Trans. Image Process., vol. 9, no. 5, pp. 846-859, May 2000
66. M. Tico and P. Kuosmanen, *Fingerprint matching using an orientation-based minutia descriptor*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 25, no. 8, pp. 1009-1014, Aug. 2003.
67. Y. Wang, J. Hu, and D. Phillips, *A fingerprint orientation model based on 2D Fourier expansion (FOMFE) and its application to singular-point detection and fingerprint indexing*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 29, no. 4, pp. 573-585, Apr. 2007.
68. J. Gu, J. Zhou, and C. Yang, *Fingerprint recognition by combining global structure and local cues*, IEEE Trans. Image Process., vol. 15, no. 7, pp. 1952-1964, Jul. 2006.
69. F. P. Preparata and M. I. Shamos, *Computational Geometry: An Introduction*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1985.
70. Z. Yang, F.S. Cohen, *Image registration and object recognition using affine invariants and convex hulls*, IEEE Trans. Image Process., vol. 8, no. 7, pp. 934-946, Jul. 1999.
71. D.P. Huttenlocher, *Fast affine point matching: an output-sensitive method*, in Proc. CVPR' 91 IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, Maui, HI, 1991, pp. 263-268.
72. R. A. O'Keefe, *The Craft of Prolog*, Cambridge, MA: MIT Press, 1990.
73. I. Bratko, *Prolog Programming for Artificial Intelligence*, 2nd ed. Boston, MA: Addison-Wesley, 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

74. R. H. Bamberger and M. J. T. Smith, *A filter bank for the directional decomposition of images: theory and design*, IEEE Trans. Signal Process., vol. 40, no. 4, pp. 882-893, Apr. 1992.
75. A. E. Caldwell, H. J. Choi, A. B. Kahng, S. Mantik, M. Potkonjak, G. Qu, and J. L. Wong, *Effective iterative techniques for fingerprinting design IP*, IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst., vol. 23, no. 2, pp. 208-215, Feb. 2004.
76. D. Maio, D. Maltoni, R. Cappelli, J. L. Wayman and, A. K. Jain, *FVC 2000: Fingerprint Verification Competition*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 24, no. 3, pp. 402-412, Mar. 2000.
77. M. E. Schuckers, *A parametric correlation framework for the statistical evaluation and estimation of biometric-based classification performance in a single environment*, IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol. 4, no. 2, pp. 231-241, Jun. 2009.
78. M. Gamassi, M. Lazzaroni, M. Misino, V. Piuri, D. Sana, and F. Scotti, *Quality assessment of biometric systems: a comprehensive perspective based on accuracy and performance measurement*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, no.4, pp. 1489-1496, Aug. 2005
79. C. Wang and M.L. Gavrilova, *A novel topology-based matching algorithm for fingerprint recognition in the presence of elastic distortions*, in Computer Science and Its Applications-ICCSA 2005, LNCS3480, 2005, pp. 748-757.

ประวัติผู้เขียน

หัวหน้าโครงการ

(ไทย) ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

(อังกฤษ) Dr. Chuchart Pintavirooj

ตำแหน่งทางวิชาการ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันมหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่ ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-7373000 ext. 3378, 3269968 โทรสาร 7392398

Email : kpchucha@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

วุฒิ	ปีที่สำเร็จ	สาขาวิชา	สถาบัน
B.SC. (Radation Tech.)	2528	Radiation Technology	ม.มหิตล
M. Sc.(Biomedical Inst.)	2532	Biomedical Instrumentation	ม.มหิตล
M.E.(Biomedical Engineer)	2538	Biomedical Engineering	WPI, USA
Ph.D.(Biomedical Engineer)	2543	Biomedical Engineering	Drexel , USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

a) International referred journal

- [1]. F. S. Cohen, W. S. I. Ali, and **C. Pintavirooj**, "Ordering and Parameterizing Scattered 3D data for B-Spline Surface Approximation," IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., 22, 6, pp. 642-648, 2000.
- [2] **C. Pintavirooj**, A. Ngamlamiad, A. Romputtal, W. Withayachumnankul, K. Hamamoto, "Ultrasonic Refractive Index Tomography," Journal of The 12-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2004 (WSCG2004), vol. 12, no. 2, pp. 333-340, Plzen, Czech Republic, February 2-6, 2004. Plzen, Czech Republic, February 2-6, 2004.
- [3] P. Putjarupong, **C. Pintavirooj**, W. Withayachumnankul, M. Sangworasil, "Image Registration Exploiting Five-Point Coplanar Perspective Invariant and Maximum Curvature Point", Journal of The 12-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2004 (WSCG2004), vol. 12, no. 2, pp. 341-348, Plzen, Czech Republic, February 2-6, 2004. Plzen, Czech Republic, February 2-6, 2004.
- [4] F. S. Cohen and **C. Pintavirooj**, "Invariant surface Alignment in the Presence of Affine and some Non-linear Transformation," Medical Image Analysis, Elsevier Science, vol. 8, pp. 151-164, June 2004.

b) Internation referred proceeding

- [1]. F. S. Cohen and **C. Pintavirooj**, "Invariant surface Alignment in the Presence of Affine and some Non-linear Transformation," in Proc. IEEE workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis (MMBIA), pp. 78-85, 2000.
- [2] **C. Pintavirooj**, W. Withayachumnankul, S. Tungjitkusolmun and K. Chitsakul, "3D Shape Recovery Based on Image Reconstruction from Projection", International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2001), Chiangmai, November 14th -16th, 2001.

- [3] **C. Pintavirooj**, C. Ninkaew, M. Sangworasil, and K. Hamamoto, 3D Visualization from Radiograph, International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2001), Chiangmai, November 14th –16th, 2001.
- [4] **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil³, "3D Shape Recovery Based on Radon Transform", DICTA2002: Digital Image Computing Techniques and Applications, Melbourne, Australia, January 21st-22nd, 2002.
- [5] **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil, "3D Modeling Based on Radon Transform with Application in Volume Measurement", International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Czech Republic, February 4th –8th, 2002.
- [6] W. Withayachumnankul, **C. Pintavirooj**, M. Sangworasil, and K. Hamamoto, "3D Shape Recovery Based on Tomography," Proc. ICSP, Beijing, China, October 2002, pp. 784-787.
- [7] P. Ungpinitpong, **C. Pintavirooj**, P. Lertprasert, and M. Sangworasil, "Improved 3D Visualization from X-Ray Radiograph Using Algebraic Reconstruction Technique," Proc. ISCIT 2002, Phattaya, Thailand, October 2002.
- [8] W. Withayachumnankul, K. Hamamoto, **C. Pintavirooj**, and P. Suwana, "A Computational Analysis of Ultrasonic Reflection Mode Tomography Using Frequency-Shift Method," Proc. ISCIT2002, Phattaya, Thailand, October 2002, pp. 174-177.
- [9] **C. Pintavirooj**, T. Rattana, W. Withayachumnankul, and M. Sangworasil, "3D Modeling Using Cone-Beam Tomography," Proc. ISCIT 2002, Phattaya, Thailand, October 2002, pp. 178-181.
- [10] P. Ungpinitpong, S. Ngamanekrat, K. Sepsirisuk, **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil, "3D Visualization from X-Ray Radiograph using Algebraic Reconstruction Technique" Proc. ICBME, Sigapore, December 2002.
- [11] W. Withayachumnankul, A. Romputtal, **C. Pintavirooj**, and S. Taertulakarn, "An Investigation on Ultrasonic Attenuation Tomography Using the Integrated Power Spectrum Ratio Method," Proc. ICBME, Sigapore, December 2002.
- [12] N. Pantsaena, N. Banditwong, M. Sangworasil, **C. Pintavirooj**, S. Airphaiboon, "A Large Scale Medical Volume Rendering on Clustering System," Proc. ITC-CSCC 2003, Korea, July 2003.

- [13] P. Ungpinitpong, S. Ngamanekrat, **C. Pintavirooj** and M. Sangworasilp, "SART: AN APPROACH TO IMPROVE 3D VISUALIZATION FROM LIMITED VIEWS OF X-RAY RADIOGRAPHS", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2003), Sydney, Australia, August 2003.
- [14] N. Pantsaena, A. Ngamlamiad, **C. Pintavirooj**, Manas Sangworasil and K. Sepsirisuk, "FAST VOLUME RENDERING ON CLUSTERING SYSTEM", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2003), Sydney, Australia, August 2003.
- [15] S. Taertulakarn, A. Romputtan, **C. Pintavirooj** and W. Withayachumnankul, "Algebraic Reconstruction Technique for Ultrasonic Computed Tomography", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2003), Sydney, Australia, August 2003.
- [16] W. Withayachumnankul, P. Putjarupong, **C. Pintavirooj**, and P. Lertprasert, "MEASUREMENT THE AREA AND VOLUME WITH PHOTOGRAPHIC TOMOGRAPHY", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2003), Sydney, Australia, August 2003.
- [17] S. Ngamanekrat, **C. Pintavirooj**, T. Kiriratnikom, and S. Anuntaseree, "IMPROVE 3D VISUALIZATION FROM RADIOGRAPH FOR C-ARM X-RAY APPRATUS USING SART", Proc. ISCIT 03, Songkhla, Thailand, September 2003.
- [18] Nopparat Pantsaena, Prakrit Engkakitti, Boonwat Attachoo, **Chuchart Pintavirooj** and Manas Sangworasil, "FAST VOLUME RENDERING ON CLUSTERING SYSTEM USING A SHEAR-WARP FACTORIZATION", Proc. ISCIT 03, Songkhla, Thailand, September 2003.
- [19] A. Romputtal, **C. Pintavirooj**, P. Lertprasert and W. Withayachumnankul, "ULTRASONIC COMPUTED TOMOGRAPHY USING ALGEBRAIC RECONSTRUCTION ALGORITHMS", Proc. ISCIT 03, Songkhla, Thailand, September 2003.
- [20] W. Withayachumnankul, P. Putjarupong, **C. Pintavirooj**, and P. Lertprasert, "3D SHAPE EXTRACTION USING PHOTOGRAPHIC TOMOGRAPHY WITH ITS APPLICATION", Proc. ISCIT 03, Songkhla, Thailand, September 2003.
- [21] S. Reruang, W. Withayachumnankul, **C. Pintavirooj**, S. Airphaiboon, "3D Shape Extraction Using Photographic Tomography with Its Application," Proceedings of WSCG2004, Plzen, Czech Republic, February 2-6, 2004.

- [22] J. Plodpai, **C. Pintavirooj**, and S. Airphaiboon, "Active Contours: Application toward Segmentation Step of Automatic Chromosome Analysis," The 1st ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2004), Pattaya, Thailand, May 2004
- [23] J. Theerapatanakul, J. Podpai, S. Mooyen, and C. Pintavirooj, "Classification of White Blood Cell Using Adaptive Contour," ICCAS'04, Bangkok, Thailand, August 25-27, 2004.
- [24] W. Narkbuakaew, S. Ngamanekrat, W. Withayachumnankul, **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil, "Center Determination for Cone-Beam X-ray Tomography", International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS'04, Bangkok, Thailand, August 25-27, 2004.
- [25] S. Kawikitwicha, **C. Pintavirooj**, T. Kiriratnikom, S. Anuntaseree, and P. Tosranon. "3D Modeling from Radiograph with Conebeam Geometry", IEEE TENCON2004, Chiangmai, Thailand, November 2004.
- [26] S. Reruang, W. Withayachumnankul, **C. Pintavirooj**, S. Airphaiboon and **P. Lertpasert**, "3D SHAPE EXTRACTION OF LARGE OBJECT USING PHOTOGRAPHIC TOMOGRAPHY", IEEE TENCON2004, Chiangmai, Thailand, November 2004.
- [27] P. Putjarupong, **C. Pintavirooj**, W. Withayachumnankul, M. Sangworasil, "Non-Linear Image Registration using Perspective Invariant and Thin-Plate Spine", IEEE TENCON2004, Chiangmai, Thailand, November 2004.
- [28] **C. Pintavirooj**, K. Jaruwongrungrsee, W. Withayachumnankul K. Hamamoto and , S. Teartulakarn "Ultrasonic Refractive Index and Sound Velocity Tomography", IEEE TENCON2004, Chiangmai, Thailand, November 2004.
- [29] J. Theerapattanakul, J. Plodpai, S. Mooyen and **C. Pintavirooj**, "An Efficient Method for Segmentation Step of Automated White blood Cell Classifications", IEEE TENCON2004, Chiangmai, Thailand, November 2004.
- [30]. "3D Modeling from Radiograph with Conebeam Geometry", IEEE TENCON2004, Chiangmai, Thailand, November 2004.
- [31] **C. Pintavirooj**, K. Jaruwongrungrsee, W. Withayachumnankul, M. Sangworasil, K. Hamamoto and G. Tangtisanon, "Ultrasonic Diffraction Tomography : The Experimental Result", international Conferences in Centrai Europe on Computer Graphics, Visualiaization and Computer Vision (WSCG2005), Czech Republic, January 31st - February 4th, 2005.

- [32] **C. Pintavirooj**, W. Narkbuakaew, W. Withayachumnankul and M. Sangworasil, "3D Modeling from Multiple Projections: Parallel-Beam to Helical Cone-Beam Trajectory", International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG2005) , Czech Republic, January 31st - February 4th, 2005.
- [33] B. Laksanapanai, W. Withayachumnankul , **C. Pintavirooj**, "HARDWARE-ACCELERATED OBJECTIVE FUNCTION EVALUATION", IEEE TENCON2004, Chiangmai, Thailand, November 2004
- [34] **C. Pintavirooj**, P. Putjarupong†, W. Withayachumnankul, M. Sangworasil, "SHAPE MATCHING USING SET OF CURVE AFFINE INVARIANT POINTS", International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG2005) , Czech Republic, January 31st - February 4th, 2005.
- [35] B. Laksanapanai, W. Withayachumnankul , **C. Pintavirooj**, "Acceleration of Genetic Algorithm Using Parallel Processing with Application in Medical Image Registration", International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG2005) , Czech Republic, January 31st - February 4th, 2005.
- [36] Kosin Kalaratt, B. Laksanapanai , **Chuchart Pintavirooj** and Manas Sangworasil, "FAST CONE-BEAM TOMOGRAPHY ON CLUSTERING SYSTEM," The 2nd ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2005), Pattaya, Thailand, May 2005
- [37] T. Angsuwatanakul, A. Ngamlamiad, , **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil, "Design and Construction of Low cost X-ray Array Detector applied for SART Fanbeam", The 2nd ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2005), Pattaya, Thailand, May 2005
- [38] J. Theerapattanakul, **C. Pintavirooj**, and M. Sangworasil, "Feature Extraction for Chromosome Classification," The 2nd ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2005), Pattaya, Thailand, May 2005
- [39] N. Pantsaena, N. Banditwong, M. Sangworasil, **C. Pintavitrooj**, S. Airphaiboon, "A Large Scale Medical Volume Rendering on Clustering System," Proc. ITC-CSCC 2005, Korea, July 2003.
- [40] N. Pantsaena, N. Banditwong, M. Sangworasil, **C. Pintavitrooj**, S. Airphaiboon, "A Large Scale Medical Volume Rendering on Clustering System," Proc. ITC-CSCC 2005, Korea, July 2003.
- [41] G. Tangtisanon K. , Jaruwongrungrsee, K. Hamamoto and **C. Pintavirooj**, " Ultrasonic Diffraction Tomography With Multiple Frequency Synthesis", 27th Annual International Conference

- of the IEEE In Medicine and Biology Society (IEEE BMES 2005), Sep. 1-4, 2005, Shainghai, China.
- [42] **C. Pintavirooj**, K. Jaruwongrunsee, and K. Hamamoto, " Improved Technique for Deriving a Projection Data for Ultrasonic Diffraction Tomography", World Congress in Ultrasonics Merged with Ultrasonic International (WCU/UI'05), Beijing, China.
- [43] K. Kalaratt, W. Narkbuakaew, **C. Pintavirooj**, M. Sangworasil, "Rapid 3D Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART) on Clustering System", IEEE TENCON'05 , Nov 21-24, 2005, Melbourne Australia.
- [44] W.Narkbuakaew, **C.Pintavirooj**, W.Withayachumnankul, M.Sangworasil, "3D Modeling from Using Spiral Cone-Beam Trajectory", IEEE TENCON'05 , Nov 21-24, 2005, Melbourne Australia.
- [45] P. Nantivatana, W. Narkbuakaew, **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil "Image Registration using Discrete Wavelet Transform", IEEE TENCON'05 , Nov 21-24, 2005, Melbourne Australia.
- [46] J. Theerapattanakul, J. Plodpai, **C. Pintavirooj** and P. Lertprasert, "Feature extraction and Classification for Automatic Chromosome Analysis", The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore.
- [47] S. Tantachun, **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil, "Directional Filter Bank : An application for Fingerprint Enhancement", The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore.
- [48] S. Tantachun, **C. Pintavirooj** and M. Sangworasil, "Biometric using Hand Geometric Invariance", The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore.
- [49] S. Gimjumba, W. Narkbuakaew, M. Sangworasil and **C. Pintavirooj**, "Acceleration of 3D SART using Wavelet Transform", The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore.
- [50] P. Yampri, **C.Pintavirooj**, S. Teartulakarn, and P. Tosranon, "Automated Classification of White Blood Cell Using Artificial Neural Network", The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore.

- [51] T. Onemanisone, K. Jaruwongrunsee, K. Hamamoto and **C. Pintavirooj**, "Using Lock-in Amplifier to Improve SNR of Ultrasonic Diffraction Tomographic Signal", The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore.
- [52] Mee-chai Lawhakan, Sirdej Boonsang, **Chuchart Pintavirooj** and Manas Sangworasil, "Analysis of Temperature and Flow Distribution in Infant Incubator Using Finite Element Method", The 12th international Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore
- [53] T. Chanwimalueang, M. Sangworasil and **C. Pintavirooj**, "Miniature Computed Tomography Application in 3D Modeling With Conebeam Geometry", The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore
- [54] S.Tantachun, **C. Pintavirooj**, M. Sangworasil and Mee-chai Lawhakan, "BIOMETRICS WITH EIGEN-HAND", 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEEE ICIEA 2006), 24 - 26 May 2006, Singapore.
- [55] S. Tantachun, **C. Pintavirooj**, M. Sangworasil "DIRECTIONAL FILTER BANK:AN ENHANCEMENT FOR FINGERPRINT FEATURE DETECTION", 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEEE ICIEA 2006), 24 - 26 May 2006, Singapore.
- [56] T. Chanwimalueang, Y.Pititheerapab, W. Narkbuekaew and C. Pintavirooj "CONE-BEAM X-RAY TOMOGRAPHY WIT ARBITRARY-ORIENTATION X-RAY TUBE", 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEEE ICIEA 2006), 24 - 26 May 2006, Singapore.
- [57] S. Gimjumpa,W. Narkbuekaew, M. Sangworasil, C. Pintavirooj, "3D MODELING FROM MULTIPLE PROJECTIONS WITH ARBITRARY-POSED CAMERA", 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEEE ICIEA 2006), 24 - 26 May 2006, Singapore.
- [58] P.Yampri, C.Pintavirooj, M. Sangworasil and S.Teartulakarn, "WHITE BLOOD CELL CLASSIFICATION BASED ON THE COMBINATION OF EIGEN CELL AND PARAMETRIC FEATURE DETECTION", 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEEE ICIEA 2006), 24 - 26 May 2006, Singapore.
- [59] Y. Pititheerapab, T. Chanwimalueang, M. Sangworasil and C. Pintavirooj, "MINIATURED COMPUTED TOMOGRAPHY SYSTEM AND CALIBRATION", 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEEE ICIEA 2006), 24 - 26 May 2006, Singapore.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [60] Meechai Lohakan , Pisuit Janchaichanakun , S. Boonsang , C. Pintavirooj and M. Sangworasil, "A Computational Model of Magnetic Fluid Flow based on Maxwell's Equation and Navier-Stokes Equations", The 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2006), April 30th - May 3rd 2006, Miami, FL USA
- [61] Sorapong Aootaphao, Manas Sangworasil and Chuchart Pintavirooj, " A 3D MOTION CAPURE SYSTEM USING DIRECT LINEAR TRANSFORM AND QUAD-TREE SEARCHING SCHEME", The 3rd ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2006), Ubon Ratchathani, Thailand, May 2006.
- [62] M. Lohakan , S. Boonsang , C. Pintavirooj and M. Sangworasil "3D TEMPERATURE MODEL OF AN INFANT INCUBATORBASED ON FINITE ELEMENT METHOD ", The 3rd ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2006), Ubon Ratchathani, Thailand, May 2006.
- [63] Yuttana Pititherapad,, Boonyarit Laksanapanai, Polsart Lertprasert, Chuchart Pintavirooj, "X-RAY –DETECTOR WITH CMOS SENSOR CAMERA", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2006), Seoul, Korea, August 2006.
- [64] T. Onemanisone, C. Pintavirooj, K. Jaruwongrungsee* and S. Daochai,"COMPARISON STUDY OF ULTRASONIC DIFFRACTION TOMOGRAPHY AND ULTRASONIC NON-DIFFRACTION TOMOGRAPHY", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2006), Seoul, Korea, August 2006.
- [65] J. Theerapattanakul, C. Pintavirooj and M. Sangworasil, "Chromosome Classification Using Artificial Neural Network and Principal Component Analysis", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2006), Seoul, Korea, August 2006.
- [66] T. Chanwimalueang, M. Sangworasil and C. Pintavirooj , "EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ARBITRARY-ORIENTATION CONE-BEAM X-RAY TOMOGRAPHY, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2006), Seoul, Korea, August 2006.
- [67] T. Angsuwatanakul, T. Chanwimalueang, C. Pintavirooj, M. Sangworasil and P.Lertprasert, "Improved-Resolution X-ray Array Detector Applied for SART Fanbeam, International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2006), Bangkok, October 18th –20th , 2006. (Accepted)
- [68] Sorapong Aootaphao, Saowapak Sothivirat, Chuchart Pintavirooj, "A Computation Investigation for Metal Reduction in Conebeam x-ray Tomography", International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2006), Bangkok, October 18th –20th , 2006. (Accepted)

- [69] P. Tosranon, T. Onemanisone, P. Greesuradej, C. Pintavirooj, K. Jaruwongrungrsee, "Ultrasonic Reflection Mode Tomography Using Frequency-Shift Method", International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2006), Bangkok, October 18th–20th, 2006. (Accepted)
- [70] Pititeeraphab, T. Chanmalueang, Thaval Rerksngaem, Kitipol Chitsakul and C. Pintavirooj' "X-RAY –DETECTOR WITH CMOS SENSOR CAMERA APPLICATION FOR CALCIUM DENISTY MEASUREMENT", international Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2006), Bangkok, October 18th–20th, 2006. (Accepted)
- [71] Thanapong Chaichana, Manas Sangworasil, Chuchart Pintavirooj, Sorapong Aootaphao, "Accelerate a Dlt Motion Capture System With Quad-Tree Searching Scheme", International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2006), Bangkok, October 18th–20th, 2006. (Accepted)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

1. Tosranon, P., Bunluechokchai, S., Pintavirooj, C., Sangworasil, M. "Multiple Correspondences in Stereoscopy Using Frequency-Encoding Light Point" Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2007. ECTI-CON 2007. 4th International Conference on, pp.979-982, 9-12 May 2007
2. Tosranon, P., Sanpanich, A., Bunluechokchai, S., Pintavirooj, C. "Robustness of novel surface invariance to geometric transformation," Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on, vol.1, pp.533-536, 14-17 May 2008
3. Tosranon, P., Sanpanich, A., Bunluechokchai, C., Pintavirooj, C., "Gaussian curvature-based geometric invariance," Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on, vol.02, pp.1124-1127, 6-9 May 2009
4. Pintavirooj, C., P. Tosranon, and F.S. Cohen. "Using Intrinsic Surface Geometry and Absolute Invariants for 3d Face Alignment and Registration". in Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2010 10th International Conference on. 2010. pp. 1148 -1153.

บทความเรื่องยาวที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์

1. Pintavirooj, C., F.S. Cohen, and P. Tosranon. "3D Face Alignment and Registration in the Presence of Facial Expression Differences". **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, 2013.
2. C. Pintavirooj, F.S. Cohen, W. Iampa, "Fingerprint Verification and Identification Based on Local Geometric Invariants Constructed from Minutiae Points and Augmented With Global Directional Filterbank Feature", submitted to IEICE, under reviewed



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

หนังสือตอบรับการตีพิมพ์

Dear Dr. Chuchart,

Notification of Publication

It is our pleasure to accept for your submitted paper.

Following paper you submitted has been accepted and will be published on IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering.

.. Receipt Number (IEEJ ID) c12-001
 Title of Manuscript 3D Face Alignment and Registration in the Presence of Facial Expression Differences
 Author(s) Dr. Chuchart
 Vol./No Vol. 8 / No. 4 (July 2013 issue)
 .. Deadline for submission 2012/6/29 (due NLT)

The final manuscript and other documents required should be submitted via the Web.
 Please log in to <https://submit.iee.or.jp/c/cgi-bin/sstk-top.cgi>, and select "Paper resubmission or final manuscript submission" from the Top Menu to submit the final manuscript.

And, if you have any questions, please feel free to contact teee-sadoku@iee.or.jp, Editorial & Publishing Section, IEEJ.

Sincerely Yours,

The Chairperson of
 the Editorial Affairs, IEEJ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้