

การซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของภาพใบหน้าสามมิติ
ขณะแสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน

3D FACE ALIGNMENT AND REGISTRATION
IN THE PRESENCE OF FACIAL EXPRESSION DIFFERENCES



กพ.
๑/๓๘๖ก
๒๕๕๕

ประสงค์ ตูสรานนท์
PRASONG TOSRANON

ที่ en

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 128572
รับ, เดือน, ปี... ๕ ๗๑, ๒๕๕๖

b. 1๒๕๕๒๑๘๖
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๕

KMITL-2012-EN-D-018-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D FACE ALIGNMENT AND REGISTRATION
IN THE PRESENCE OF FACIAL EXPRESSION DIFFERENCES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF DOCTORAL OF ENGINEERING IN
ELECTRICAL ENGINEERING SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMUTL-2012-EN-D-018-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของภาพใบหน้าสามมิติขณะแสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน
นักศึกษา	นายประสงค์ ฐุสรานนท์
รหัสประจำตัว	49060063
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาปัญหาการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงภาพสามมิติของใบหน้าทีแสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันให้ตรงกัน โดยได้ข้อมูลภาพจากเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ในการศึกษาที่ใช้ทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์เป็นหลัก เริ่มจากการถ่ายภาพใบหน้าสามมิติแบบสเตอริโอ การสร้างพื้นผิว เวกเตอร์สัมผัส เวกเตอร์ปกติ ความโค้งเกาส์เซียน ความโค้งเฉลี่ย เส้นโค้งเชิงพาราโบลา ค่าปริมาตรเป็นศูนย์ ค่าแรงบิดของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นศูนย์ เนื่องจากจุดเด่นเอกลักษณ์เหล่านี้ มีความคงสภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอารมณ์สีหน้าที่เป็นการแปลงแบบแอฟไฟน์ จึงนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกันได้ และอาจนำไปสู่การรู้จำใบหน้าได้ ประสิทธิภาพการทำงานได้รับการทดสอบโดยใช้ฐานข้อมูลภาพ (GavabDB) ที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง และเปรียบเทียบการทำงานกับวิธี ICP (Iterative Closest Point) และ CPD (Coherent Point Drift) พบว่า วิธี CPD ให้ผลดีที่สุดแต่ใช้เวลาในการคำนวณนานมาก ส่วนวิธี ICP นั้นจำเป็นต้องผ่านการจัดให้ตรงกันแบบหยาบก่อน และใช้เวลาใกล้เคียงกับวิธีที่เสนอ วิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปสู่การรู้จำใบหน้าได้เนื่องจากให้ความแตกต่างระหว่างการจับคู่ภาพถูกต้องต่อการจับคู่ภาพผิดสูง โดยมีค่า SNR 1.2 ขณะที่วิธี ICP ได้ SNR 0.37 และ CPD ได้ SNR 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานในการทำวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 โครงร่างของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 วรรณกรรมของการช้อนทับภาพ.....	4
2.3 วรรณกรรมที่เป็นแนวคิดในการวิจัย.....	6
2.4 การช้อนทับภาพระยะสามมิติแบบหยาบ.....	6
2.5. การช้อนทับภาพแบบละเอียด.....	11
บทที่ 3 เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์.....	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 พารามิเตอร์เส้นโค้ง.....	15
3.3 ความยาวส่วนโค้ง.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 ผลคูณเชิงเวกเตอร์.....	17
3.5 การกำหนดพารามิเตอร์ของเส้นโค้งด้วยความยาวส่วนโค้ง.....	18
3.6 สมการพอยน์ต์.....	20
3.7 พื้นผิว.....	21
3.8 เวกเตอร์สัมผัส.....	22
3.9 ระนาบสัมผัส.....	23
3.10 รูปแบบมูลฐานอันดับแรก.....	23
3.11 รูปแบบมูลฐานที่สอง.....	26
3.12 ความโค้งปกติ.....	27
3.13 ความโค้งเกาส์เซียน.....	28
3.14 ความโค้งเฉลี่ย.....	29
บทที่ 4 การแปลงเชิงเรขาคณิต.....	30
4.1 บทนำ.....	30
4.2 การแปลงเชิงเส้น.....	30
4.3 การแปลงเหมือน.....	31
4.4 การแปลงแอฟไฟน์.....	31
4.5 เมตริกซ์การแปลงและระบบพิกัดโฮโมจีเนียส.....	31
บทที่ 5 การซ้อนทับภาพพื้นผิวใบหน้าสามมิติ.....	35
5.1 บทนำ.....	35
5.2 ประเภทของการซ้อนทับภาพ.....	35
5.2.1 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2.2 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพต่างวิธีกัน.....	36
5.2.3 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุต่างชนิดกัน.....	36
5.3 วิธีการซ้อนทับภาพ.....	36
5.4 การคำนวณเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการซ้อนทับภาพสามมิติ .37	
5.5 การคำนวณค่าปริมาตรเป็นศูนย์และแรงบิดเป็นศูนย์เป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการ ซ้อนทับภาพสามมิติ.....	38
บทที่ 6 การจัดพื้นผิวให้ตรงกัน.....	40
6.1 บทนำ.....	40
6.2 การหาความสอดคล้องระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์.....	40
6.3 การหาเมตริกซ์การแปลงระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลา.....	41
บทที่ 7 ระบบการถ่ายภาพและการคำนวณตัวแปร.....	44
7.1 บทนำ.....	44
7.2 ระบบการถ่ายภาพใบหน้าสามมิติ.....	44
7.3 ข้อมูลภาพสามมิติ.....	51
7.4 การสร้างภาพพื้นผิวสามมิติ.....	53
7.5 เวกเตอร์สัมผัส.....	55
7.6 เวกเตอร์ปกติ.....	56
7.7 คำนวณหาความโค้งเกาส์เซียน.....	57
7.8 การคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลา.....	60
7.9 การคำนวณหาตำแหน่งจุดเด่นเอกลักษณ์.....	62
บทที่ 8 ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง.....	65
8.1 บทนำ.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI นี้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
8.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ.....	66
8.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์..	70
8.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาด หายไปบางส่วน	75
8.5 การทดลองซ้อนทับภาพการและจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติโดยใช้ข้อมูลภาพ บริเวณจมูก	79
8.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ ปกติและอ้าปากค้าง.....	81
8.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สี หน้าแตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล.....	85
บทที่ 9 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง.....	96
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
7.1 ตัวอย่างข้อมูลจุดภาพสามมิติ.....	51
8.1 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่เว้า (สีน้ำตาล) ภายใต้การแปลงต่างๆ	70
8.2 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่นูน (สีน้ำเงิน) ภายใต้การแปลงต่างๆ.....	70
8.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของมิลลิเมตรระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพภายใต้การแปลงต่างๆ	74
8.4 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพในกรณีข้อมูลภาพสามมิติไม่สมบูรณ์.....	78
8.5 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพระหว่างใบหน้าต้นฉบับทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น	80
8.6 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง	84
8.7 ความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการจับคู่ภาพถูกคู่และผิดคู่.....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII นี้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การหาคุณลักษณะเฉพาะที่จุด p ทำให้ได้เครื่องหมายและระยะทาง.....	7
2.2 ตัวอย่างของ point signature ของพื้นผิวชนิดต่างๆ	8
2.3 พื้นผิวและตำแหน่งพิกัดของจุดต่างๆที่ใช้สร้างภาพ Spin image	9
2.4 Spin image ที่ตำแหน่งต่างๆ	9
3.1 เชื่ตของพิกัด (x, y, z) ใน R^3	14
3.2 เส้นโค้ง $at = acost, asint, bt, t \in R$ และเวกเตอร์สัมผัส $\alpha't$	15
3.3 inner product ของ u, v	16
3.4 ความยาวส่วนโค้ง	17
3.5 ผลคูณเชิงเวกเตอร์ $u \times v$	18
3.6 เวกเตอร์สัมผัส α' และอัตราการเปลี่ยนแปลง α''	19
3.7 เวกเตอร์สัมผัส (t) เวกเตอร์ปกติ (n) และระนาบ oscillating plane	19
3.8 พื้นผิว	21
3.9 เวกเตอร์สัมผัส $\partial X/\partial u$ และ $\partial X/\partial v$	22
3.10 ระนาบสัมผัส $Tp(s)$	23
3.11 ค่าความโค้งที่ทิศทางต่างๆ ของรูปครึ่งทรงกระบอก	26
3.12 เวกเตอร์ปกติ และ ความโค้งมูลฐาน.....	28
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง รูปร่างพื้นผิว ความโค้งเกาส์เซียนและความโค้งเฉลี่ย.....	29
4.1 การแปลงเชิงเรขาคณิตชนิดต่างๆ	31
5.1 การคำนวณหาปริมาตรจากสามเวกเตอร์.....	38
5.2 จุดเด่นเอกลักษณ์ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลานบนใบหน้า ก. จุดปริมาตรศูนย์ Zero-volume ($v1$) points ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-torsion ($v2$) points และ ค. จุดปริมาตรศูนย์และจุดแรงบิดเป็นศูนย์.....	39
7.1 ระบบการถ่ายภาพสเตอริโอ.....	46
7.2 การเข้ารหัสไบนารี	47
7.3 การจัดระบบการทดลอง	48
7.4 จำนวนจุดแสงทั้งหมด (1024จุด) ใน ก. กล้องซ้ายและ ข. กล้องขวา	48
7.5 ภาพจุดแสงที่แสดงตำแหน่งจุดต่างๆ ของแต่ละรหัสภาพไว้ตั้งแต่บิตที่ 1 -10 ของภาพซ้าย.....	48
7.6 ภาพขยายให้เห็นตำแหน่งของจุดที่แสงที่คำนวณได้.....	49
7.7 ภาพตำแหน่งจุดต่างๆ ที่คำนวณได้ ของแต่ละรหัสภาพไว้ตั้งแต่บิตที่ 1 -10 ของภาพซ้าย	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8 ภาพตำแหน่งจุดต่างๆ ที่คำนวณได้ ของแต่ละรหัสภาพไว้ตั้งแต่ปีที่ 1 -10 ของภาพขา.....	50
7.9 ภาพพื้นผิวใบหน้าหุ่นมนุษย์ที่สร้างขึ้นได้	50
7.10 ตัวอย่างข้อมูลภาพสามมิติ ของใบหน้า.....	52
7.11 ตัวอย่างข้อมูลภาพสามมิติ ของใบหน้าที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ.....	53
7.12 ตัวอย่างการสร้างจุดตารางบนพื้นที่ -2π ถึง 2π จำนวน 13×13 จุด	54
7.13 การหาพิกัด Z ณ ตำแหน่งตารางจุด (X, Y) จากข้อมูลภาพสามมิติ	54
7.14 ข้อมูลพื้นผิวภาพ 3มิติ ที่นำบริเวณปลายจมูกมาแสดงเท่านั้น.....	55
7.15 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y	56
7.16 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y และเวกเตอร์ปกติ	57
7.17 ความโค้งเกาส์เซียน	58
7.18 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูก.....	59
7.19 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูกที่ปรับระดับการแสดงผล	59
7.20 เส้นโค้งเชิงพาราโบลابرเวณปลายจมูกซึ่งคำนวณจากบริเวณที่ค่าความโค้งเกาส์เซียนเท่ากับ ศูนย์	60
7.21 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาบนใบหน้า.....	61
7.22 เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าที่แสดงอยู่บนใบหน้าที่ระดับสีของความโค้งเกาส์เซียน.....	61
7.23 เส้นโค้งเชิงพาราโบลابرเวณปลายจมูก	62
7.24 เส้นโค้งเชิงพาราโบล่าที่แสดงเวกเตอร์เส้นสัมผัสเป็นสีฟ้า เวกเตอร์ปกติเป็นสีชมพูและเวกเตอร์ที่แสดงแรงบิดเป็นสีน้ำเงิน.....	62
7.25 เส้นโค้งเชิงพาราโบลابرเวณปลายจมูกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง)	63
7.26 เส้นโค้งเชิงพาราโบลابرเวณปลายจมูกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง)	63
7.27 จุดเอกลักษณ์บนใบหน้า (*) ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า	64
8.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพความโค้งเกาส์เซียน.....	66
8.2 รูปร่างพื้นผิวของใบหน้าต้นฉบับหน้าตรง	68
8.3 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบหมุน ก.ก้มหน้า 10 องศา ข.หันหน้าไปทางขวา 10 องศา ค.เงยหน้า 10 องศา ง.เอียงคอไปทางขวา 10 องศา.....	68
8.4 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบยืดขนาด ก.ยืดขนาดตามแกน X 10% ข.ยืดขนาดตามแกน Y 10% และ ค.ยืดขนาดตามแกน Z 10%.....	69
8.5 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลง ก. เือนตามแกน X 10%.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.6 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา.....	72
8.7 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับ.....	73
8.8 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้าภายใต้การแปลงแบบหมุน.....	73
8.9 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าภายใต้การแปลงขยายขนาด.....	73
8.10 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงแบบเฉือน.....	74
8.11 ลำดับขั้นตอนการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติ.....	76
8.12 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก. ภาพด้านหน้าก่อนการซ้อนทับภาพ ข. ภาพด้านหน้าหลังการซ้อนทับภาพ ค. ภาพด้านข้างก่อนและ ง. หลังการซ้อนทับภาพ.....	77
8.13 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก. ภาพด้านล่างก่อนการซ้อนทับภาพ และ ข. ภาพด้านล่างหลังการซ้อนทับภาพ.....	77
8.14 บริเวณใบหน้าที่นำมาใช้ในการคำนวณความผิดพลาดของระยะทาง.....	78
8.15 ภาพก่อนและหลังการซ้อนทับภาพระหว่างใบหน้าที่ทั้งหมดกับเฉพาะบริเวณจมูก.....	79
8.16 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอาการผิดปกติและอ้าปากค้าง.....	82
8.17 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าอารมณ์ปกติ ก. อารมณ์สีหน้าปกติ ข. อารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และ ค. จุดเด่นเอกลักษณ์ที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนใบหน้าอารมณ์ปกติ.....	83
8.18 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ก.ใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ข.เส้นโค้งเชิงพาราโบลาขณะอ้าปากค้าง และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าขณะอ้าปากค้าง..	83
8.19 ภาพใบหน้าก่อนและหลังการซ้อนทับและจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติ.....	84
8.20 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกัน.....	87
8.21 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูล GavabDB โดยแสดงผลค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ที่ด้านข้างของคู่ภาพด้วย.....	88
8.22 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ ICP แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย.....	89
8.23 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ CPD และแสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย.....	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การซ้อนทับภาพและจัดเรียงภาพระยะทางสามมิติให้ตรงกัน หมายถึงการนำภาพสามมิติของวัตถุชิ้นหนึ่งมาซ้อนทับกับภาพของวัตถุอีกชิ้นหนึ่งและต้องซ้อนทับได้สนิทพอดีโดยที่ภาพวัตถุทั้งสองต้องอยู่ในระบบพิกัดเดียวกัน ทำได้ด้วยการจับคู่ข้อมูลที่สอดคล้องกันของภาพทั้งสอง โดยที่ข้อมูลนั้นอาจเป็น จุด ส่วนโค้ง รูปร่าง หรือ ความเข้มของภาพ การซ้อนทับภาพและการจัดเรียงภาพให้ตรงกัน เป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่งในการนำภาพมาประยุกต์ใช้งาน เช่น การผสมภาพ (Image fusion) ระหว่างภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์กับภาพที่ได้จากเครื่องโพสิตรอนอิมิสชันโทโมกราฟี (PET-CT fusion image) การวางแผนการรักษาด้วยการฉายรังสี (Radiotherapy treatment planning) การทำให้คอมพิวเตอร์เข้าใจทัศนียภาพ (Computer vision) การรู้จำใบหน้า รูปทรง (Recognition) เพื่อการระบุตัวตน (Identification) เป็นต้น

ในการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงภาพใบหน้าให้ตรงกันนั้น เป็นเรื่องที่ยากยิ่งเนื่องจากใบหน้าบุคคลไม่คงที่ แปรเปลี่ยนไปตามกาลเวลา และขณะที่อารมณ์ไม่เหมือนกันก็ทำให้รูปร่างใบหน้าเปลี่ยนแปลงไปได้ ทำให้เป็นอุปสรรคในการรู้จำใบหน้าบุคคล การใช้ภาพถ่ายปกติแบบสองมิติมาใช้ในกรณีนี้มีปัญหาค่อนข้างสูงแม้เพียงแสงเปลี่ยนไปก็ทำให้ภาพถ่ายไม่เหมือนเดิมได้ การใช้ภาพถ่ายสามมิติจึงถูกนำมาใช้ในระบบการรู้จำมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการถ่ายภาพใบหน้าแบบสามมิติ
2. เพื่อศึกษาการซ้อนทับภาพสามมิติและการจัดเรียงให้ตรงกันของภาพใบหน้าสามมิติ
3. เป็นแนวทางในการระบุตัวบุคคลขณะที่มีอารมณ์สีหน้าต่างๆ

1.3 สมมติฐานในการทำวิจัย

1. ส่วนโค้ง ส่วนเว้าและรอยหยักบนใบหน้า น่าจะเป็นเอกลักษณ์ เฉพาะบุคคลที่สามารถนำมาใช้ ในการซ้อนทับภาพ จัดเรียงภาพให้ตรงกัน หรือระบุตัวบุคคลได้
2. เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ น่าจะนำมาใช้ในการค้นหาเอกลักษณ์บนใบหน้าบุคคลได้
3. การใช้ข้อมูลสามมิติของลักษณะพื้นผิวเฉพาะที่บนใบหน้า น่าจะนำมาในการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับกันของใบหน้าสามมิติได้
4. การลดขนาดของข้อมูลลงจะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย

ทฤษฎีหลักที่ใช้ในการทำวิจัยคือเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential Geometry) โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิว ณ จุดนั้นๆ เปรียบเทียบกับพื้นผิวรอบข้างใกล้เคียง ทำให้ทราบรูปร่างว่าเป็นส่วนเว้า ส่วนนูนของพื้นผิว จากข้อมูลนี้ทำให้สามารถคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลาได้ (Parabolic contour curve) และนำไปสู่การคำนวณหาการบิดงอ (Torsion) ของเส้นจนได้จุดที่เกิดการเปลี่ยนมุม ทิศทาง หรือระนาบ (Inflection point) ในการเคลื่อนที่บนเส้นโค้งนี้ ซึ่งเป็นจุดที่เราเรียกว่าจุดแรงบิดเป็นศูนย์ (Zero torsion) ซึ่งยั่งยืนหรือคงสภาพอยู่ได้แม้ว่าอารมณ์สีหน้าจะเปลี่ยนไป

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพใบหน้าสามมิติ
2. หาจุดเด่นเอกลักษณ์ของแต่ละใบหน้า
3. จับคู่ใบหน้าที่เป็นของบุคคลคนเดียวกัน
4. ซ้อนภาพใบหน้าและจัดเรียงให้ตรงกัน
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการ Iterative Closet Point (ICP) และ Coherent Point Drift (CPD)

1.6 โครงร่างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 9 บท โดยมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ตลอดจนสมมติฐานที่ใช้และขอบเขตของการวิจัย

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

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 การแปลงเรขาคณิต (Geometric transform) และระบบพิกัดโฮโมจีเนียส

บทที่ 5 อธิบายทฤษฎีใหม่ที่นำมาใช้ในการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติ เป็นการหาจุดเด่นเอกลักษณ์ของพื้นผิว จากเส้นโค้งเชิงพาราโบลา เวกเตอร์สัมผัส เวกเตอร์ปกติ การหาปริมาตรสาม เวกเตอร์ จุดที่ปริมาตรสามเวกเตอร์เป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา (Zero-Volume) จุดแรงบิดเป็นศูนย์ (Zero-Torsion) บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

บทที่ 6 เป็นการอธิบายถึงขั้นตอนการจัดเรียงพื้นผิวใบหน้าสามมิติให้ตรงกัน ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 การสร้างอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพใบหน้าแบบสามมิติ การสร้างพื้นผิว ขั้นตอนการ
คำนวณตัวแปรและภาพตัวอย่างของผลการคำนวณ

บทที่ 8 ขั้นตอนกระบวนการทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 9 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

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

การซ้อนทับภาพและการจัดภาพให้ตรงกันนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่งในการนำภาพมาประยุกต์ใช้งาน 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 การทำงานโดยการใช้ความเข้มเป็นหลักนี้จำเป็นต้องคำนวณซ้ำหลายครั้งจนได้ผลดีที่สุดและเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานที่ผลการจัดภาพให้ตรงกันจะผิดพลาด อันเนื่องจากจุดสนใจมีหลายจุด (local minima and local maxima) จึง

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องกำหนดจุดเริ่มต้นในการคำนวณคร่าวๆ 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] แต่ว่าประสิทธิภาพไม่ดีขึ้นในกรณีที่ต้องการจัดภาพให้ตรงกันระหว่างภาพสองมิติกับสามมิติ ส่วนงานอื่นที่พบว่าใช้หลักการของความเข้มเช่นการใช้ normalized cross correlation [7] entropy of difference image [8] gradient correlation [9] และ pattern intensity [10]

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

สำหรับแบบการตรวจจับความสมมาตรของพื้นผิว นั้นใช้ได้กับสิ่งของที่มีลักษณะสมมาตรเท่านั้น โดยประสิทธิภาพจะลดลงตามความไม่สมมาตรของวัตถุนั้น [11] ส่วนวิธีการที่เป็นที่นิยมมากอันหนึ่งคือ อาศัยลักษณะทางกายภาพที่คงตัว (geometric invariance-based) [12] แต่ต้องทำงานซับซ้อนแม้ว่าจะเป็นพื้นผิวต่างๆไป [13] เทคนิคแผนที่ระยะทาง ใช้วิธีการคำนวณระยะทางระหว่างจุดจำเป็นต้องคำนวณซ้ำหลายรอบเพื่อหาจุดที่ใกล้กันมากที่สุด วิธีการนี้เหมาะสมมากสำหรับงานที่มีข้อมูลภาพไม่สมบูรณ์แต่ทำงานได้ค่อนข้างช้าเมื่อจำเป็นต้องมีการแปลงมากกว่าแบบตายตัว เช่น similarity, affine และ weak perspective โดยทีมนักวิจัยของ Pelizzari [14] ได้พัฒนาวิธีการคำนวณแบบอัตโนมัติสำหรับการจัดภาพสามมิติที่ได้จากเครื่องสร้างภาพคนละเครื่อง โดยคำนวณค่าการแปลงจากค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดที่คำนวณได้จากค่ากำลังสองเฉลี่ยระหว่างภาพ MRI และ CT และจำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งซ้อนทับภาพแบบคร่าวๆไว้ก่อนด้วยเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากรูปร่างที่คล้ายกัน ส่วนทีมของ Grimson [15] ได้พัฒนาการทำงานแบบอัตโนมัติที่ไม่ต้องกำหนดจุดเริ่มต้นของการคำนวณให้ โดยเขาได้ใช้วิธีการสุ่มจุดเริ่มต้นขึ้นมาแทน

Jian และ Vemuri [16] ได้ใช้ Gaussian mixture model (GMM) ซึ่งมองว่าจุดในพิกัดสามมิติของแต่ละภาพนั้น จะถูกแทนที่ด้วยส่วนที่ผสมกันแบบเกาส์เซียนและคำนวณหาการแปลงที่เหมาะสมจากส่วนผสมของตัวแทนเกาส์เซียนของภาพทั้งสอง วิธีการนี้ Myronenko and Song [17] ได้นำมาใช้ โดยการทำ Maximum likelihood จาก centroids ของ GMM แล้วบังคับให้ centroid การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่พร้อมๆกัน (coherent) เป็นกลุ่ม และเรียกวิธีนี้ว่า Coherent Point Drift (CPD) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่ผู้วิจัยนำมาเปรียบเทียบ

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

Land mark-mapping alignment เป็นการใช่วิธีที่เด่น มาทำเป็นแผนผังเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเด่นบนภาพทั้งสอง แล้วคำนวณหาการแปลงระหว่างพิกัดเด่นนั้น เรามักใช้ลักษณะทางกายภาพมาหาพิกัดเด่นเช่น ร่องข้างจมูก สันจมูก โหนกแก้ม ทางตา เป็นต้น ดังเช่น [19-22] หรืออาจใช้จุดตัดของเส้น [23] บริเวณที่ค่าความโค้งสูงสุด (local curvature maxima) [24-26] จุดกึ่งกลางของพื้นผิวรูปปิด (centroid of closed-boundary region) [27] จุดที่เป็นปม [28] (knot point) และจุดหักเห (inflection point) [29] ผู้วิจัยบางคณะก็ใช้วิธีผสมกันของจุดเด่นหลายอย่าง ดังเช่น [30] และ [31]

มีการใช้แนวสันสัน (ridge line) ที่ได้จากข้อมูลภาพสามมิติเพื่อสร้าง เส้นสันสูงสุด (crest line) [32, 33] โดยหาแนวสันสันจากค่าความโค้งสูงสุด Govindo และ Shecker [34] ได้ใช้ ค่าความโค้งของลักษณะทางกายภาพเพื่อหาความเหมือนกันระหว่างภาพสองภาพ

2.3 วรรณกรรมที่เป็นแนวคิดในการวิจัย

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการซ้อนทับภาพระยะสามมิติ จึงแบ่งวรรณกรรมของการซ้อนทับภาพระยะสามมิติตามที่ Joaquim Salvi [35] และคณะได้แบ่งชนิดของการซ้อนทับภาพระยะสามมิติไว้กว้างๆ สองวิธีคือแบบหยาบและแบบละเอียด การซ้อนทับแบบหยาบนั้นทำเพื่อคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงแบบไม่ยืดหยุ่น (Rigid Motion) ระหว่างกลุ่มข้อมูลภาพสามมิติ (3D Point Cloud Data) ส่วนการซ้อนทับแบบละเอียดนั้นมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกันแต่ต้องการความถูกต้องมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ มักจำเป็นต้องลงทะเบียนแบบหยาบมาก่อน และไม่สนใจเวลาที่ใช้ในการทำงานมากนัก

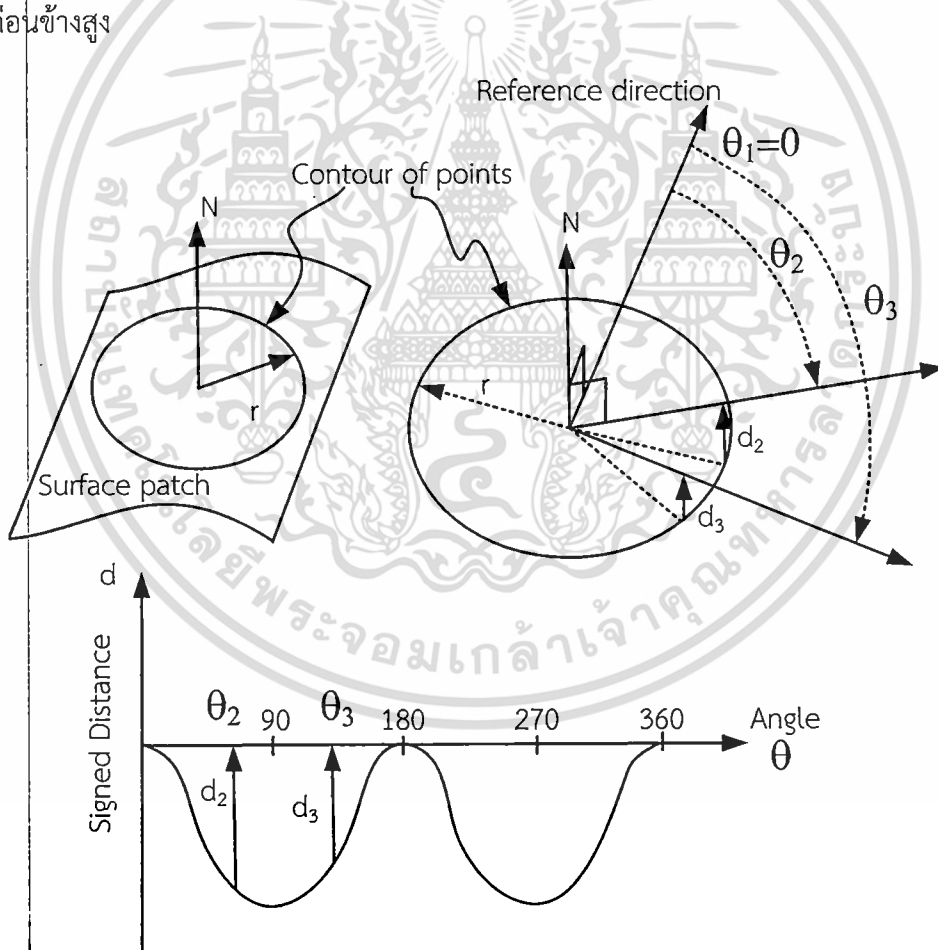
2.4 การซ้อนทับภาพระยะสามมิติแบบหยาบ (Coarse registration methods)

การซ้อนทับภาพแบบหยาบนั้นมักใช้ในการซ้อนทับภาพก่อนที่จะทำการซ้อนทับแบบละเอียด อาจเรียกว่าเป็นการเริ่มต้น (Initial alignment) ก่อนการซ้อนทับจริง แยกตามลักษณะการใช้คุณลักษณะเฉพาะได้ดังนี้

2.4.1 Point Signature [36]

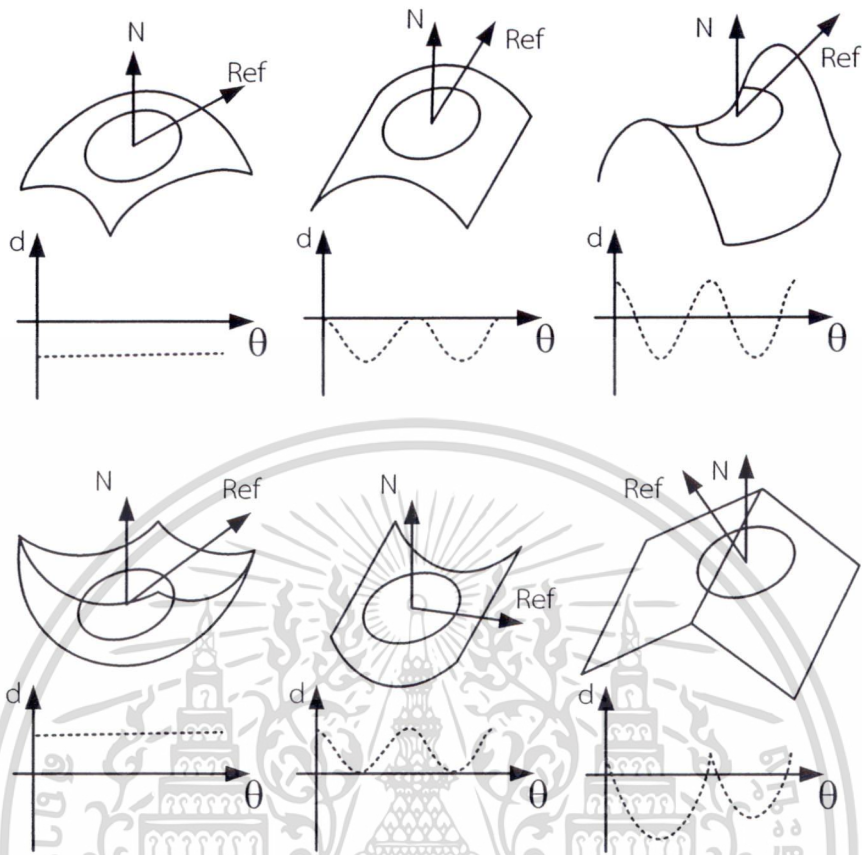
กำหนดให้ p เป็นจุดศูนย์กลางของทรงกลมมีรัศมี r ทำให้เกิดจุดตัดกับพื้นผิวที่ Contour point โดยมี N เป็น เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวที่จุด p และกำหนดให้ Reference Direction เป็น เวกเตอร์ปกติอีกอันหนึ่งที่ตั้งฉากกับ N ซึ่งเป็นมุมที่ $\theta=0$ เมื่อหมุนระนาบของ Reference Direction รอบแกนของเวกเตอร์ปกติ N จะสามารถหาเครื่องหมายบวกหรือลบและหาระยะทางจากพื้นผิวถึงระนาบของ Reference Direction ได้ดังรูปที่ 2.1 และนำมาใช้เป็นคุณลักษณะของพื้นผิวของจุด p ต่อไป ตัวอย่างของ Signature point ได้แสดงดังรูปที่ 2.2

ข้อเสียของวิธีนี้คือ คำนวณจุดตัดกันระหว่างทรงกลมกับพื้นผิวได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะเมื่อพื้นผิวนั้นเป็นกลุ่มข้อมูลภาพสามมิติหรือพื้นผิวรูปสามเหลี่ยม ในเหตุการณ์เช่นนี้ต้องมีการประมาณ (Interpolation) เข้าช่วยซึ่งทำให้ต้องเสียเวลาในการคำนวณมากขึ้น นอกจากนี้ยังไวต่อสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.1 การหาคุณลักษณะเฉพาะที่จุด p ทำให้ได้เครื่องหมายและระยะทาง

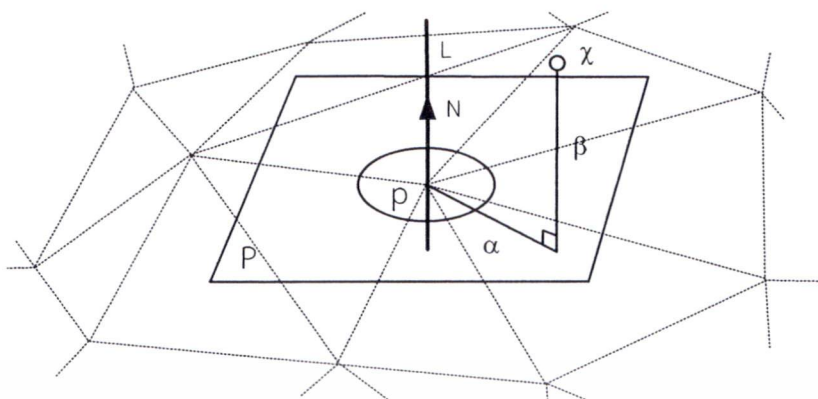
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



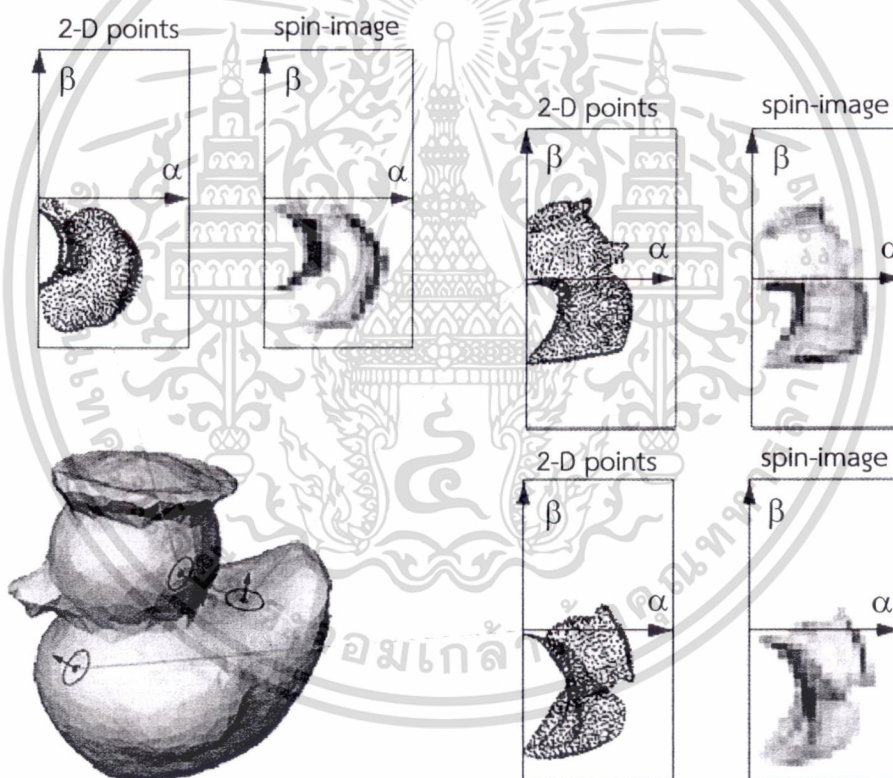
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของ Point signature ของพื้นผิวชนิดต่างๆ

2.4.2. Spin image [37]

เป็นการนำเอาพื้นผิวสามมิติมาทำเป็นสองมิติ มีขั้นตอนคล้ายกับ Point signature มีวัตถุประสงค์เพื่อการรู้จำภาพ แต่ก็มีนำมาใช้ในงานซ้อนทับภาพด้วย รูปที่ 2.3 แสดงจุดสนใจ p เวกเตอร์ปกติ ระนาบสัมผัส P รูปที่ 2.4 ภาพ Spin Image ที่สร้างขึ้นได้จากเทคนิคนี้ เช่น ระนาบ P จุด p เวกเตอร์ปกติ N ระยะ $\alpha = \sqrt{\|x - p\|^2 - (n(x - p))^2}$ และ $\beta = n(x - p)$ เมื่อ p เป็นจุดสนใจ N เป็น เวกเตอร์ปกติ x เป็นเซตของจุดใกล้เคียงที่ใช้สร้าง spin image ที่แทนด้วย α บนแกน X และ β บนแกน Y



รูปที่ 2.3 พื้นผิวและตำแหน่งพิกัดของจุดต่างๆที่ใช้สร้างภาพ Spin image



รูปที่ 2.4 Spin image ที่ตำแหน่งต่างๆ

ข้อดีของการใช้ วิธีนี้คือ มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง ใช้งานได้กับภาพสามมิติ

ยกเว้นวัตถุที่สมมาตรและมีพื้นผิวซ้ำๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3. Principal component analysis [38]

วิธีนี้อาศัยทิศทางของแกนของข้อมูลเป็นหลักในการเปรียบเทียบ เมื่อสามารถหาเวกเตอร์การแปลงที่เหมาะสมจากการแปลงแกนหลักและนำมาใช้ในการแปลงข้อมูลภาพ ถ้าข้อมูลมากพอก็จะทำให้แกนหลักของข้อมูลจากทั้งสองภาพสามารถทับกันได้พอดี วิธีนี้ทำงานได้เร็วมากและจะให้ผลดีเมื่อมีข้อมูลจำนวนมากพอ และจะได้ผลลดลงเมื่อข้อมูลที่ซ้อนทับกันของภาพทั้งสองมีน้อยลงในทางปฏิบัติมักต้องการการซ้อนทับของข้อมูลมากกว่าครึ่งหนึ่ง ทำให้จำเป็นต้องใช้วิธีการอื่นจัดภาพให้ตรงกันอย่างหยาบก่อน

2.4.4. Ransac-based darces [39]

ใช้วิธีหาจุดสามจุดจากภาพทั้งสองที่สอดคล้องกันนำมาหาเวกเตอร์การแปลงระหว่างภาพทั้งสองและมีการคำนวณลักษณะนี้อีกหลายจุดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองภาพให้มากที่สุดความสำเร็จของวิธีนี้อยู่ที่จำนวนความสัมพันธ์ของภาพทั้งสอง ความแม่นยำยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของพื้นผิวของข้อมูลภาพด้วย นอกจากนี้เวลาที่ใช้คำนวณก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนจุดมีมากขึ้น วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ไม่สนใจเรื่องความเร็วในการทำงาน

2.4.5. Algebraic surface model

วิธีนี้ Tare[40] และคณะได้นำวิธีการหาโพลีโนเมียลมาประมาณค่าการแปลงของภาพ โดยเริ่มจากการหารูปแบบโพลีโนเมียลของทุกจุดในภาพ ทำให้ต้องคำนวณข้อมูลจำนวนมากซ้ำหลายครั้ง ต่อมามีการนำการแปลงแบบเชิงเส้นมาใช้ซึ่งทำให้สามารถคำนวณได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องการบริเวณที่ซ้อนทับกันของภาพอย่างน้อย 15%

2.4.6. Line-based algorithm

มีการใช้ เส้นตรงบ้าง เส้นโค้งบ้างในการนำมาเป็นคุณลักษณะเฉพาะ Stamos and Leordeanu [41] ใช้เส้นตรง Wyngaerd [42] ใช้ทั้งเส้นตรงและเส้นโค้ง วิธีการนี้เหมาะสมกับวัตถุขนาดใหญ่ที่มีเส้นเป็นแนวตรงเช่น อาคารซึ่งสามารถคำนวณหาเส้นตรงได้ง่าย วิธีนี้มีความแตกต่างจากวิธีอื่นที่กล่าวมาตรงที่มีการใช้มากกว่าจุดแต่เป็นการใช้ เส้นหรือเส้นโค้งแทนเรียกได้ว่ามีทิศทางและระนาบของคุณลักษณะเฉพาะมากขึ้น ทำให้ความคงทน (Robustness) มากขึ้น

2.4.7. Genetic algorithm

เป็นวิธีที่ Brunnstrom and Stoddart [42] ได้นำเวกเตอร์สี่เวกเตอร์จากจุดที่สนใจสองจุด (i, j) บนพื้นผิวเดียวกันมาใช้ในการคำนวณ ประกอบด้วย เวกเตอร์พิกัดสองเวกเตอร์ r_i และ r_j และ

เวกเตอร์ปกติสองเวกเตอร์ \vec{n}_1 และ \vec{n}_2 บนพื้นผิวเดียวกันมาคำนวณ วิธีการนี้ให้ผลที่ดีแต่ต้องใช้ทรัพยากรในการประมวลผลมากโดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีขนาดใหญ่และมีจุดที่สอดคล้องกันจำนวนมาก

2.4.8. Principal curvature

เริ่มมาจาก Feldmar and Ayache [43] ได้นำความโค้งหลัก (Principle Curvature) มาใช้พบว่าสามารถใช้ความสอดคล้องของภาพเพียงอันเดียวก็สามารถหาเวกเตอร์การแปลงระหว่างภาพทั้งสองได้ โดยการคำนวณ ความโค้งหลัก (k_1, k_2) และเวกเตอร์ปกติ คำนวณหาค่าการแปลงของเวกเตอร์หลักของภาพทั้งสอง อย่างไรก็ตาม การคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงนี้ต้องมีการทำซ้ำจนถึงความถูกต้องเท่าที่กำหนดไว้

2.5. การซ้อนทับภาพแบบละเอียด (Fine registration methods)

การซ้อนทับภาพแบบละเอียดจะนำมาใช้เมื่อการซ้อนทับภาพแบบหยาบได้ถูกนำมาใช้แล้ว หรืออาจเรียกว่าเป็นการเดาค่าเริ่มต้น (Initial guess) ก่อนทำการซ้อนทับแบบละเอียดซึ่งต้องมีการทำซ้ำเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ส่วนใหญ่มักเป็นการทำให้ระยะทางระหว่างจุดที่สัมพันธ์สอดคล้องกันมีระยะทางหลังการซ้อนทับแล้วต่ำที่สุด แต่ก็มีบางวิธีที่ใช้จุดของภาพแรกให้ใกล้เคียงระนาบสัมผัสของภาพที่สองมากที่สุด

2.5.1. Control points

มีการใช้จุดทุกจุดของภาพเพื่อการซ้อนทับภาพ [44, 45] บางวิธีก็ใช้วิธีเก็บตัวอย่างบางจุดมาใช้งานซึ่งมีทั้งการเก็บตัวอย่างแบบสม่ำเสมอ (Uniform sub sampling) [46, 47] แบบสุ่ม (Random sampling) หรือการเก็บตัวอย่างแบบปกติ (Normal sampling) [48] ในกรณีทั่วไปพบว่า การเก็บตัวอย่างแบบปกติให้ผลลัพธ์ที่ดี เนื่องจากเหตุผลสองประการคือ ใช้เวลาน้อยในการสุ่มข้อมูล และได้ข้อมูลที่อยู่ในบริเวณที่มีนัยสำคัญมากกว่าการสุ่มข้อมูลแบบสม่ำเสมอซึ่งมักพบในรูปร่างที่ไม่มีขอบคมมากนัก

2.5.2. Points weight

แม้ว่าบางวิธีจะให้น้ำหนักของทุกๆจุดเท่ากัน [44] แต่ก็มีบางวิธีที่ให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากันโดยใช้ระยะทางที่สอดคล้องกันของจุดทั้งสองภาพ [49] ใช้ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของเส้นปกติ และใช้ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของเมตริกซ์โควาเรียนซ์ [50]

2.5.3. Iterative closest point (ICP)

เป็นวิธีการที่นิยมมาก โดยอาศัยหลักการที่พยายามลดระยะทางระหว่างจุดที่สอดคล้องกันให้ต่ำที่สุด เสนอโดย Besl and McKay [44] โดยมีขั้นตอนพอสังเขปดังนี้ หลังจากที่เราได้ทำการซ้อนทับแบบหยาบมาแล้ว ก็จะใช้ข้อมูลทุกๆจุดในภาพแรกมาคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงสู่ภาพที่สองแล้วนำมาแปลงข้อมูลภาพที่หนึ่งสู่ภาพที่สอง ขั้นตอนต่อมาคือ คำนวณหาความแตกต่างของระยะทางที่ต่างกันระหว่างภาพที่แปลงจากภาพที่หนึ่งกับภาพที่สอง ถ้าผลต่างยังคงสูงกว่าระดับที่กำหนดไว้ก็กลับไปคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงใหม่จนกว่าจะได้ผลต่างของระยะทางถึงระดับที่ต้องการ นับว่าวิธีการ ICP นี้เป็นวิธีที่ให้ผลการซ้อนทับภาพที่ดีมาก แต่ต้องคำนวณซ้ำหลายรอบจนกว่าผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และอาจพบข้อผิดพลาดในกรณีที่ผลการคำนวณตกลงไปในส่วนที่เรียกว่า local minimum

2.5.4. Method of Chen

ในปี คศ.1991 Chen and Medioni [45] ได้นำเสนอวิธีการที่คล้ายๆกับ ICP แต่เป็นการหาระยะทางที่ต่ำสุดระหว่างจุดภาพแรกกับระนาบสัมผัสของภาพที่สอง ทำให้กระบวนการคำนวณทำได้ยากกว่า ICP แต่ใช้จำนวนครั้งในการคำนวณน้อยกว่าและให้ผลที่ดีกว่า

2.5.5. Matching signed distance fields

เมื่อปี 2001 Masuda [51, 52] ได้นำเสนอวิธีใหม่โดยใช้การจับคู่กันของเครื่องหมายค่าระยะทาง ทำให้ได้วิธีที่คงทนอันหนึ่งและสามารถซ้อนทับภาพพร้อมๆกันได้หลายภาพในเวลาเดียวกัน

2.5.6. Genetic algorithms

วิธีนี้ Chow et al. [53] ได้นำวิธีการ Dynamic genetic algorithms มาใช้ด้วยการหาพารามิเตอร์ 6 ตัว ประกอบด้วย เวกเตอร์การย้ายตำแหน่ง 3 ตัว และ มุมของเวกเตอร์การหมุน 3 ตัว ใช้ค่ามีเดียในการคำนวณค่าความผิดพลาดของการซ้อนทับ นอกจากนี้ยังสามารถซ้อนทับภาพได้พร้อมกันหลายภาพอีกด้วย ในปีเดียวกันนั่นเอง Silva [54] และคณะ ได้นำวิธีเดียวกันมาใช้โดยที่ไม่ต้องมีการซ้อนทับแบบหยาบก่อนเลย และยังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับ local minima ส่วนปัญหาอย่างหนึ่งของวิธีนี้ก็คือเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ

2.5.7 Coherent point drifts (CPD)

Jian และ Vemuri [16] ได้ใช้ Gaussian mixture model(GMM) ซึ่งมองว่าจุดในพิกัดสามมิติของแต่ละภาพนั้น จะถูกแทนที่ด้วยส่วนที่ผสมกันแบบเกาส์เซียนและคำนวณหาการแปลงที่เหมาะสมจากส่วนผสมของตัวแทนเกาส์เซียนของภาพทั้งสอง วิธีการนี้ Myronenko and Song [17] ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ โดยการหา Maximum likelihood จาก centroids ของ GMM แล้วบังคับให้ centroid เคลื่อนที่พร้อมๆกัน (Coherent) เป็นกลุ่ม และเรียกวิธีนี้ว่า Coherent Point Drift (CPD) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่ผู้วิจัยนำมาเปรียบเทียบการทำงาน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการที่ผสมผสานการทำงานระหว่าง การใช้จุดเด่นของลักษณะทางกายภาพ (landmark) และเป็น ลักษณะทางกายภาพที่คงตัว (geometric invariance) โดยการคำนวณหาจุดที่เป็นลักษณะทางกายภาพที่คงตัวนี้ด้วยอนุพันธ์อันดับสูงของเส้นโค้งและพื้นผิวซึ่งมีความไวสูงในการบอกความแตกต่าง เราได้เสนอวิธีการใหม่ขึ้นมาสองประการด้วยกันคือ 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, $v_1 = 0$) และยังคงสภาพอยู่ได้ภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์ (การหมุน การเปลี่ยนขนาด การเลื่อนตำแหน่ง และการเฉือน) และที่ตำแหน่ง (Zero-torsion, $v_2 = 0$) ซึ่งสัมพันธ์กับแรงบิดที่วิ่งอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ณ ตำแหน่งที่การบิดเปลี่ยนกลับจากลบเป็นบวก หรือ เปลี่ยนจากด้านบวกเป็นลบจะหมายถึงตำแหน่งที่มีการหักงอของพื้นผิวซึ่งจะคงสภาพเดิมอยู่ได้ภายใต้การแปลงรูปร่าง ประการที่สองคือ การเสนอแนวคิดใหม่ในการหาจุดที่สอดคล้องกันของภาพทั้งสองโดยการใช้ค่าอัตราส่วนของปริมาตรที่ได้จากผลลัพท์สามเวกเตอร์ของจุดแรงบิดเป็นศูนย์ที่วิ่งอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

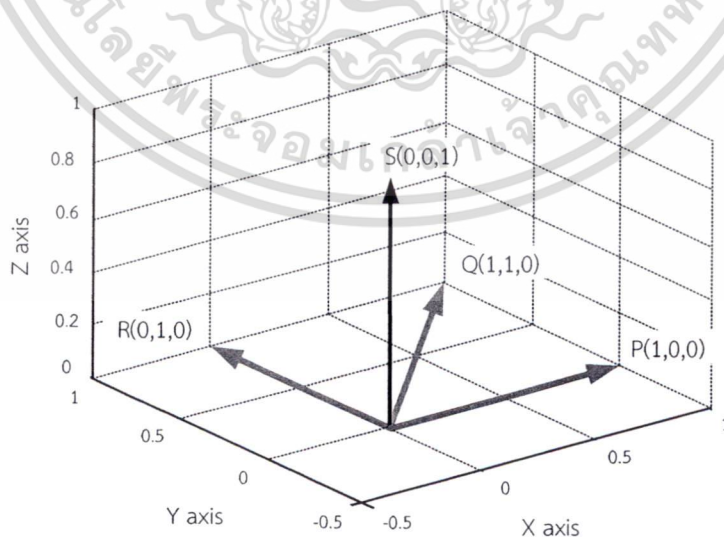
บทที่ 3

เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์

(Differential Geometry)

3.1 บทนำ

เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์หมายถึงการศึกษาคุณสมบัติของเส้นโค้งและพื้นผิวด้วยการใช้แคลคูลัสเชิงอนุพันธ์ (Differential calculus) หรือกล่าวว่าเป็นการอธิบายรูปร่างหรือรูปทรงเรขาคณิตด้วยอนุพันธ์ เป็นศึกษาในเรื่องเส้นโค้ง (Curve) และพื้นผิว (Surface) หรือสิ่งที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ (Differentiable) ทำให้เรื่องเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์เป็นการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างที่ไม่เป็นเหลี่ยมหรือมีมุมต่างๆ สิ่งแรกที่เราสามารถหาอนุพันธ์ได้จากเส้นโค้งหรือพื้นผิวก็คือเส้นสัมผัส (Tangent) ในกรณีที่เส้นโค้งจะเป็นเวกเตอร์ที่สัมผัสกับเส้นโค้งนั้น แต่ถ้าเป็นพื้นผิวจะหมายถึงระนาบที่สัมผัส (Tangent plane) กับพื้นผิวนั้น ในการใช้อนุพันธ์นั้นจะไม่ใช่อ้างอิงถึงพิกัดใดพิกัดหนึ่งเป็นหลัก (no global) แต่เป็นการวัดหรือเปรียบเทียบกับเส้นสัมผัส ระนาบที่สัมผัส (Local tangent) หรือเส้นหรือระนาบที่ตั้งฉาก (Normal) กับเส้นหรือพื้นผิวนั้น ซึ่งทำให้ได้เส้นระดับ (Contour) สัน (Ridge) และร่อง (Valleys) ของพื้นผิว กล่าวสั้นๆว่าเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ เป็นการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะที่ (local) ของเส้นโค้งและพื้นผิวโดยเทียบกับจุดหรือผิวใกล้เคียงโดยใช้อนุพันธ์ดังนั้นเส้นโค้งหรือพื้นผิวนั้นต้องหาอนุพันธ์ได้ รูปที่ 3.1 ระบบพิกัด (X,Y,Z)

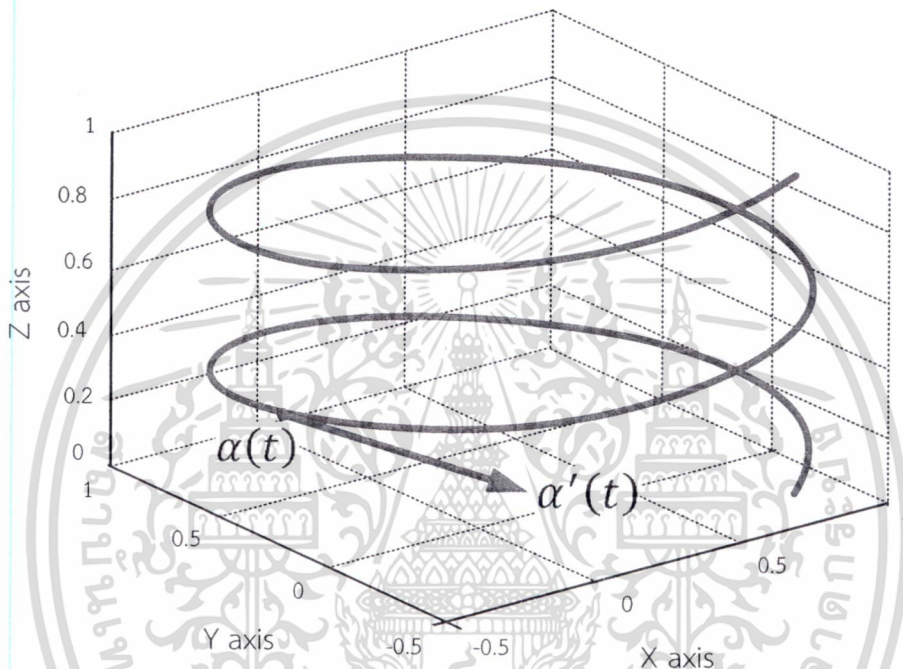


รูปที่ 3.1 เซ็ตของพิกัด (x, y, z) ใน R^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 พารามิเตอร์เส้นโค้ง (Parameterized curves)

เส้นโค้งใน R^3 เป็นเซตของจุดพิกัด (x, y, z) ของจำนวนจริงที่สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้หลายอันดับซึ่งเป็นเส้นโค้งที่ต่อเนื่อง อาจแทนด้วยจุดบนเส้นโค้งด้วย $\alpha(t) = (x(t), y(t), z(t)) \in R^3$ ตัวแปร t เรียกว่าเป็นพารามิเตอร์ของเส้นโค้ง α ถ้าหนดให้ $x'(t)$ เป็นอนุพันธ์อันดับแรกของ x ที่จุด t และ $\alpha'(t) = (x'(t), y'(t), z'(t)) \in R^3$ เป็นเวกเตอร์สัมผัส (tangent vector) หรือเวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) ของเส้นโค้ง α ที่จุด t ดังตัวอย่างใน รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เส้นโค้ง $\alpha(t) = (a \cos t, a \sin t, bt)$, $t \in R$ และเวกเตอร์สัมผัส $\alpha'(t)$

ผลคูณเชิงสเกลาร์หรือผลคูณจุด (inner product หรือ dot product) ของเวกเตอร์

กำหนดให้ $u = (u_1, u_2, u_3) \in R^3$ เราสามารถคำนวณขนาด (length หรือ norm) ได้เท่ากับ

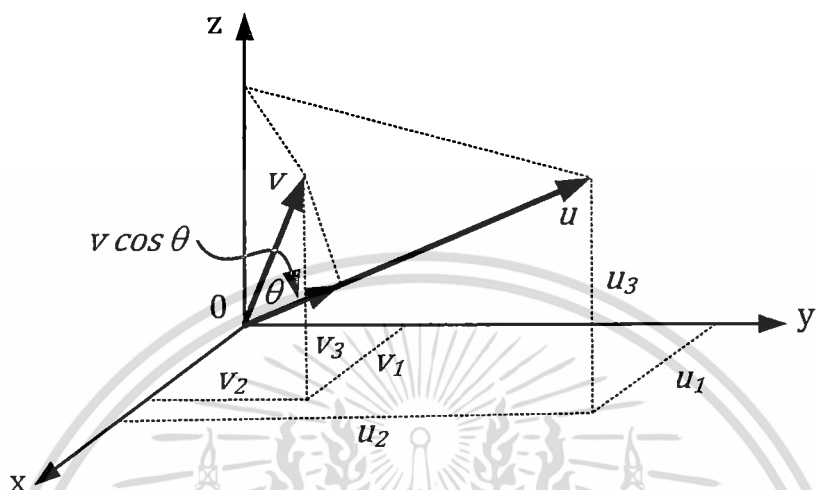
$$|u| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (3.1)$$

$|u|$ เป็นระยะทางจากจุดกำเนิด $o = (0, 0, 0)$ เมื่อให้ $u = (u_1, u_2, u_3)$ และ $v = (v_1, v_2, v_3) \in R^3$ จะสามารถคำนวณ inner product หรือ dot product ของเวกเตอร์ ดังในรูปที่ 3.3 ซึ่งคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u \cdot v = |u||v| \cos \theta \quad (3.2)$$

เมื่อ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ u และ v



รูปที่ 3.3 inner product ของ u, v [55]

ถ้าให้ $e_1 = (1,0,0)$ $e_2 = (0,1,0)$ และ $e_3 = (0,0,1)$ จะพบว่า $e_i \cdot e_j = 1$ ถ้า $i = j$ และ $e_i \cdot e_j = 0$ ถ้า $i \neq j$ เมื่อ $i, j = 1, 2, 3$ ดังนั้นถ้าเขียนว่า

$$u = u_1 e_1 + u_2 e_2 + u_3 e_3 \quad (3.3)$$

$$v = v_1 e_1 + v_2 e_2 + v_3 e_3 \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$u \cdot v = u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3 \quad (3.5)$$

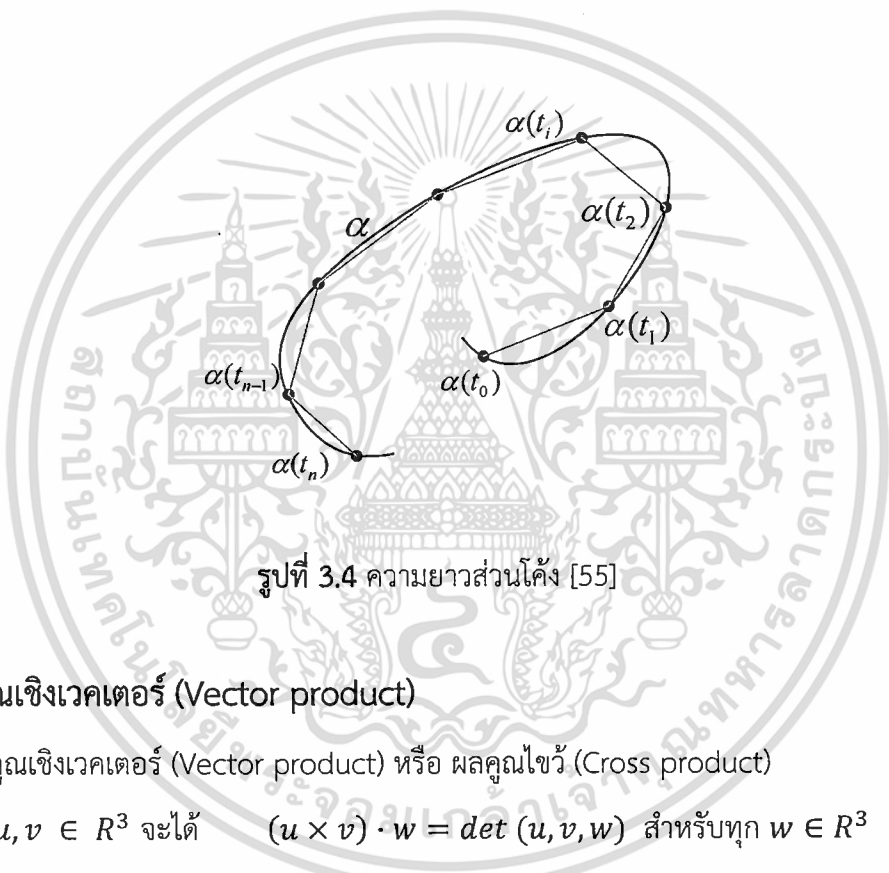
จากสมการข้างต้น ถ้า $u(t)$ และ $v(t)$, $t \in I$ เป็นเส้นโค้งที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ ดังนั้นฟังก์ชัน $u(t) \cdot v(t)$ ก็จะเป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้เช่นกัน

3.3 ความยาวส่วนโค้ง (Arc length)

ให้ $\alpha: I \rightarrow R^3$ เป็นเส้นโค้งที่หาอนุพันธ์ได้ และ $\alpha'(t) \neq 0$ สำหรับ $t \in I$ จะคำนวณหาความยาวส่วนโค้ง s ดังรูปที่ 3.4 จากจุด t_0 ได้ดังนี้

$$s(t) = \int_{t_0}^t |\alpha'(t)| dt \tag{3.6}$$

เมื่อ $|\alpha'(t)| = \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2 + (z'(t))^2}$ คือความยาวของเวกเตอร์ $\alpha'(t)$

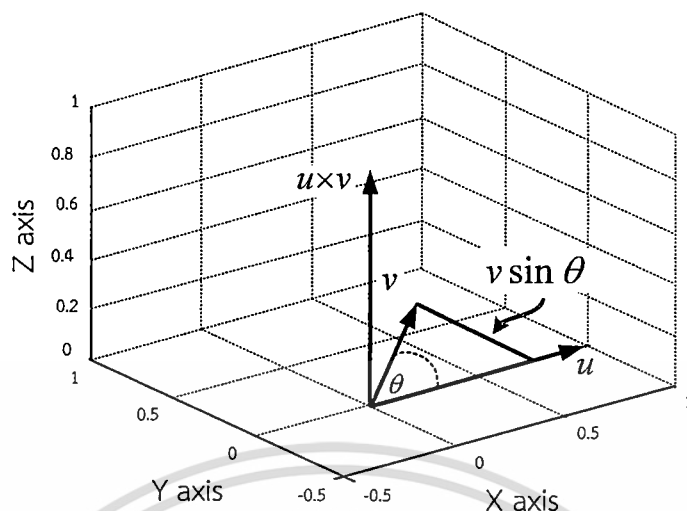


รูปที่ 3.4 ความยาวส่วนโค้ง [55]

3.4 ผลคูณเชิงเวกเตอร์ (Vector product)

ผลคูณเชิงเวกเตอร์ (Vector product) หรือ ผลคูณไขว้ (Cross product)

ให้ $u, v \in R^3$ จะได้ $(u \times v) \cdot w = \det(u, v, w)$ สำหรับทุก $w \in R^3$



รูปที่ 3.5 ผลคูณเชิงเวกเตอร์ $u \times v$

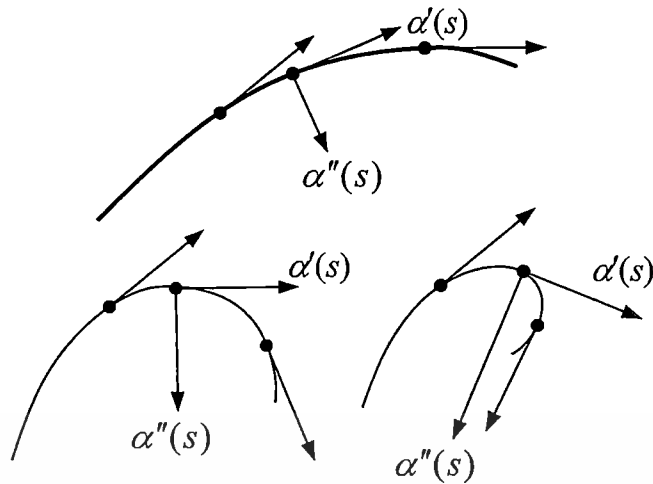
จากรูปที่ 3.5 ผลคูณเชิงเวกเตอร์ $u \times v$ อาจเขียนเป็น $u \wedge v$ ซึ่งจะมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบ u, v เสมอ โดยขนาดของเวกเตอร์จะขึ้นอยู่กับมุมระหว่างเวกเตอร์ u, v

$$|u \times v| = |u||v| \sin \theta \quad (3.7)$$

จะสังเกตได้ว่า $\sin \theta$ จะเป็น 0 เมื่อ u, v ขนานกันและจะเป็น 1 เมื่อ u, v ตั้งฉากกัน

3.5 การกำหนดพารามิเตอร์ของเส้นโค้งด้วยความยาวส่วนโค้ง (The local theory of curve parameterized by arc length)

เมื่อให้ $\alpha: I = (a, b) \rightarrow R^3$ เป็นเส้นโค้งที่ใช้ความยาวส่วนโค้ง s เป็นพารามิเตอร์ เมื่อเวกเตอร์สัมผัส $\alpha'(s)$ (Tangent vector) เป็นเวกเตอร์ 1 หน่วย ส่วน $|\alpha''(s)|$ อนุพันธ์อันดับสองจะเป็นตัวบอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมที่เส้นสัมผัสเทียบกับจุดใกล้เคียง ดังรูปที่ 3.6 ดังนั้นจึงหมายความว่าเส้นโค้งนั้นออกห่างจากเส้นสัมผัสเร็วมากน้อยเพียงใด

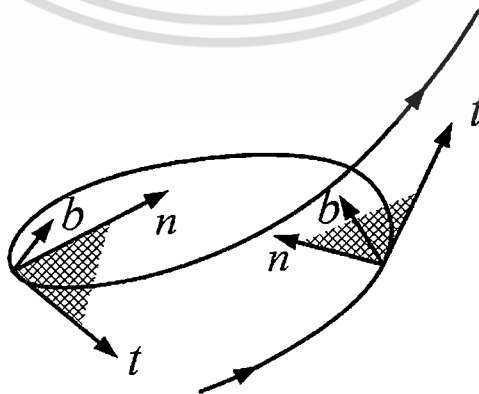


รูปที่ 3.6 เวกเตอร์สัมผัส α' และอัตราการเปลี่ยนแปลง α'' [55]

ให้ $\alpha: I \rightarrow \mathbb{R}^3$ เป็นเส้นโค้งที่ใช้ความยาวส่วนโค้ง $s \in I$ เป็นพารามิเตอร์

$$|\alpha''(s)| = k(s) \quad (3.8)$$

เรียก $k(s)$ ว่าเป็น ความโค้ง (curvature) ของ α ที่จุด s ถ้า $k(s) = |\alpha''(s)| = 0$ แล้วเส้นโค้ง α จะเป็นเส้นตรง สำหรับจุดที่ $k \neq 0$ ถ้าให้ $n(s)$ แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ในทิศทาง α'' จะได้ว่า $\alpha''(s) = k(s)n(s)$ และจากรูปที่ 3.6 $\alpha''(s)$ ตั้งฉากกับ $\alpha'(s)$ เนื่องจาก $\alpha'(s) \cdot \alpha'(s) = 1$ ทำให้ได้ $\alpha''(s) \cdot \alpha'(s) = 0$ ดังนั้น $n(s)$ จึงตั้งฉากกับ $\alpha'(s)$ และเราเรียก $n(s)$ ว่าเวกเตอร์ปกติ (normal vector) ที่ s ส่วนระนาบที่เกิดจาก เวกเตอร์สัมผัสและเวกเตอร์ปกติ เรียกว่า oscillating plane ที่ s ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เวกเตอร์สัมผัส (t) เวกเตอร์ปกติ (n) และระนาบ oscillating plane [55]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณหาผลคูณเชิงเวกเตอร์ระหว่าง $t(s)$ และ $n(s)$ จะได้เวกเตอร์ $b(s)$ ซึ่งตั้งฉากกับระนาบ oscillating plane เราเรียก $b(s)$ ว่าเป็นเวกเตอร์เชิงตั้งฉากคู่ (Binormal vector) ที่ s และเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ขนาดความยาวของเวกเตอร์นี้ $|b'(s)|$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของระนาบ oscillating plane เทียบกับระนาบใกล้เคียงที่ s ดังนั้น $b'(s)$ จึงเป็นตัววัดว่าเส้นโค้งถูกดึงออกจาก oscillating plane ที่ s เร็วมากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับจุดใกล้เคียงที่ผ่านมา อาจเขียนใหม่ว่า $b'(s) = \tau(s)n(s)$ เรียก $\tau(s)$ ว่าการบิด (torsion) ของเส้นโค้ง α ที่ s ส่วนเวกเตอร์ทั้งสามคือ $t(s), n(s)$, และ $b(s)$ เรียกว่า Frenet trihedron ที่จุด s

3.6 สมการเฟอเนต (Frenet formular)

เมื่อให้ t เป็นเวกเตอร์สัมผัสหนึ่งหน่วย (tangent unit vector)

$$t = \frac{d\alpha}{ds} \quad (3.9)$$

ให้ n เป็นเวกเตอร์ปกติหนึ่งหน่วย (normal unit vector)

$$n = \frac{\frac{dt}{ds}}{\left\| \frac{dt}{ds} \right\|} \quad (3.10)$$

ให้ b เป็นเวกเตอร์เชิงตั้งฉากคู่ (binormal unit vector) ได้จากผลคูณไขว้ของ t และ n

$$b = t \times n \quad (3.11)$$

เนื่องจากเวกเตอร์ทั้งสามตั้งฉากซึ่งกันและกัน

$$\begin{aligned} \frac{dt}{ds} &= kn \\ \frac{dn}{ds} &= -kt + \tau b \\ \frac{db}{ds} &= -\tau n \end{aligned} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

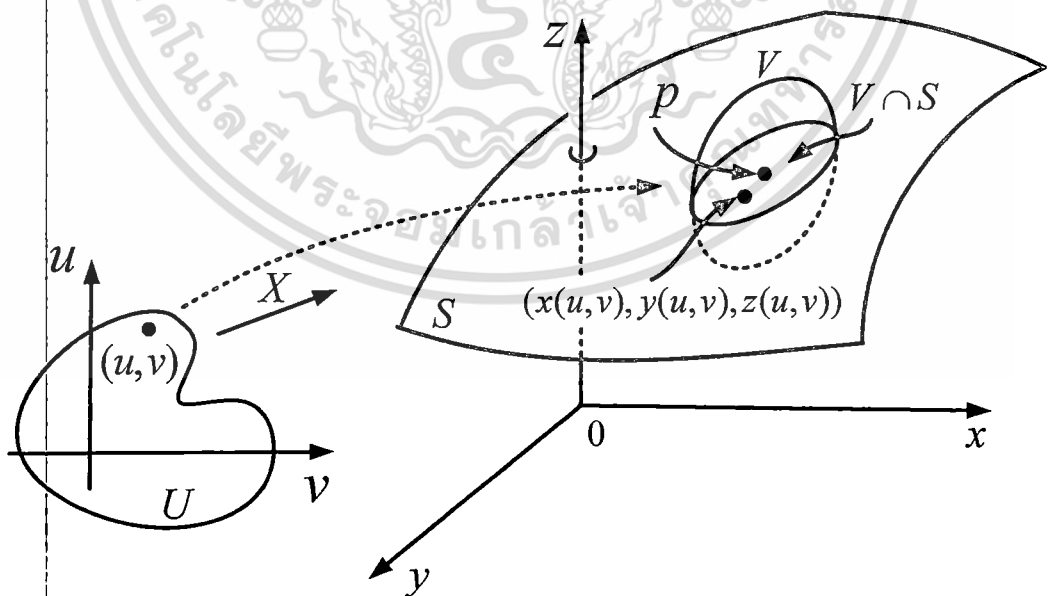
เมื่อ k คือความโค้ง (curvature) และ τ คือการบิด (torsion) อาจเขียนในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} t' \\ n' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k & 0 \\ -k & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ n \\ b \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

เป็นสมการที่สามารถบอกสมบัติของเส้นโค้งทั้ง ความโค้ง (Curvature) และการบิด (Torsion) ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนตำแหน่งของเส้นโค้ง ภายใต้การพิจารณาทิศทางของการเคลื่อนที่ (invariant to orientation) ระนาบ tb เรียกว่า rectifying plane ระนาบ nb เรียกว่า normal plane ส่วนกลับของความโค้ง $R = \frac{1}{k}$ คือ รัศมีความโค้ง (radius of curvature) ที่ s

3.7 พื้นผิว (Surface)

พื้นผิวใน R^3 ในที่นี้เป็นพื้นผิวที่สามารถหอนูนพันธุ์ได้ จึงเป็นผิวที่โค้งต่อเนื่อง ไม่มีมุมหรือเหลี่ยมที่แหลมคม ไม่มีขอบหรือตัดผ่านพื้นผิวดนเอง เมื่อให้ $S \subset R^3$ เป็นพื้นผิว ถ้า p เป็นสมาชิกของ S ($p \in S$) และ $x: U \rightarrow V \cap S$ (x เป็น map จาก U ไป V ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ S และ U เป็นสมาชิกของ R^2 ($U \in R^2$) และ $V \cap S$ เป็นสมาชิกของ R^3 ($V \cap S \in R^3$) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 พื้นผิว [55]

โดยพื้นผิว $X(u, v)$ หาอนุพันธ์ได้ เขียนได้เป็น

$$X(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \quad \text{เมื่อ } (u, v) \in U \quad (3.14)$$

ฟังก์ชัน $x(u, v), y(u, v), z(u, v)$ มีความต่อเนื่องของอนุพันธ์ย่อยทุกอันดับ (Continuous partial derivative) ทำให้พื้นผิวมีความต่อเนื่องกัน

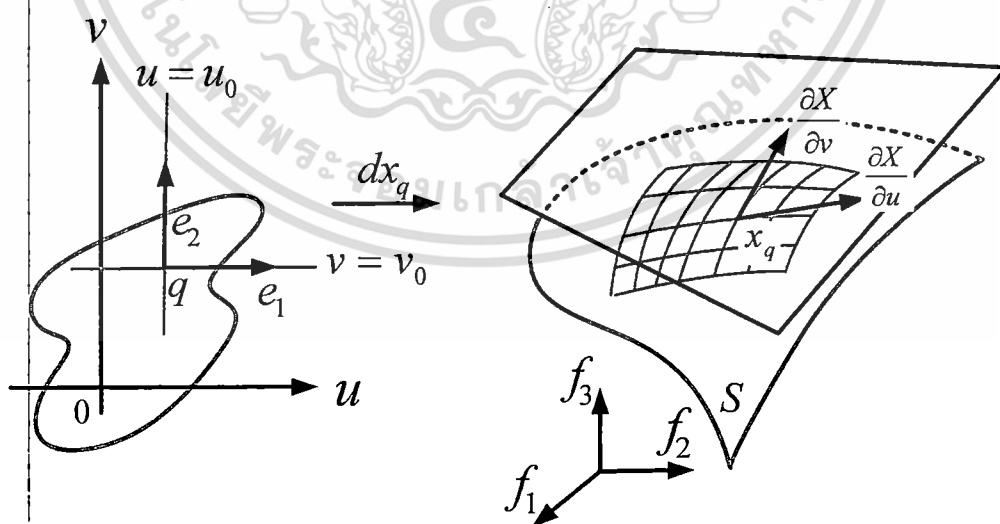
3.8 เวกเตอร์สัมผัส (Tangent vector)

เวกเตอร์สัมผัส ดังรูปที่ 3.9 ได้จากอนุพันธ์ย่อยของแต่ละแกน คำนวณได้จาก

$$\frac{\partial X}{\partial u} = \left(\frac{\partial x}{\partial u}, \frac{\partial y}{\partial u}, \frac{\partial z}{\partial u} \right) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial X}{\partial v} = \left(\frac{\partial x}{\partial v}, \frac{\partial y}{\partial v}, \frac{\partial z}{\partial v} \right) \quad (3.16)$$

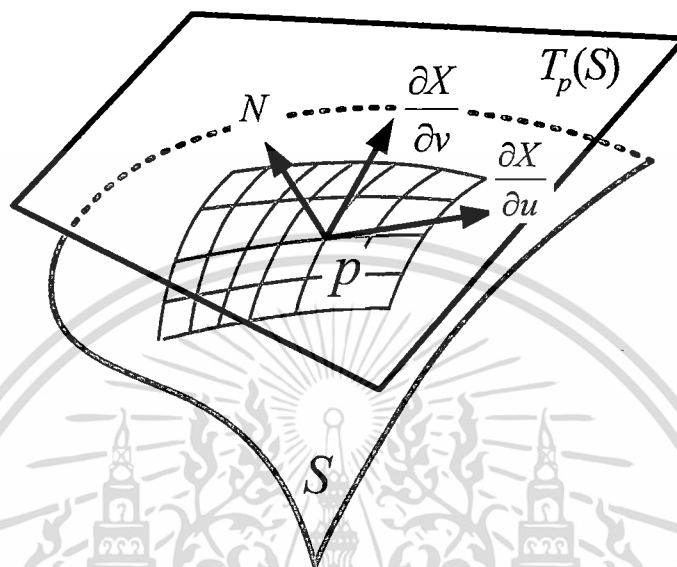
โดยที่ $\frac{\partial X}{\partial u}$ เป็นเวกเตอร์สัมผัสในแนวแกน u และ $\frac{\partial X}{\partial v}$ เป็นเวกเตอร์สัมผัสในแนวแกน v



รูปที่ 3.9 เวกเตอร์สัมผัส $\frac{\partial X}{\partial u}$ และ $\frac{\partial X}{\partial v}$ [55]

3.9 ระนาบสัมผัส (Tangent plane)

ระนาบสัมผัส $T_p(S)$ เป็นระนาบที่สัมผัสกับพื้นผิว S ที่จุด p การเปลี่ยนทิศของ u, v จะไม่มีผลต่อระนาบสัมผัส ซึ่งจะตั้งฉากกับเวกเตอร์ปกติเสมอ รูปที่ 3.10 แสดงระนาบสัมผัสที่จุด p



รูปที่ 3.10 ระนาบสัมผัส $T_p(S)$

3.10 รูปแบบมูลฐานอันดับแรก (First fundamental form)

ใช้เป็นตัวอธิบายว่าพื้นผิว S มีสมบัติอย่างไรใน R^3 ได้จากผลคูณเชิงสเกลาร์ (inner product) ของเวกเตอร์สัมผัส เมื่อ $R^3 \ni S$ และ $T_p(S)$ เป็นระนาบสัมผัส ให้ $w_1, w_2 \in T_p(S) \in R^3$ ดังนั้น $\langle w_1, w_2 \rangle$ เป็นผลคูณเชิงสเกลาร์ (inner product) หรือ dot product ของ w_1 และ w_2

$$I_p(w) = \langle w_1, w_2 \rangle_p = |w|^2 \geq 0 \quad (3.17)$$

รูปแบบควอดราติก (quadratic form) ของ I_p บนระนาบสัมผัส $T_p(S)$ ดังสมการ (3.18) เรียกว่า รูปแบบมูลฐานอันดับแรกของพื้นผิว $S \in R^3$ ที่ $p \in S$ รูปแบบมูลฐานอันดับแรกของพื้นผิวนี้สามารถอธิบาย ความยาวของเส้นโค้ง มุมของเส้นสัมผัส และ พื้นที่ได้โดยไม่ต้องย้อนกลับไปอ้างอิงข้อมูลเวกเตอร์ใน R^3 ถ้าเขียนรูปแบบมูลฐานอันดับแรก จาก X_u, X_v ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์

$X(u, v)$ ที่ p เมื่อเวกเตอร์สัมผัส $w \in T_p(S)$ เป็นพารามิเตอร์ของเส้นโค้ง $\alpha(t) = X(u(t), v(t), t \in (-\epsilon, \epsilon))$ เมื่อ $p = \alpha(0) = X(u_0, v_0)$ จะได้

$$\begin{aligned} I_p(\alpha'(0)) &= \langle \alpha'(0), \alpha'(0) \rangle \\ &= \langle X_u u' + X_v v', X_u u' + X_v v' \rangle \\ &= \langle X_u, X_u \rangle_p (u')^2 + 2 \langle X_u, X_v \rangle_p u' v' + \langle X_v, X_v \rangle_p (v')^2 \\ &= E(u')^2 + 2F u' v' + G(v')^2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$E = \langle X_u, X_u \rangle \quad (3.19)$$

$$F = \langle X_u, X_v \rangle \quad (3.20)$$

$$G = \langle X_v, X_v \rangle \quad (3.21)$$

เขียนเป็นเมตริกซ์ดังนี้

$$I_p = \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u \cdot X_u & X_u \cdot X_v \\ X_v \cdot X_u & X_v \cdot X_v \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

สรุปในส่วนนี้ว่า ถ้าเส้นโค้งกำหนดด้วยพารามิเตอร์ $\alpha: I \rightarrow S$

ความยาวส่วนโค้ง s (arc length) จะเท่ากับ

$$s(t) = \int_0^t |\alpha'(t)| dt \quad (3.23)$$

$$s(t) = \int_0^t \sqrt{E(u')^2 + 2F u' v' + G(v')^2} dt \quad (3.24)$$

มุมของพิกัดเส้นโค้ง (angle of coordinate curve)

$$\cos \varphi = \frac{\langle X_u, X_v \rangle}{|X_u| |X_v|} = \frac{F}{\sqrt{EG}} \quad (3.25)$$

พื้นที่ของ R ได้จาก การอินทิเกรต 2 ชั้นของ $A(R) = \iint_Q |X_u \times X_v| du dv$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือจาก} \quad |X_u \times X_v| = \sqrt{EG - F^2} \quad (3.26)$$

First Fundamental Forms เป็นการนำเอาอนุพันธ์ย่อยมาใช้ในการอธิบายรูปร่างของพื้นผิว เช่น ความยาว พื้นที่ และ มุม บนพื้นผิว ในมุมมองแบบสามมิติ ถ้าให้ $z(u, v)$ เป็นฟังก์ชัน พื้นผิวสามารถอธิบายได้ด้วย

$$X(u, v) = ue_x + ve_y + z(u, v)e_z \quad (3.27)$$

ในที่นี้ X คือจุดพิกัดของเวกเตอร์ของทุกๆจุดบนพื้นผิว โดยมี u และ v เป็นพารามิเตอร์อิสระของระนาบสองมิติ และ e_x, e_y, e_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ในแนวแกน (X, Y, Z) เมื่อพิจารณาว่า X เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องของ u และ v จึงเขียนเป็นอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u}, \quad X_v = \frac{\partial X}{\partial v} \quad (3.28)$$

เนื่องจาก $X = x(u, v)$ อนุพันธ์ของ $dX = X_u du + X_v dv$

ในที่นี้ dX คือเวกเตอร์สัมผัสพื้นผิวโดยอยู่ในทิศทางของ du dv สำหรับ dX นี้เป็นหัวใจหลักของ I (First fundamental form) โดยคำนวณจากผลคูณเชิงสเกลาร์ (inner หรือ dot product) ของ dX กับ dX เอง

$$I = dX \cdot dX = (X_u du + X_v dv) \cdot (X_u du + X_v dv)$$

$$I = (X_u \cdot X_u)du^2 + 2(X_u \cdot X_v)dudv + (X_v \cdot X_v)dv^2$$

$$I = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \quad (3.29)$$

เรียก E F และ G ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ของมูลฐานแรก (First fundamental coefficient)

ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่สามารถนำไปคำนวณหา มุม ระยะทาง และ พื้นที่ของพื้นผิวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขอรับประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 รูปแบบมูลฐานที่สอง (Second fundamental forms)

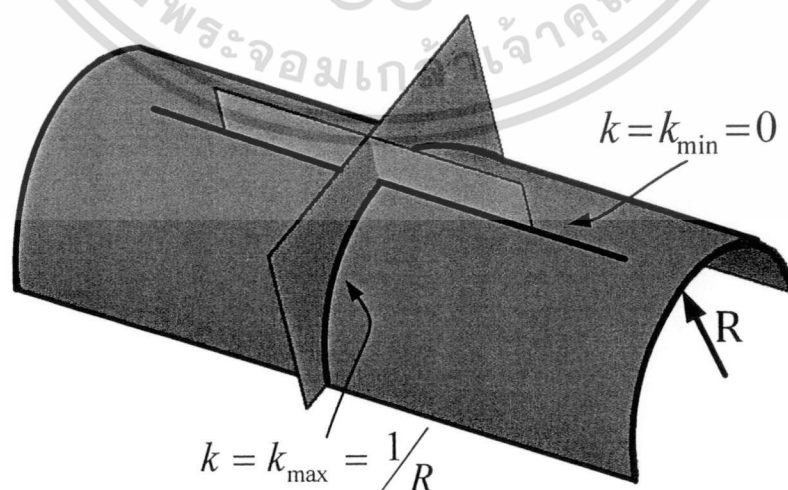
หัวใจของ ของ II (Second fundamental form) คือเวกเตอร์ปกติหนึ่งหน่วย n ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส การเปลี่ยนแปลงทิศทางของเวกเตอร์ปกติ n เปรียบเทียบกับรูปร่างพื้นผิวซึ่งวัดโดย อนุพันธ์ของ dn ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ปกติ n ในทิศทางใดๆ ที่อธิบายโดย dX ที่จุดบนพื้นผิว

$$dn = n_u du + n_v dv \quad (3.30)$$

คำนวณจากผลคูณเชิงสเกลาร์ (Inner หรือ dot product) ของ $-dX$ กับ dn

$$\begin{aligned} II &= -dX \cdot dn = -(X_u du + x_v dv) \cdot (n_u du + n_v dv) \\ II &= -(X_u \cdot n_u) du^2 - 2(X_u \cdot n_v + X_v \cdot n_u) dudv - (X_v \cdot n_v) dv^2 \\ II &= Ldu^2 - 2Mdudv - Ndv^2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

เรียก L M และ N ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ของมูลฐานที่สอง (Second fundamental coefficient) ซึ่งสามารถใช้อธิบายรูปร่างของพื้นผิว เช่น แบบโดมหรืออ่าง (Dome or Basin) แบบทรงกระบอก (Cylindrical fold) หรือ อานม้า (Saddle) นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างรูปแบบมูลฐานที่สองและที่หนึ่ง จะสามารถบอกทิศทางของความโค้งปกติได้ (Normal curvature) ในทุกๆ ทิศทางที่จุดใดๆ บนพื้นผิว



รูปที่ 3.11 ค่าความโค้งที่ทิศทางต่างๆ ของรูปครึ่งทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12 ความโค้งปกติ (Normal curvature of surface)

ความโค้งปกติ (Normal curvature) ในที่นี้ใช้ k เป็นค่าความโค้ง จากรูปที่ 3.11 เป็นตัวอย่างของรูปครึ่งทรงกระบอกแสดงให้เห็นว่าที่จุดใดๆบนพื้นผิวนั้น ค่าความโค้งจะแตกต่างกันไป ขึ้นกับทิศทางที่สนใจ เช่น ในทิศทางที่อยู่ในแนวแกนของรูปครึ่งทรงกระบอกหรือแนวแกน x จะมีค่าความโค้งเป็นศูนย์ $k=0$ ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดของรูปทรงนี้ ดังนั้นรูปพื้นผิวทรงกระบอกจะมีค่าความโค้งต่ำสุดเท่ากับศูนย์ $k = k_{min}$ ในทิศทางตามแนวแกนของทรงกระบอก ส่วนในระนาบ (y, z) รูปทรงกระบอกจะมีค่าความโค้งที่เท่ากันในทุกๆจุด และมีค่าสูงสุด $k = k_{max}$ ความโค้งที่มีค่าต่ำสุดและสูงสุดนี้เรียกว่า ค่าความโค้งหลัก (Principle curvature) ดังนั้นค่าความโค้งอื่นๆ ก็จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด $k_{min} < k < k_{max}$ ค่าความโค้งนี้สามารถคำนวณได้จาก เมตริกซ์ค่ารูปแบบมูลฐานที่หนึ่งและสอง

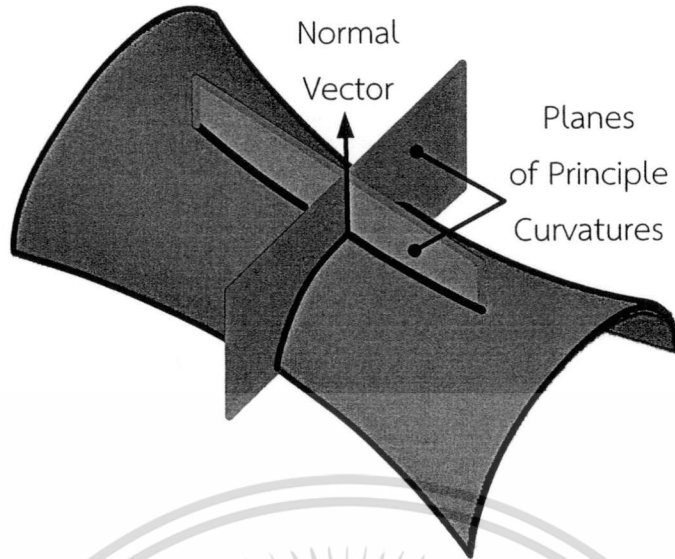
$$\text{ค่ารูปแบบมูลฐานที่หนึ่ง} \quad I = \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\text{ค่ารูปแบบมูลฐานที่สอง} \quad II = \begin{bmatrix} L & M \\ M & N \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

จากค่ารูปแบบมูลฐานที่หนึ่งและสองที่จุดใดๆ คำนวณได้จาก ค่าไอเกนแวลูของเมตริกซ์ L เมื่อ L คือ Shape operator

$$L = I^{-1}II \quad (3.34)$$

ในขณะที่ทิศทางของความโค้งมูลฐานจะเป็นไปตามค่าไอเกนเวกเตอร์ของ L เมื่อพิจารณาในแนวของค่า k_{max} ซึ่งจะเป็นส่วนกลับของรัศมี $R = \frac{1}{k}$ ในขณะที่หน่วยของรัศมี มีหน่วยเป็นหน่วยของความยาว (m) ทำให้ค่าความโค้งมีหน่วยเป็น m^{-1} ดังรูปที่ 3.12 ความโค้งมูลฐานคือเส้นที่เกิดจากการตัดกันระหว่างพื้นผิวและระนาบความโค้งหลัก (Principle curvature plane)



รูปที่ 3.12 เวกเตอร์ปกติ และความโค้งมูลฐาน

3.13 ความโค้งเกาส์เซียน (Gaussian Curvature)

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

$$k_G = k_{min}k_{max} \quad (3.35)$$

$$k_G = \frac{\det II}{\det I} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (3.36)$$

ตัวอย่างของความโค้งเกาส์เซียนที่นำมาใช้บอกรูปร่างพื้นผิวเช่น กรณีที่ 1 ถ้าความโค้งเกาส์เซียนเท่ากับศูนย์ นั้นหมายความว่าต้องมีอย่างน้อยหนึ่งตัวของค่าความโค้งมูลฐานที่เป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึงรูปร่างของพื้นผิวตรงนั้นเป็นรูปครึ่งทรงกระบอกอาจเป็นรูปครึ่งทรงกระบอกที่หงายหรือคว่ำก็ได้ กรณีที่ 2 ถ้าค่าความโค้งมูลฐานทั้งสองเป็นศูนย์ รูปร่างของพื้นผิวบริเวณนั้นจะแบนราบ กรณีที่ 3 ถ้า $k_G < 0$ หมายความว่าเครื่องหมายของค่าความโค้งมูลฐานทั้งสองแตกต่างกันทำให้รูปทรงของผิวพื้นจะคล้ายกับอานม้า กรณีที่ 4 ถ้า $k_G > 0$ หมายความว่าเครื่องหมายของค่าความโค้งมูลฐานทั้งสองเหมือนกันทำให้รูปทรงของผิวพื้นจะคล้ายกับโดมหรืออ่างน้ำก็ได้ เนื่องจากความโค้งเกาส์เซียนเกิดจากการคูณกันของ 1/รัศมีความโค้ง ดังนั้นหน่วยของความโค้งเกาส์เซียน จึงมีหน่วยเป็น 1/พื้นที่ เช่น $1/\text{mm}^2$ หรือ mm^{-2}

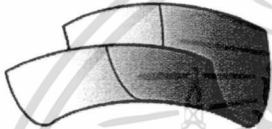
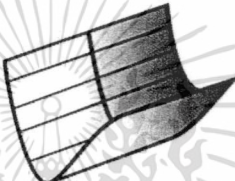
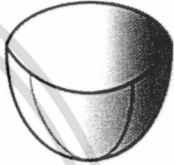

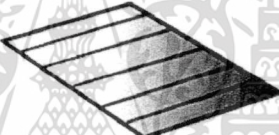




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14 ความโค้งเฉลี่ย (Mean curvature)

ค่าความโค้งเฉลี่ย k_M คำนวณได้จากความโค้งเกาส์เซียน คือ

$$k_M = \frac{k_{min} + k_{max}}{2} = \frac{k_G}{2} \quad (3.37)$$

เมื่อนำค่าความโค้งเฉลี่ยและความโค้งเกาส์เซียนมาใช้อธิบายรูปร่างได้ดังรูปที่ 3.13

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

รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง รูปร่างพื้นผิว ความโค้งเกาส์เซียนและความโค้งเฉลี่ย [56]

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

บทที่ 4

การแปลงเชิงเรขาคณิต

(Geometric Transform)

4.1 บทนำ

ในการรู้จำรูปทรงสามมิติจำเป็นต้องแยกคุณลักษณะของวัตถุออกมาให้ได้และคุณลักษณะเหล่านั้นจำเป็นต้องมีลักษณะเช่นเดิม หรือเรารู้จำได้ว่าเป็นวัตถุชิ้นเดิม ภายใต้ตัวแปรต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นตัวแปรจากสิ่งแวดล้อมเช่นตำแหน่งของแสงสว่าง สีของแสงสว่าง หรือความเข้มของแสงสว่างนั้น ส่วนตัวแปรอีกประเภทหนึ่งคือรูปทรงของวัตถุที่อาจเปลี่ยนแปลงเองเช่นการแสดงอารมณ์ที่ใบหน้า เช่นอารมณ์เศร้า ดีใจ เสียใจ เป็นต้น ยังมีปัจจัยชนิดอื่นที่มีผลต่อการคงสภาพของลักษณะที่ใช้ในการรู้จำรูปทรงอีกเช่น การเปลี่ยนมุมมองของวัตถุหรือการเลื่อนระยะการมองวัตถุซึ่งทำให้เกิดผลเช่นเดียวกับการแปลงวัตถุชนิดต่างๆ เช่น การหมุน (Rotation) การเลื่อนตำแหน่ง (Translation) การเปลี่ยนแปลงขนาด (Scaling) และการเฉือน (Shearing) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่เกี่ยวกับกล้องที่ใช้ถ่ายภาพได้แก่ Intrinsic parameter และ Extrinsic parameter ของกล้อง ตัวอย่างสุดท้ายที่ส่งผลต่อการรู้จำรูปทรงได้แก่ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายรูปทรงต่างๆ

4.2 การแปลงเชิงเส้น (Linear transformation)

4.2.1. การแปลงรูปทรงคงที่ (Rigid transformation)

การแปลงรูปทรงคงที่ หรือเรียกว่า แปลงยูคลิเดียน (Euclidean transformation) เป็นการแปลงที่รูปทรงของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงแยกออกได้เป็น

4.2.1.1 การหมุน (Rotation) ซึ่งเป็นการหมุนวัตถุรอบจุดกำเนิด อาจเป็นการหมุนรอบแกน X แกน Y หรือ แกน Z หรืออาจเป็นรอบแกนใดๆ

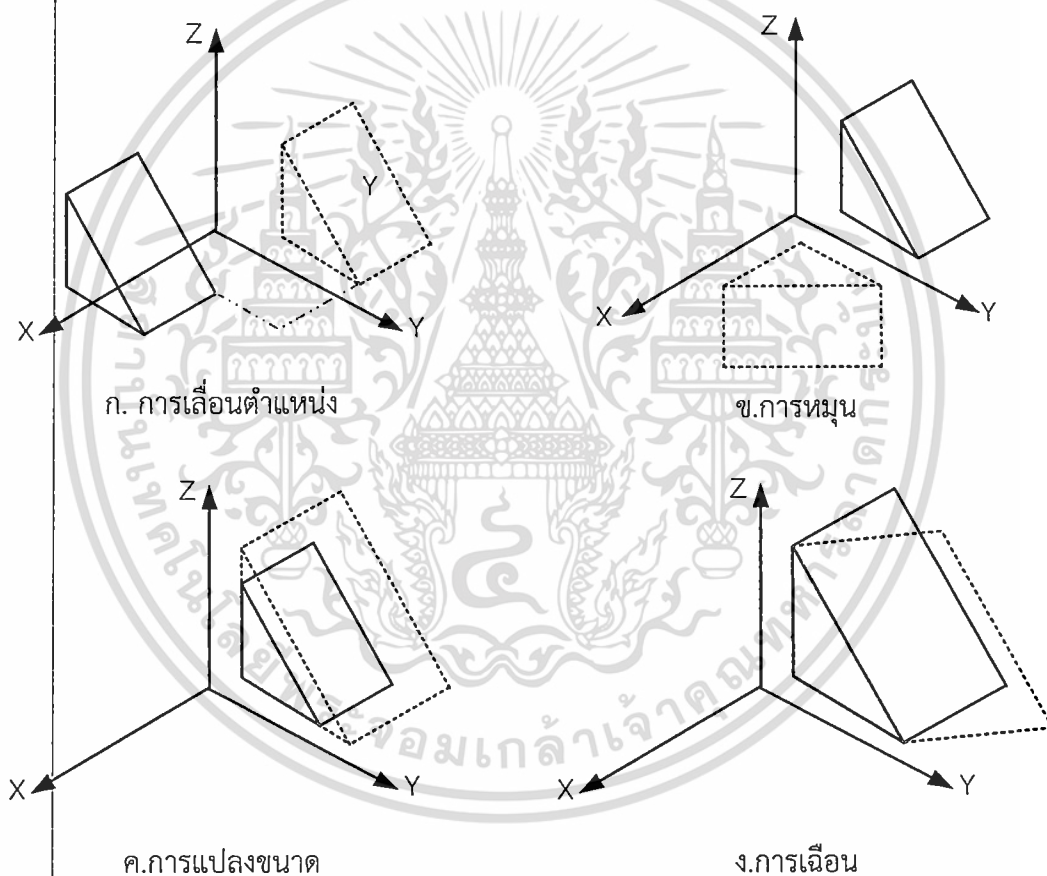
4.2.1.2 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation) เป็นการเลื่อนวัตถุเทียบกับจุดกำเนิด เช่นเดียวกับการหมุนโดยอาศัยจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการเลื่อนเช่นการเลื่อนจากจุด (X, Y, Z) ไปยังจุด (X', Y', Z')

4.3 การแปลงเหมือน (Similarity transformation)

ประกอบด้วย การแปลงแบบหมุน การเลื่อนตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงขนาด (Scaling)

4.4 การแปลงแอฟไฟน์ (Affine transformation)

เป็นการแปลงที่ประกอบด้วย การหมุน การเลื่อนตำแหน่ง การเปลี่ยนแปลงขนาดและการเฉือน (Shear) รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการแปลงรูปแบบต่างๆ ประกอบด้วย ก. การเลื่อนตำแหน่ง ข. การหมุน ค. การแปลงขนาด และ ง. การเฉือน



รูปที่ 4.1 การแปลงเชิงเรขาคณิตชนิดต่างๆ

4.5 เมตริกซ์การแปลงและระบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Transformation Matrix and Homogeneous coordinate)

เป็นการใช้เป็นการใช้เวกเตอร์ขนาด $(n+1)$ เวกเตอร์ เพื่อระบุพิกัดของจุดต่างๆ เช่นใน รูปสองมิติ (R^2 space) พิกัดระบุด้วย (x, y) จะใช้เวกเตอร์ $(x, y, 1)$ แทนเวกเตอร์ตำแหน่ง (x, y) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบสามมิติ (R^3 space) จะระบุพิกัดด้วยเวกเตอร์ $(x, y, z, 1)$ แทนเวกเตอร์ (x, y, z) เราเรียกระบบโคออดิเนตขนาด $n + 1$ นี้ว่า ระบบพิกัดโฮโมจีเนียส เมื่อให้ $p' = [x', y', z']^T$ เป็นพิกัดใหม่ และ $p = [x, y, z]^T$ เป็นพิกัดเดิม เมื่อให้ T เป็นเมตริกซ์การแปลง

$$p' = Tp \quad (4.1)$$

การแปลงเรขาคณิตของการเลื่อนตำแหน่ง (Translation) ใน 3 มิติ ระบบพิกัดโฮโมจีเนียสคือ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

การแปลงเรขาคณิตของการหมุน (Rotation) ใน 3 มิติ ระบบพิกัดโฮโมจีเนียสคือ

เมื่อหมุนรอบแกน X

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

เมื่อหมุนรอบแกน Y

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

เมื่อหมุนรอบแกน Z

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

การแปลงเรขาคณิตของการเปลี่ยนขนาด (Scaling) ใน 3 มิติ ระบบพิกัดโฮโมจีเนียสคือ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงเรขาคณิตของการเฉือน (Shearing) ใน 3 มิติ ระบบพิกัดโฮโมจีเนียสคือ เมื่อต้องการเฉือนตามแกน x โดยที่ y ไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยแฟกเตอร์ a

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

เมื่อต้องการเฉือนตามแกน y โดยที่ x ไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยแฟกเตอร์ b

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ b & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

เมื่อต้องการเฉือนทั้งแนวแกน x และ y โดยที่ z ไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยแฟกเตอร์ zx และ zy

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & zx & 0 \\ 0 & 1 & zy & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

เมื่อต้องการเฉือนทั้งแนวแกน x และ z โดยที่ y ไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยแฟกเตอร์ yx และ yz

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & yx & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & yz & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

เมื่อต้องการเฉือนทั้งแนวแกน y และ z โดยที่ x ไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยแฟกเตอร์ xy และ xz

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ xy & 1 & 0 & 0 \\ xz & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ซึ่งสามารถรวมเมตริกซ์การเลื่อนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & yx & zx & 0 \\ xy & 1 & zy & 0 \\ xz & yz & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

เราสามารถรวมเมตริกซ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันและเรียกว่าเป็นเมตริกซ์การแปลงแอฟไฟน์ T_A ดังนี้

$$T_A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

สำหรับแปลงแบบโปรเจกทีฟที่มีเมตริกซ์การแปลง T_P ดังนี้

$$T_P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

บทที่ 5

การซ้อนทับภาพพื้นผิวใบหน้าสามมิติ

(3D Image Registration)

5.1 บทนำ

การซ้อนทับภาพ (Image Registration) เป็นกระบวนการหาจุดเด่นเอกลักษณ์ของภาพตั้งแต่สองภาพขึ้นไปแล้วนำมาจัดวางซ้อนทับกันตามความสอดคล้องของภาพนั้น ไม่ว่าจะเป็นภาพสองมิติหรือสามมิติก็ตาม ทั้งนี้เพื่อนำผลภาพที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น ทางการแพทย์ มีการนำภาพที่ได้จากการถ่ายภาพรังสีมาซ้อนทับกับภาพถ่ายรังสีขณะที่มีดสารทึบรังสี เพื่อการลบภาพบางส่วนออกและทำให้ภาพมีความคมชัดและความเปรียบต่าง (contrast) มากขึ้น หรือการนำภาพที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพต่างชนิดกันของคนไข้คนเดิมมารวมกัน (Image Fusion) เช่นการนำภาพที่ได้จากเครื่องโพสิตรอนอิมิซันโทโมกราฟี (PET) มารวมกับภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT) เป็นต้น ในการศึกษานี้ได้คำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลาค้นหาจุดเด่นเอกลักษณ์ของพื้นผิวใบหน้า โดยคำนวณจากพื้นผิวใบหน้าที่ค่าความโค้งเกาส์เซียนเป็นศูนย์ซึ่งหมายถึงบริเวณที่ไม่มีการโค้งงอของพื้นผิวหรือบริเวณที่พื้นผิวเปลี่ยนความโค้งจากบวกเป็นลบหรือเปลี่ยนจากลบเป็นบวกก็ได้ จากนั้นจึงคำนวณหาจุดเด่นเอกลักษณ์ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาค้นหาจุดเด่นเอกลักษณ์ของพื้นผิวใบหน้า โดยดูจากการบิดงอของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาค้นหาจุดที่การบิดงอมีค่าแรงบิดเป็นศูนย์ ต่อมานำจุดเด่นเอกลักษณ์นี้ไปเปรียบเทียบกับจุดเด่นเอกลักษณ์ของข้อมูลใบหน้าอื่น ถ้าตรงกันก็จะสามารถซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกันได้

5.2 ประเภทของการซ้อนทับภาพ

การซ้อนทับภาพแบ่งเป็น 3 ประเภท [57]

5.2.1 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน (Intra-object Intra-modality Registration)

การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน เป็นการถ่ายบุคคลเดิมด้วยเครื่องถ่ายภาพชนิดภาพเดิม แต่ต่างเวลากัน เช่นการถ่ายภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ก่อนพบว่า มีเนื้องอกและหลังพบว่า มีเนื้องอก เมื่อนำภาพมาซ้อนทับกัน จะทำให้สามารถหาขอบเขตขนาด และการเติบโตของเนื้องอกได้ การถ่ายภาพสามมิติของใบหน้าที่ต้องการความสมบูรณ์ของภาพทุกมุมมองรอบศีรษะก็จัดอยู่ในประเภทนี้ เนื่องจากจำเป็นต้องถ่ายภาพจากทิศทางที่ต่างกันจากหลายมุมมอง เนื่องจากไม่สามารถสร้างภาพให้เห็นวัตถุโดยรอบ 360 องศา จากการสแกนเพียงครั้งเดียวได้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาสุขภาพแห่งชาติ (สวช.) ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก สวช. หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อ สวช. โทร. 02-2545454 หรือ อีเมล: info@nhi.go.th

จากนั้นจึงนำภาพมาเรียงต่อกันโดยต้องมีการซ้อนทับกันของภาพบางส่วน แล้วนำภาพมาซ้อนทับและจัดเรียงให้ตรงกันต่อไป

5.2.2 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพต่างวิธีกัน (Intra-object Inter-modality Registration)

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

5.2.3 การซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุต่างชนิดกัน (Inter-object Registration)

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

5.3 วิธีการซ้อนทับภาพ (Registration Technique)

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

ในการวิจัยนี้ เป็นการทดลองซ้อนทับภาพ ประเภทการซ้อนทับภาพระหว่างภาพวัตถุเดียวกันและถ่ายภาพด้วยวิธีเดียวกัน โดยเป็นการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติของบุคคลเดียวกันและใช้เครื่องสแกนแบบเลเซอร์ในการถ่ายภาพ เป็นการซ้อนทับภาพแบบใช้ลักษณะเด่นเอกลักษณ์เป็นหลัก ซึ่งหาได้จาก ความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลา ค่าปริมาตรเป็นศูนย์และแรงบิดเป็นศูนย์

5.4 การคำนวณเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการซ้อนทับภาพสามมิติ

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

$$K = k_1 k_2 \propto \begin{vmatrix} e & f \\ f & g \end{vmatrix} \quad (5.1)$$

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

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

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

$$\text{จากนั้นคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลาได้จาก } eg - f^2 = 0 \quad (5.2)$$

$$\text{หรือ ประมาณได้จาก } \langle N, r^{(2,0)} \rangle \langle N, r^{(0,2)} \rangle - \langle N, r^{(1,1)} \rangle^2 = 0 \quad (5.3)$$

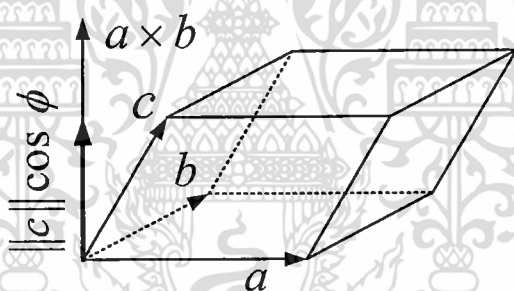
ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของความโค้งจะคงตัวอยู่ได้ภายใต้การแปลงแบบเหมือนเท่านั้นแต่ เส้นโค้งเชิงพาราโบลาจะคงตัวอยู่ได้ถึงระดับการแปลงแบบแอฟฟายน์ กล่าวได้ว่า พื้นผิวภายใต้การแปลงแบบแอฟฟายน์ จะมีเส้นโค้งเชิงพาราโบลาภายใต้การแปลงแบบแอฟฟายน์สอดคล้องกับเส้นโค้งเชิงเอกสาร์นิเป็นเอกสาร์ทีสวงนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าการณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาราโบล่าของพื้นผิวตันฉบับ ส่วนความโค้งเคาส์เซียนก่อนและหลังการแปลงนั้น จะสอดคล้องเป็น สัดส่วนกับพารามิเตอร์ของการแปลงเท่านั้นแต่ไม่สอดคล้องกับพื้นผิว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ภายใต้ การแปลงแบบแอฟไฟน์ในระนาบสามมิติ 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

จากนั้นเราสามารถนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลามาเป็นเส้นอ้างอิงที่จะใช้ในการจัดภาพให้ตรงกันและ นำมาหาจุดอ้างอิงบนเส้นนี้อีกทีหนึ่งก็ได้ซึ่งก็คือจุดที่มีแรงบิดงอของเส้น (Zero torsion point)

5.5 การคำนวณค่าปริมาตรเป็นศูนย์และแรงบิดเป็นศูนย์เป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการ ซ้อนทับภาพสามมิติ

เราสามารถคำนวณปริมาตร จากเวกเตอร์สามเวกเตอร์ได้ ดังรูปที่ 5.1 เมื่อ a, b และ c เป็น เวกเตอร์ ผลคูณของ a และ b เป็นพื้นที่ฐานเมื่อนำมาคูณกันกับความสูง $c \cos \phi$ ก็จะได้เป็น ปริมาตร $\text{Volume} = \|a \times b\| \|c\| |\cos \phi|$ หรือ $\text{Volume} = |a \times b \cdot c|$ ปริมาตรจะเป็นศูนย์ เมื่อเวกเตอร์ใดเวกเตอร์หนึ่งเป็นศูนย์หรือเวกเตอร์ทั้งสามอยู่ในระนาบเดียวกัน



รูปที่ 5.1 การคำนวณหาปริมาตรจากสามเวกเตอร์

ดังนั้นถ้าให้ $r(t)$ เป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า เราสามารถคำนวณปริมาตรจากอนุพันธ์อันดับต่างๆ ของเส้นโค้งได้จาก

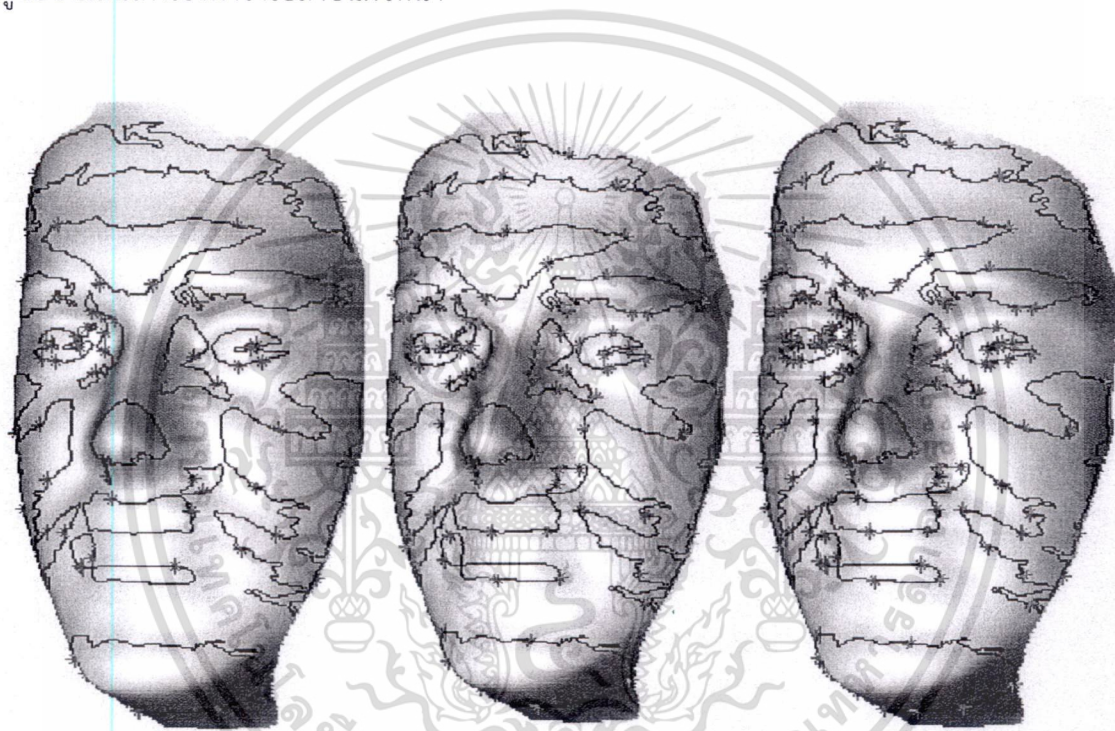
$$v_1(t) = \langle r^{(0)}(t) \times r^{(1)}(t), r^{(2)}(t) \rangle \quad (5.4)$$

เมื่อ $r^{(0)}(t)$, $r^{(1)}(t)$ และ $r^{(2)}(t)$ เป็นอนุพันธ์อันดับศูนย์ หนึ่ง และ สอง ของจุดบนเส้นโค้ง เชิงพาราโบล่าที่ตำแหน่ง t ในขณะเดียวกันเราสามารถคำนวณปริมาตรอีกตัวหนึ่งได้จาก $r^{(1)}(t)$, $r^{(2)}(t)$ และ $r^{(3)}(t)$ เมื่อ $r^{(3)}(t)$ เป็นอนุพันธ์อันดับสามของจุดบนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าที่ ตำแหน่ง t

$$v_2(t) = \langle r^{(1)}(t) \times r^{(2)}(t), r^{(3)}(t) \rangle \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ดังนั้นที่จุดแรงบิดเท่ากับศูนย์ หมายถึงจุดที่มีการบิดตัวของเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่คงสภาพอยู่ได้ภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์ ตัวอย่างของจุดที่ค่าปริมาตรเป็นศูนย์ ค่าแรงบิดเป็นศูนย์ บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าของใบหน้า ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2 ก. จุดปริมาตรเป็นศูนย์ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า และ ค. ทั้งจุดปริมาตรเป็นศูนย์และจุดแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าบนใบหน้า



ก. จุดปริมาตรศูนย์

ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์

ค. จุดปริมาตรศูนย์ (v_1) จุดแรงบิดเป็นศูนย์ (v_2)

รูปที่ 5.2 จุดเด่นเอกลักษณ์ของเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าบนใบหน้า ก.จุดปริมาตรศูนย์ Zero-volume (v_1) points ข.จุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-torsion (v_2) points และ ค.จุดปริมาตรศูนย์และจุดแรงบิดเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การจัดพื้นผิวให้ตรงกัน

(3D Image Alignment)

6.1 บทนำ

หลังจากที่หาจุดเด่นเอกลักษณ์ของพื้นผิวของใบหน้าจากสองข้อมูลภาพมาได้แล้ว ก่อนที่จะซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกัน ต้องหาความสอดคล้องกันของจุดเด่นเอกลักษณ์ของทั้งสองภาพก่อน ในที่นี้ใช้ ค่าแรงบิดเป็นศูนย์ เป็นจุดเด่นเอกลักษณ์ เมื่อหาความสอดคล้องได้แล้วจึงนำมาหาเมตริกซ์การแปลงระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเพื่อนำมาใช้ในการแปลงภาพหนึ่งให้ซ้อนทับกับอีกภาพหนึ่ง

6.2 การหาความสอดคล้องระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์

ในการหาความสอดคล้องกันระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์ สมมติว่าเรามีเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าสองหน้า ให้ PA เป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับ A และ ให้ PB เป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าเปรียบเทียบ B โดยใบหน้า A และ B มีจำนวนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาอยู่จำนวน q และ r เส้นตามลำดับซึ่งเป็นเส้นโค้งเชิงพาราโบลาที่เหลืออยู่หลังจากการตัดเส้นที่สั้นกว่า 200 จุดหรือเทียบเท่ากับตัดเส้นที่สั้นกว่า $200 \times 0.25 \text{mm} = 50 \text{mm}$ ออกไปแล้ว

$$PA_{(q)} = (x_{(t1)}, y_{(t1)}, z_{(t1)}) \quad (6.1)$$

$$PB_{(r)} = (x_{(t2)}, y_{(t2)}, z_{(t2)}) \quad (6.2)$$

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) ที่วิ่งไล่เรียงอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเวกเตอร์ทั้งสามจึงได้จาก

$$V_{(i,j,k,l)} = |(r_i - r_l) \times (r_j - r_l), (r_k - r_l)| \quad (6.3)$$

ขั้นตอนต่อมา นำปริมาตรที่ได้มาหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตร ณ จุดอ้างอิงต่อปริมาตรของจุดถัดไป

$$V_{ratio} = \frac{V_{(i)}}{V_{(i+1)}} \quad (6.4)$$

เมื่อ $V_{(i)}$ เป็นปริมาตรสามเวกเตอร์ของจุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

และ $V_{(i+1)}$ เป็นปริมาตรสามเวกเตอร์ของจุดเด่นเอกลักษณ์จุดถัดไป

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

$$\% \varepsilon = \frac{V_{ratioA} - V_{ratioB}}{V_{ratioA}} \times 100 < \zeta \quad (6.5)$$

เมื่อ ζ เป็นค่าขีดขั้นที่กำหนดไว้ ซึ่งในที่นี้กำหนดไว้ 5% การคำนวณเช่นนี้จะกระทำซ้ำและหมุนเวียนจนครบ ($q:r$) ระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลา $PA_{(q)}$ เส้นถัดไปจนครบทุกเส้น $PB_{(r)}$ แล้วนำค่าของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาที่สอดคล้องกันไปคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงเพื่อจัดภาพให้ตรงกันต่อไป

6.3 การหาเมตริกซ์การแปลงระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

หลังจากที่เราได้ความสอดคล้องกันของเส้นโค้งเชิงพาราโบลามาได้แล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งเราได้ทั้งความสอดคล้องกันระหว่างจุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและความสอดคล้องกันระหว่างเส้นโค้งเชิงพาราโบลาด้วย เนื่องจากความสอดคล้องที่ได้มีได้มีเพียงคู่เส้นโค้งเดียว เราจึงต้องนำความสอดคล้องทั้งหมดที่พบมาคำนวณหาเมตริกซ์การแปลง เพื่อการซ้อนทับและการจัดให้ตรงกันของภาพ โดยคำนวณจาก

ให้ p_i เป็นจุดแรงบิดเป็นศูนย์ของภาพคู่เทียบที่สอดคล้องกับ p'_i ซึ่งเป็นจุดแรงบิดที่เป็นศูนย์ของภาพต้นฉบับ สมมติว่ามีความสอดคล้องกัน n จุด ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพคู่เทียบเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$p'_i = T p_i \quad (6.6)$$

โดยจุดแรงบิดเป็นศูนย์ของภาพคู่เทียบ

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

จุดแรงบิดที่เป็นศูนย์ของภาพต้นฉบับ

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

เมตริกซ์การแปลงแบบแอฟไฟน์

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

ดังนั้นถ้าเราทราบ T ก็จะสามารถทำการแปลงเรขาคณิตของภาพให้ภาพคู่เทียบให้ซ้อนทับกับภาพต้นฉบับได้ โดยในการคำนวณหาค่า T นั้น หาได้จากการหาค่าที่ทำให้ค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจาก

$$E = \sum_{i=1}^n \|p'_i - T p_i\|^2 \quad (6.7)$$

ถ้า E มีค่าน้อยมากแสดงว่า ภาพต้นฉบับกับภาพคู่เทียบที่ผ่านการแปลงกลับซ้อนทับกันได้ดี ดังนั้นเราจึงต้องคำนวณหาค่า T ที่ทำให้ E ต่ำสุด โดยการหาอนุพันธ์ $\partial E / \partial T = 0$ ระหว่าง E เทียบกับ T ให้เท่ากับศูนย์แล้วแก้สมการหา T โดยให้

$$u_i = x'_i - a_{11}x_i - a_{12}y_i - a_{13}z_i - a_{14}$$

$$v_i = y'_i - a_{21}x_i - a_{22}y_i - a_{23}z_i - a_{24}$$

$$w_i = z'_i - a_{31}x_i - a_{32}y_i - a_{33}z_i - a_{34}$$

ดังนั้น

$$E = \sum_{i=1}^n [u_i \quad v_i \quad w_i \quad 0] \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \sum_{i=1}^n (u_i^2 + v_i^2 + w_i^2) \quad (6.9)$$

จากนี้ใช้ partial differentiation

$$\frac{\partial E}{\partial a_{11}} = -2 \sum_i u_i x_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{12}} = -2 \sum_i u_i y_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{13}} = -2 \sum_i u_i z_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{14}} = -2 \sum_i u_i$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_{21}} = -2 \sum_i v_i x_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{22}} = -2 \sum_i v_i y_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{23}} = -2 \sum_i v_i z_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{24}} = -2 \sum_i v_i$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_{31}} = -2 \sum_i w_i x_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{32}} = -2 \sum_i w_i y_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{33}} = -2 \sum_i w_i z_i, \quad \frac{\partial E}{\partial a_{34}} = -2 \sum_i w_i$$

หรือจัดในรูป $\partial E / \partial T$ จะได้

$$\frac{\partial E}{\partial T} = -2 \sum_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ 0 \end{bmatrix} [x_i \quad y_i \quad z_i \quad 1] \quad (6.10)$$

ดังนั้น $\frac{\partial E}{\partial A} = -2 \sum_i (p_i' - T p_i) p_i^T \quad (6.11)$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial A} &= -2 \sum_i (p_i' - T p_i) p_i^T = 0 \\ \sum_i T p_i p_i^T &= \sum_i p_i' p_i^T \end{aligned} \quad (6.12)$$

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

$$T = \sum_i p_i' p_i^T (p_i p_i^T)^{-1} \quad (6.13)$$

บทที่ 7

ระบบการถ่ายภาพและการคำนวณตัวแปร

7.1 บทนำ

ขั้นตอนและกระบวนการทดลองและผลการทดลอง เริ่มจากการถ่ายภาพใบหน้ามนุษย์แบบสามมิติ โดยได้ทดลองสร้างระบบการถ่ายภาพสามมิติด้วยกล้องสองตัว เมื่อได้ข้อมูลภาพสามมิติมาแล้วจึงนำมาวิเคราะห์หาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละใบหน้า เก็บเข้าสู่ฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการจัดภาพให้ตรงกันและซ้อนทับภาพ เพื่อการระบุตัวตนต่อไป

7.2 ระบบการถ่ายภาพใบหน้าสามมิติ

ใช้เทคนิควิธีที่เรียกว่า การใช้จุดแสงเข้ารหัสไบนารีเพื่อหาตำแหน่งจุดที่สอดคล้องกันแบบพร้อมกันหลายจุดในการถ่ายภาพสเตอริโอ (Multiple Correspondences in Stereoscopy Using Binary-Encoding Light Point) การถ่ายภาพสเตอริโอเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ทราบระยะลึกของวัตถุจากภาพถ่ายได้ แต่มีข้อยุ่งยากอย่างมากในการที่จะทราบตำแหน่งของจุดที่เป็นจุดเดียวกันที่ปรากฏในภาพถ่ายจากกล้องทั้งสอง เพื่อที่จะนำจุดที่สัมพันธ์กันจากทั้งสองภาพมาคำนวณหาพิกัดในการสร้างภาพ 3 มิติ ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาในการค้นหาจุดที่เป็นจุดเดียวกันของวัตถุที่ปรากฏในกล้องซ้ายและกล้องขวา โดยออกแบบให้ฉายชุดภาพของจุดแสงสีขาวที่ได้เข้ารหัสไบนารีไว้ไปยังวัตถุขณะเดียวกันก็ถ่ายภาพไว้ เมื่อนำภาพมาวิเคราะห์ลักษณะการติดต่อบนจุดแสงสีขาวก็จะทำให้ทราบได้ว่าจุดใดของภาพทั้งสองที่เป็นจุดเดียวกัน จากวิธีการนี้เองได้ทดลองกับใบหน้าของหุ่นมนุษย์พบว่าสามารถสร้างภาพรูปร่างของใบหน้าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

การหาพิกัดรูปร่างของวัตถุเป็นขั้นตอนแรกที่น่ามาประยุกต์ใช้ได้หลายลักษณะ ทั้งการสร้างต้นแบบสามมิติ การตรวจรูปร่างของวัตถุ ระบบนำทาง การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นส่วน การรังวัดและอื่นๆ เพื่อให้การประยุกต์ใช้งานเหล่านี้เป็นได้ด้วยดีจะต้องใช้วิธีการนำเข้าสู่ข้อมูลภาพสามมิติ ที่เหมาะสมกับงานเหล่านั้นซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็จะเหมาะสมและมีข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นวิธีการถ่ายภาพแบบสเตอริโอ การใช้แสงเลเซอร์วัดระยะ การฉายแสงตารางสีเหลี่ยม การสร้างรูปร่างจากแสงและเงา ในที่นี้จะขอนำมากล่าวโดยย่อ

การนำเข้าสู่ข้อมูลภาพ 3 มิติ มีมานานแล้ว วิธีการแรกก็คือ การถ่ายภาพสเตอริโอ[58] ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของตามนุษย์โดยการนำภาพถ่ายจากมุมที่แตกต่างกันมาคำนวณหาระยะลึกของวัตถุจากภาพถ่าย ในทางปฏิบัติแล้วการจัดวางตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพมีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเป็นปัญหาใหญ่ในการที่จะตำแหน่งของวัตถุในภาพทั้งสองได้อย่างถูกต้องแม่นยำ จึงจำเป็นต้องทำอย่างละเอียดรอบคอบ ซึ่งมักจะต้องใช้คนเป็นผู้ตัดสินใจในการกำหนดตำแหน่งในภาพทั้งสองถ้าจำนวนจุดที่ต้องการมีมากนับว่าเป็นงานหนักอย่างยิ่ง การใช้แสงเลเซอร์วัดระยะ [59] เป็นการ

ประยุกต์ใช้เลเซอร์เพื่อวัดระยะทางถึงตำแหน่งที่แสงเลเซอร์ชี้อยู่บนวัตถุโดยใช้เทคนิคการคำนวณคาบเวลาการเดินทางของแสงเลเซอร์ซึ่งให้รายละเอียดที่ดีมาก จากเรื่อง Laser Plane Range Finder [60] กล่าวไว้ว่าสามารถทำรายละเอียดในระยะลึกได้ถึง 0.5 มิลลิเมตร แต่เครื่องมือเหล่านี้มักมีราคาที่สูงและต้องถนอมเป็นพิเศษ ส่วนเทคนิคการฉายภาพรูปร่างสีเหลี่ยม แล้วถ่ายภาพนำมาคำนวณโดยดูจากรูปร่างของแสงที่บิดเบี้ยวไป วิธีการหารูปร่างจากแสงและเงา วิธีการนี้จะสร้างภาพรูปร่างของวัตถุได้จากภาพถ่ายเดี่ยวและทราบตำแหน่งที่แน่นอนของแหล่งกำเนิดแสงและสมบัติของพื้นผิววัตถุ โดยที่การสะท้อนแสงของผิววัตถุจะมีผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ ภาพบางชนิดอาจไม่สามารถหารูปร่างของวัตถุได้ถูกต้อง

ในการขบวนการถ่ายภาพตัด ทำได้ด้วยการแทนภาพเงาของวัตถุโดยตรงด้วยภาพเงาดำในจำนวนมุมมองที่มากพอ ทำให้สามารถสร้างภาพตัดขวางของวัตถุขึ้นมาได้ ซึ่งจะได้ภาพที่ถูกต้องเฉพาะโครงสร้างภายนอกเท่านั้นโดยไม่ได้ภาพลักษณะภายในเลย ดังนั้นการใช้เทคนิคสร้างภาพตัดขวางจากภาพถ่ายที่มุมมองรอบๆ วัตถุจึงสามารถบอกได้เพียงปริมาตรของวัตถุเท่านั้น และยังมีข้อจำกัดถ้าวัตถุมีรูปร่างเว้าลึกมาก ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพสเตอริโอโดยมีวัตถุประสงค์ที่จะหากระบวนการในการบอกตำแหน่งของวัตถุซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันในภาพทั้งสอง โดยมีแนวคิดที่จะฉายภาพของจุดแสงที่ได้เข้ารหัสไบนารีไว้ลงบนวัตถุและถ่ายภาพออกมาเมื่อได้ภาพครบตามที่ได้กำหนดไว้ก็นำมาถอดรหัสเพื่อหาตำแหน่งของจุดภาพที่สัมพันธ์กัน

7.2.1 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคสเตอริโอ [61]

พิกัดต่างๆของวัตถุ สามารถคำนวณออกมาได้เมื่อใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบสเตอริโอ โดยการใช้กล้องถ่ายภาพ 2 ตัววางอยู่ในระนาบเดียวกันและมีแกนที่ขนานกันอย่างสมบูรณ์ อาจเรียกต่อไปว่ากล้องซ้ายและกล้องขวาซึ่งจะถ่ายภาพของวัตถุขึ้นเดียวกัน สามารถคำนวณ พิกัดสามมิติเมื่อเทียบกับพิกัดโลกได้ดังแสดงในรูปที่ 7.1 และคำนวณ พิกัดต่างๆได้ด้วยสมการ

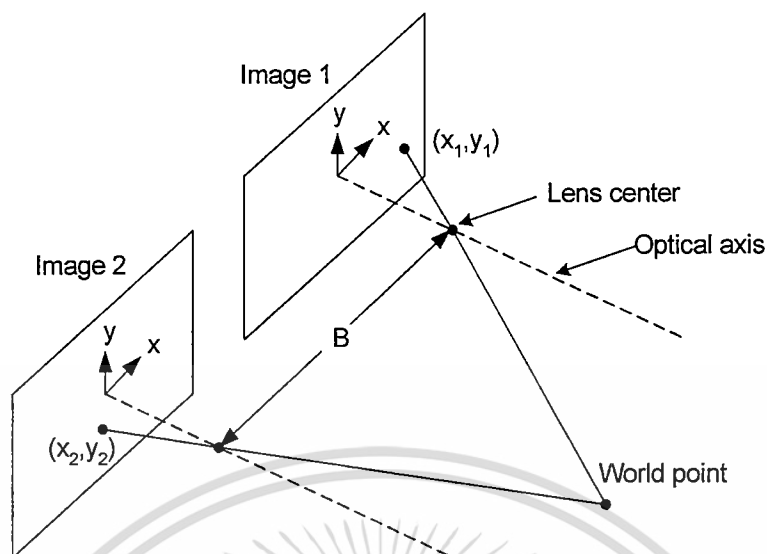
$$Z = f - \frac{fB}{x_2 - x_1} \quad (7.1)$$

$$X = \frac{x_1}{f}(f - Z) \quad (7.2)$$

$$Y = \frac{y_1}{f}(f - Z) \quad (7.3)$$

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

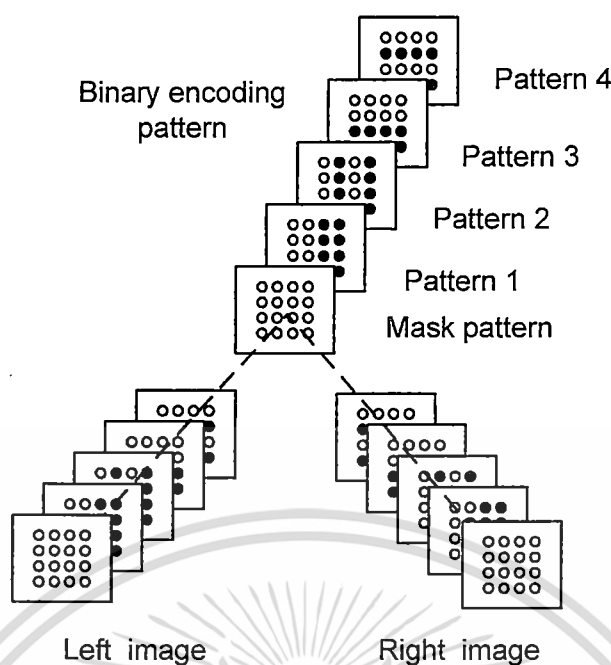
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1 ระบบการถ่ายภาพสเตอริโอ

7.2.2 การเข้ารหัสไบนารี

ขั้นตอนการเข้ารหัสไบนารีภาพทำได้โดยสร้างชุดภาพที่มีจุดภาพที่เรียกว่าติดซึ่งมีจุดแสงและดับซึ่งไม่มีจุดแสงโดยจะใช้แทนรหัส 1 และ 0 ในระบบเลขฐานสองตามลำดับ จากนั้นฉายภาพจุดแสงที่เข้ารหัสไว้ลงบนวัตถุแล้วถ่ายภาพด้วยกล้องซ้ายและกล้องขวาดังรูปที่ 7.2 โดยภาพแรกเป็นการถ่ายภาพที่เรียกว่า หน้ากาก (Mask pattern) ซึ่งเป็นภาพที่มีจุดแสงครบทุกจุดตามที่ได้กำหนดไว้ ดังภาพตัวอย่างมีจำนวนจุดแสงอยู่ทั้งหมด 16 จุด เมื่อถ่ายภาพแรกจากกล้องทั้งสองได้แล้วจะคำนวณหาจุดกึ่งกลางของจุดแสงทุกๆจุดของทั้งภาพซ้ายและภาพขวาและจะถือว่าจุดกึ่งกลางจุดหนึ่งของภาพซ้ายจะมีจุดๆเดียวของภาพขวาที่เป็นจุดเดียวกันกับภาพซ้าย จากนั้นฉายภาพที่สอง (pattern 1) ด้วยกล้องทั้งสองอีกและจะนับเป็นการเข้ารหัสภาพบิตที่ 1 ไว้ โดยมีลำดับการติดดับของจุดแสงดังรูปที่ 7.2 นำภาพมาคำนวณหาว่าที่จุดใดๆของภาพหน้ากากบ้างที่มีการติดและดับโดยการรวมค่าความเข้มแสงของจุดภาพขนาด 5×5 จุดภาพรอบจุดแต่ละจุดถ้าระดับของความเข้มมีค่ามากกว่าระดับขีดขั้นที่ตั้งไว้ก็จะกำหนดสถานะเป็น 1 และถ้าระดับความเข้มมีค่าต่ำกว่าค่าขีดขั้นที่ตั้งไว้ก็จะกำหนดสถานะให้เป็น 0 จากนั้นถ่ายภาพที่สามขณะที่ฉายภาพ (pattern 2) ทำตามขั้นตอนเดิมจนครบทั้ง 5 ภาพ ในกรณีตัวอย่างมีจำนวนจุดภาพทั้งหมด 16 จุด จึงต้องเข้ารหัสด้วยการใช้ภาพ 4 ภาพหรือ 4 บิต (2^4) เมื่อถ่ายภาพได้ครบตามจำนวนบิตที่ต้องการและแปลงความหมายของจุดติดดับแล้ว ทำให้จุดภาพแต่ละจุดมีรหัสของตนเองที่ไม่ซ้ำกับจุดใดในภาพของตนเองและจะมีเพียงหนึ่งจุดภาพเท่านั้นของอีกภาพหนึ่งที่มีรหัสตรงกัน ซึ่งเป็นจุดภาพบนวัตถุจุดเดียวกันนั่นเอง

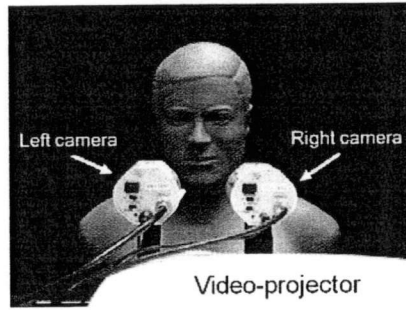


รูปที่ 7.2 การเข้ารหัสไบนารี

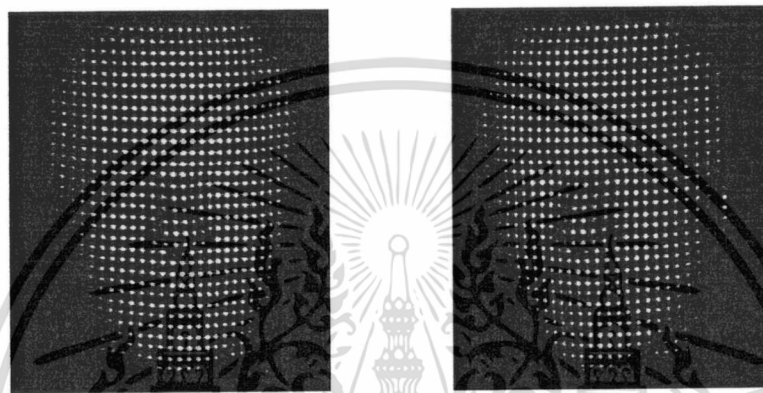
7.2.3 การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองได้ทดลองกับหุ่นจำลองใบหน้ามนุษย์ในสภาวะแสงปกติ ดังรูปที่ 7.3 โดยมีระยะห่างระหว่างกล้อง 10 เซนติเมตรและวางใบหน้าหุ่นจำลองที่ระยะ 50 เซนติเมตรจากกล้อง ส่วนเครื่องถ่ายภาพวางอยู่ตรงกลางระหว่างกล้องทั้งสอง ห่างมาทางด้านหลังประมาณ 10 เซนติเมตรและต่ำกว่ากล้องประมาณ 10 เซนติเมตร ในการทดลองกับใบหน้าใช้จุดแสงจำนวน 32×32 จุด ซึ่งเท่ากับ 1024 จุดแสง ดังรูปที่ 7.4 ทำให้ต้องใช้ภาพรหัสจำนวน 10 ภาพ หรือ 10 บิต ดังรูปที่ 7.5 ซึ่งแสดงภาพรหัสของจุดแสงที่ฉายและถ่ายได้จากกล้องซ้าย เมื่อนำไปคำนวณเพื่อสกัดหาตำแหน่งจุดแสง ดังรูปที่ 7.6 โดยในรูปนี้แสดงภาพขยายของจุดแสงบางบริเวณ โดยใช้เครื่องหมายบวกสีแดงเป็นตำแหน่งจุดกึ่งกลางแสงที่คำนวณได้ จุดภาพแสงที่ปรากฏบนใบหน้าหุ่นมีขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตรและมีระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของจุดในแนวนอนประมาณ 5 มิลลิเมตรและระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของจุดในแนวตั้งประมาณ 7.5 มิลลิเมตร รูปที่ 7.7 และรูปที่ 7.8 แสดงผลการคำนวณหาพิกัดของจุดแสงจากภาพที่ได้จากกล้องซ้ายและขวาตามลำดับ การถ่ายภาพใช้กล้องถ่ายภาพสี TOPICA รุ่น TP6001A ความยาวโฟกัส 6 มิลลิเมตรและใช้การ์ดรับภาพ Matrox รุ่น Meteor II ติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Pentium IV 2.4 GHz ใช้เวลาในการถ่ายภาพประมาณ 20 วินาที และใช้เวลาในการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งที่สอดคล้องกันของภาพจากกล้องซ้ายและภาพจากกล้องขวาเพื่อสร้างภาพของใบหน้าดังรูปที่ 7.9 ในระบบพิกัด 3 มิติเพียง 2-3 วินาที

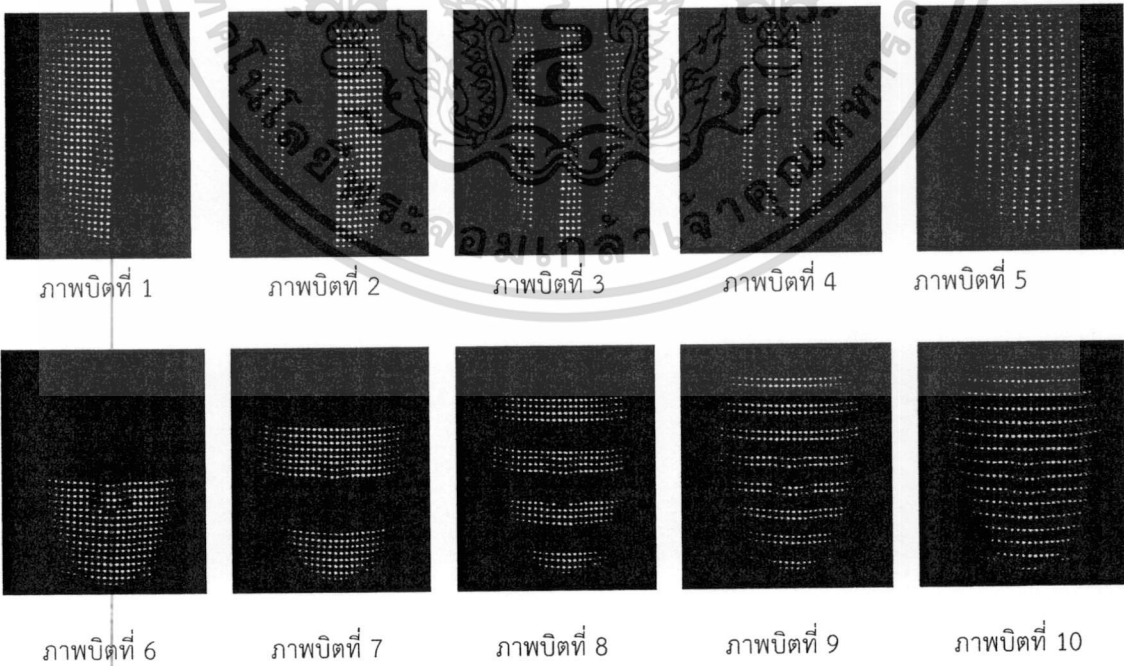
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 การจัดระบบการทดลอง

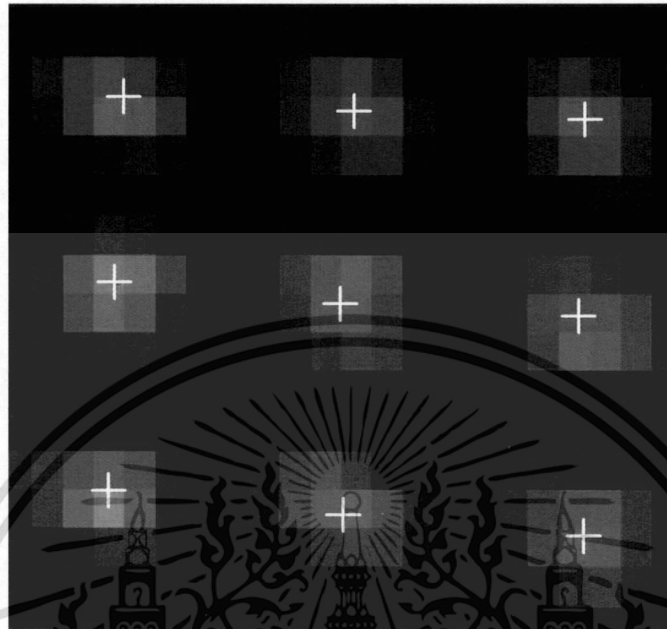


รูปที่ 7.4 จำนวนจุดแสงทั้งหมด (1024จุด) ใน ก.กล้องซ้ายและ ข.กล้องขวา



รูปที่ 7.5 ภาพจุดแสงที่แสดงตำแหน่งจุดต่างๆ ของแต่ละรหัสภาพไว้ตั้งแต่บิตที่ 1 -10 ของภาพซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.6 ภาพขยายให้เห็นตำแหน่งของจุดที่แสงที่คำนวณได้



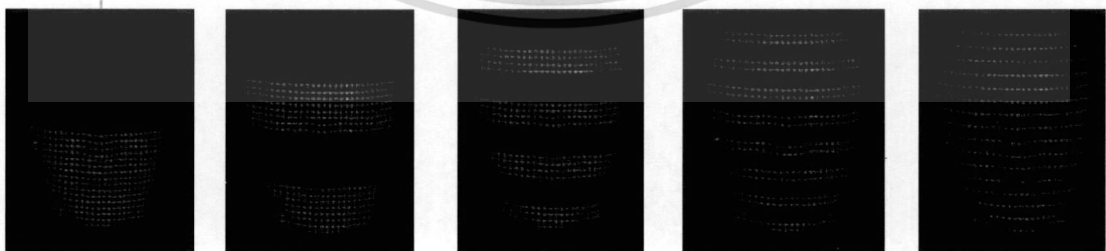
ภาพบิตที่ 1

ภาพบิตที่ 2

ภาพบิตที่ 3

ภาพบิตที่ 4

ภาพบิตที่ 5



ภาพบิตที่ 6

ภาพบิตที่ 7

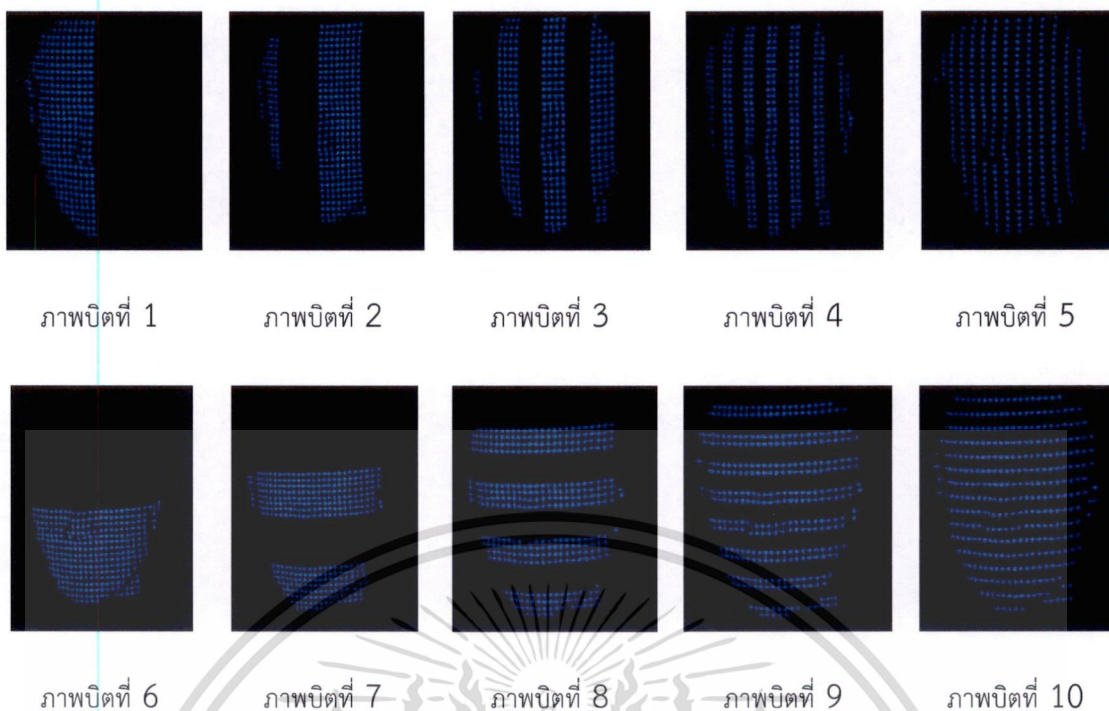
ภาพบิตที่ 8

ภาพบิตที่ 9

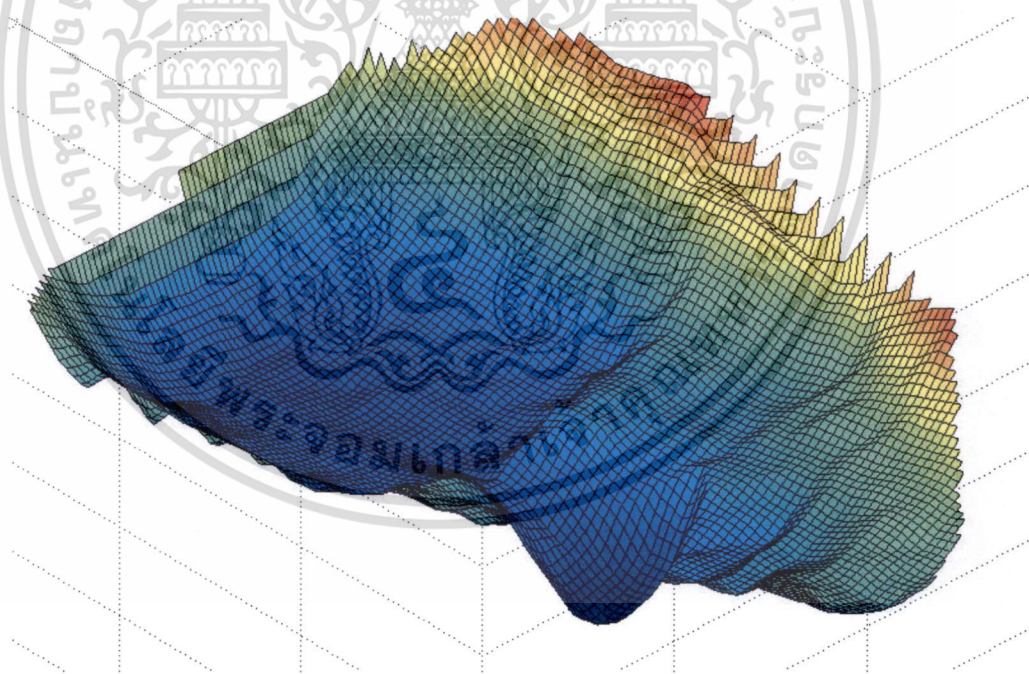
ภาพบิตที่ 10

รูปที่ 7.7 ภาพตำแหน่งจุดต่างๆ ที่คำนวณได้ ของแต่ละรหัสภาพไวดังแต่บิตที่ 1 -10 ของภาพซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.8 ภาพตำแหน่งจุดต่างๆ ที่คำนวณได้ ของแต่ละรหัสภาพไวดิงแต่บิตที่ 1 -10 ของภาพขวา



รูปที่ 7.9 ภาพพื้นผิวใบหน้าหุ่นมนุษย์ที่สร้างขึ้นได้ [61]

จากการทดลองเพื่อสร้างภาพสามมิติของใบหน้านี้ เป็นการนำเทคนิคการหาพิกัดของวัตถุโดยหาตำแหน่งที่ปรากฏในภาพที่เป็นจุดเดียวกันนำมาคำนวณหาพิกัดในระบบโคออดิเนตของโลกโดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

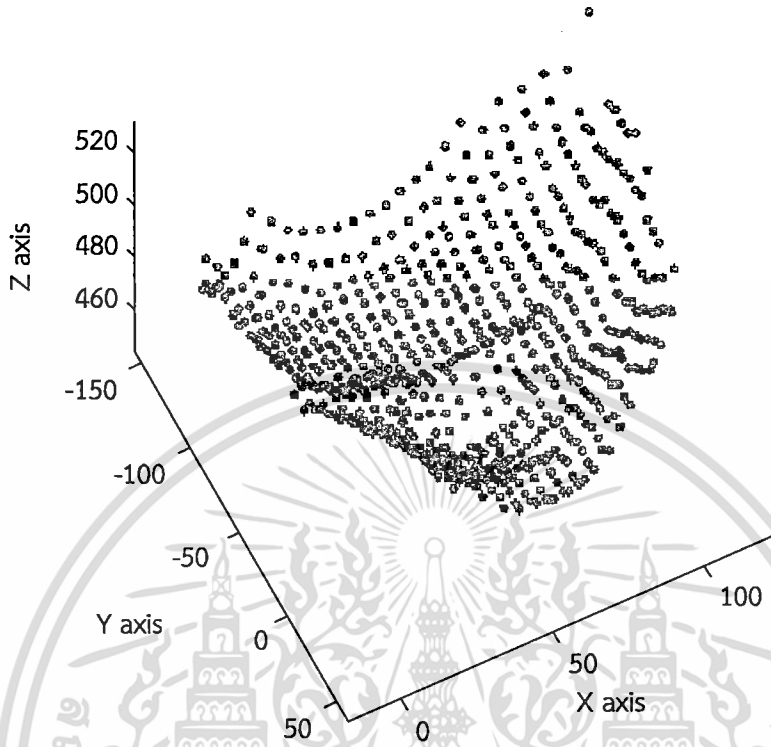
เทคนิคการถ่ายภาพสเตอริโอ และใช้วิธีการเข้ารหัสการถ่ายภาพแบบไบนารีโดยฉายชุดของภาพจุดแสงที่เข้ารหัสไว้เมื่อนำภาพมาวิเคราะห์สามารถจำแนกจุดแสงของภาพจากภาพซ้ายและภาพขวาที่มีรหัสตรงกันได้แล้วนำผลไปคำนวณพิกัดสามมิติได้ หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาต่อไปถึงเรื่องพื้นผิวของใบหน้า ว่าทำอย่างไรจึงจะสามารถหาลักษณะเด่นของใบหน้าแต่ละคนออกมาได้ และลักษณะเด่นนี้ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าใบหน้านั้นจะมีอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน

7.3 ข้อมูลภาพสามมิติ

ข้อมูลที่ได้จากการสแกนด้วยระบบการสร้างภาพสามมิติ มีลักษณะเป็นจุดโคออดิเนตสามมิติที่กระจายไปตามรูปร่างภายนอกของวัตถุ อาจเรียกว่า Point cloud data มักแทนด้วย X, Y และ Z ดังตัวอย่างในตารางที่ 7.1 แสดงจุดข้อมูลภาพสามมิติจำนวน 627 จุดที่ได้จากระบบถ่ายภาพสามมิติ และในรูปที่ 7.10 เป็นภาพตัวอย่างของข้อมูลภาพสามมิติ ที่นำเอาพิกัดจุดภาพไปวางไว้ ณ จุดต่างๆ

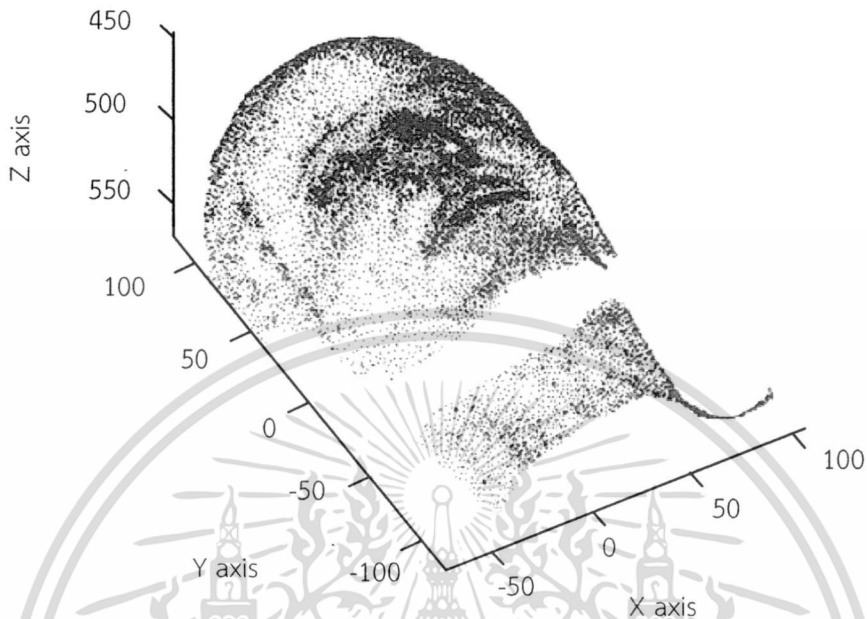
ตารางที่ 7.1 ตัวอย่างข้อมูลจุดภาพสามมิติ $P(X_i, Y_i, Z_i)$

ลำดับ	X	Y	Z
1	-17.3508	-75.4108	521.5136
2	11.5882	-48.6114	486.9267
3	22.2112	-5.3361	489.0944
4	32.9446	-33.9965	476.4650
5	43.6382	-98.5063	461.6738
6	53.9327	-117.1855	462.9371
7	64.3997	-58.5946	472.7351
8	74.3455	-22.4090	478.7281
...
627	96.6032	-125.2500	486.2235



รูปที่ 7.11 ตัวอย่างข้อมูลภาพสามมิติ ของใบหน้า

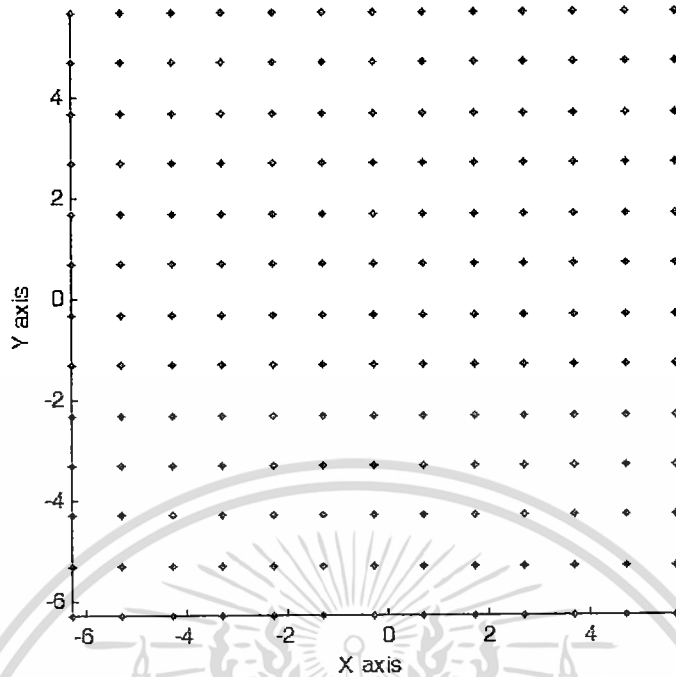
ต่อมาผู้วิจัยได้นำเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์เข้ามาทดลองใช้ เป็นรุ่น eScan3D ของบริษัท 3D digital corp. โดยให้ความละเอียดได้ 0.135-0.210 มิลลิเมตร ที่ระยะการทำงาน 300-650 มิลลิเมตร สแกนใบหน้าหุ่นจำลองใน รูปที่ 7.3 ได้ข้อมูลใบหน้าสามมิติของหุ่นจำลอง ดังรูปที่ 7.11 เป็นตัวอย่างภาพใบหน้าที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกนแบบเลเซอร์ ได้ข้อมูลจำนวน 14837 จุดภาพ



รูปที่ 7.11 ตัวอย่างข้อมูลภาพสามมิติ ของใบหน้าที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ

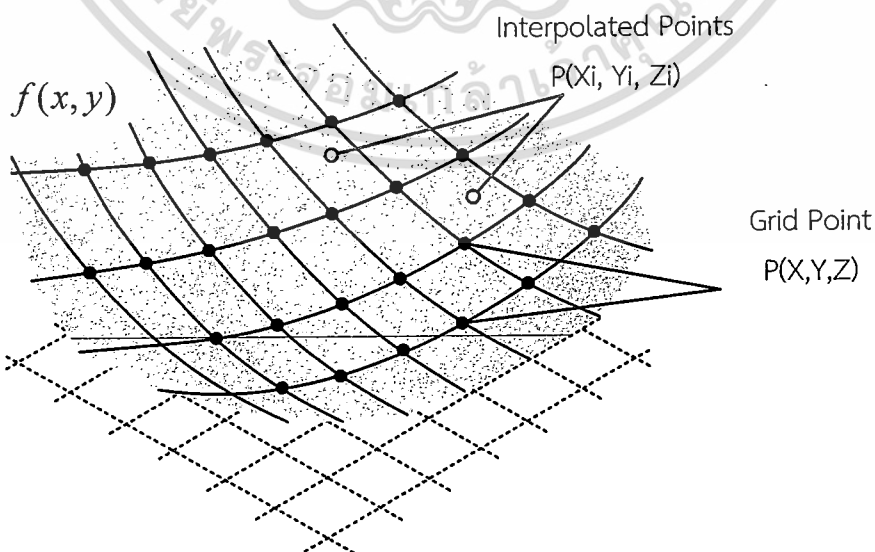
7.4 การสร้างภาพพื้นผิวสามมิติ

การสร้างภาพพื้นผิวสามมิติ ผู้วิจัยได้สร้างจุดกริดซึ่งเป็นเซตของพิกัด (X, Y) โดยคำนวณจากขนาดของใบหน้าโดยทั่วไปจะมีขนาดไม่เกิน 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 7.12



รูปที่ 7.12 ตัวอย่างการสร้างจุดตารางบนพื้นที่ -2π ถึง 2π จำนวน 13×13 จุด

จำนวนตารางจุดที่เหมาะสม ในการทดลองพบว่าจำนวนตารางจุดนั้นยังมีจำนวนจุดมากขึ้นก็ จะให้รายละเอียดในการสร้างภาพที่สูงขึ้นแต่จะใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้นตามไปด้วย ผู้วิจัยจึง เลือกใช้จำนวนที่น้อยที่สุดเท่าที่พอจะยอมรับคุณภาพของภาพได้และไม่ได้เกินกว่าความสามารถของ เครื่องสแกนเลเซอร์ จากนั้นจึงคำนวณหาพิกัด Z บนจุด (X, Y) เพื่อให้ได้พิกัด (X, Y, Z) โดยการ ประมาณค่าจากข้อมูลภาพสามมิติ $P(X_i, Y_i, Z_i)$ (Point cloud data) ดังรูปที่ 7.13



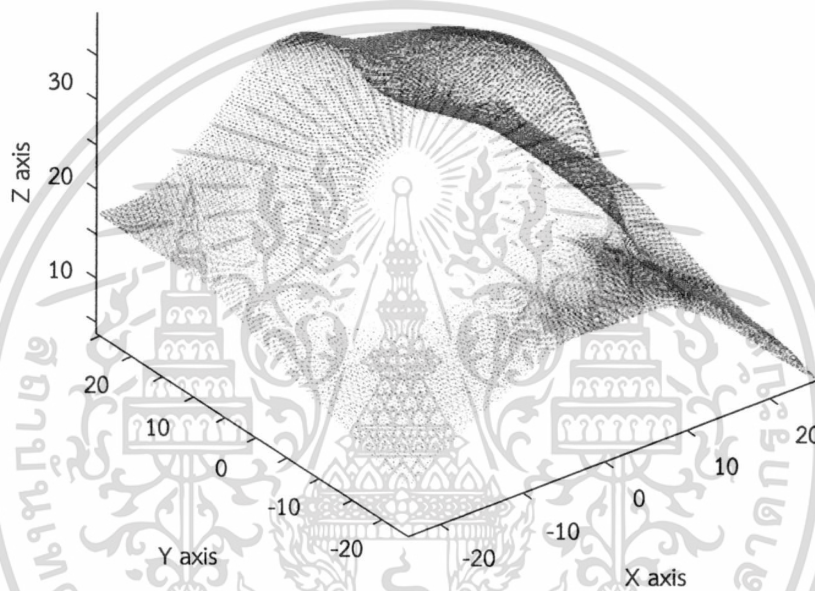
รูปที่ 7.13 การหาพิกัด Z ณ ตำแหน่งตารางจุด (X, Y) จากข้อมูลภาพสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย คำนวณ Z จาก Bicubic interpolation

$$Z(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (7.4)$$

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



รูปที่ 7.14 ข้อมูลพื้นผิวภาพ 3มิติ ที่นำบริเวณปลายจุมกมาแสดงเท่านั้น

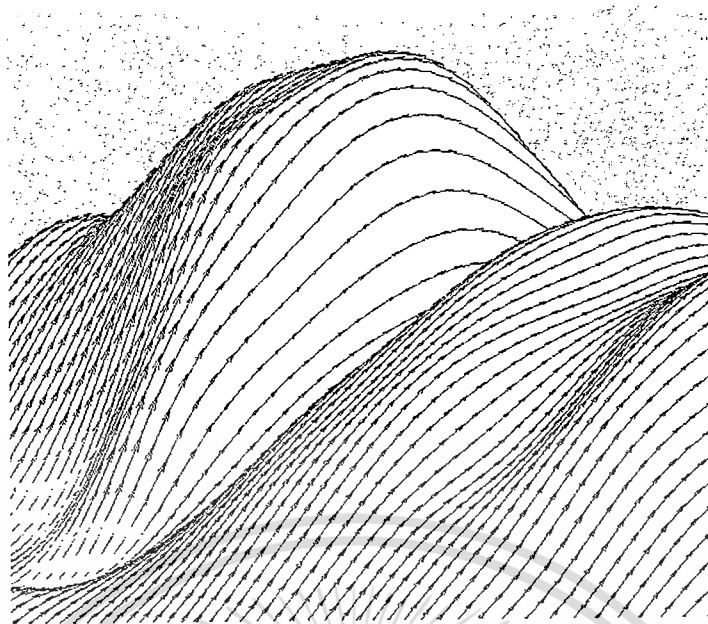
การสร้างพื้นผิวสามมิติดังรูปที่ 7.14 ซึ่งเป็นรูปตัวอย่างพื้นผิวบริเวณปลายจุมก จากการกำหนดให้สร้างพื้นผิว 3 มิติ ขึ้นจากตารางจุด (x, y) ที่ห่างกันจุดละ 0.25 มิลลิเมตร

7.5 เวกเตอร์สัมผัส

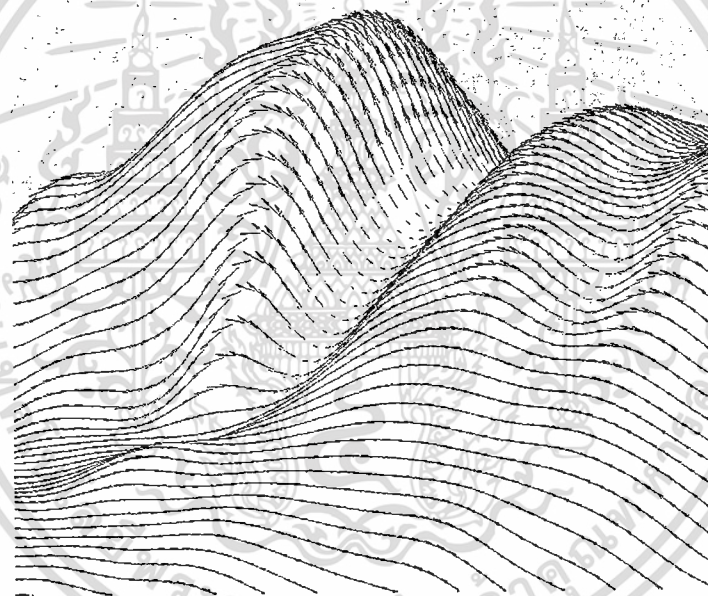
นำข้อมูลผิวหน้าที่มาคำนวณหาค่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 เพื่อหาเส้นสัมผัสของผิวหน้าเทียบกับแกน X และแกน Y ดังรูปที่ 7.15 ก.และ ข. ตามลำดับ แสดงเส้นสัมผัสผิวหน้าบริเวณปลายจุมก เส้นสัมผัสผิวหน้าเทียบกับแกน X และ Y คำนวณจาก

$$r^{(1,0)} = \frac{\partial r}{\partial u} \quad \text{และ} \quad r^{(0,1)} = \frac{\partial r}{\partial v} \quad (7.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. $(r^{1,0})$ เวกเตอร์



ข. $(r^{0,1})$ เวกเตอร์

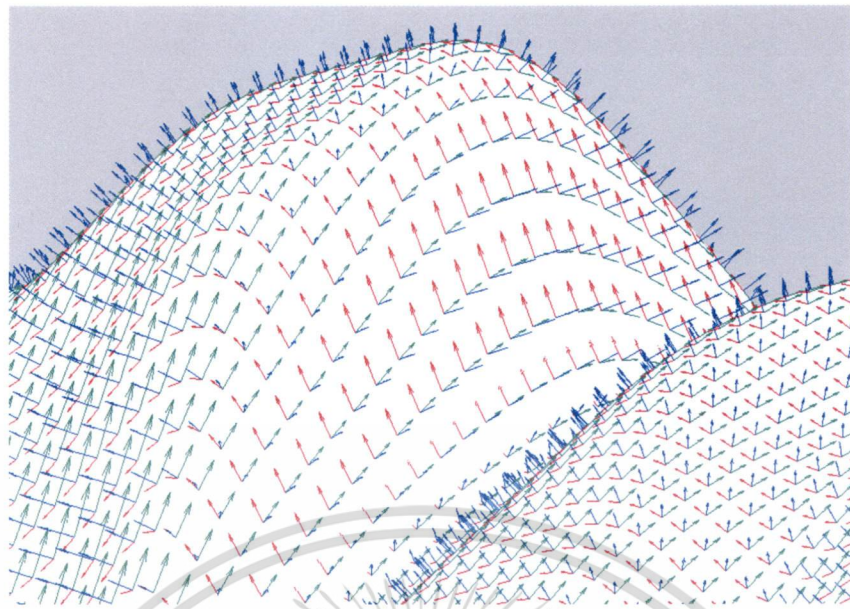
รูปที่ 7.15 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y [62]

7.6 เวกเตอร์ปกติ

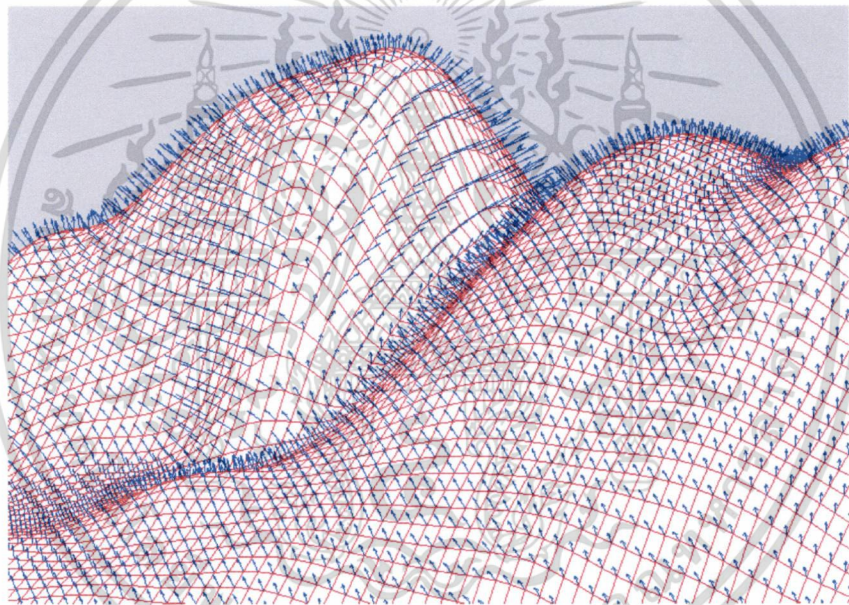
นำเส้นสัมผัสแกน X และ แกน Y มาคำนวณหา เวกเตอร์ตั้งฉากหรือเวกเตอร์ปกติได้ผลแสดงดังรูปที่ 7.16 ก. ซึ่งแสดงทั้งเวกเตอร์ปกติและเวกเตอร์ที่สัมผัสผิวหน้าในแนวแกน X และแกน Y ส่วนรูปที่ 7.16 ข. แสดงเวกเตอร์ปกติบริเวณปลายจมูกโดยคำนวณจาก

$$N = \frac{\langle r^{(1,0)} \times r^{(0,1)} \rangle}{|r^{(1,0)} \times r^{(0,1)}|} \quad (7.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



ข. เวกเตอร์ปกติ (N) ตั้งฉากกับผิวหน้า

รูปที่ 7.16 ภาพเส้นสัมผัสผิวหน้าในแกน X และแกน Y และเวกเตอร์ปกติ [62]

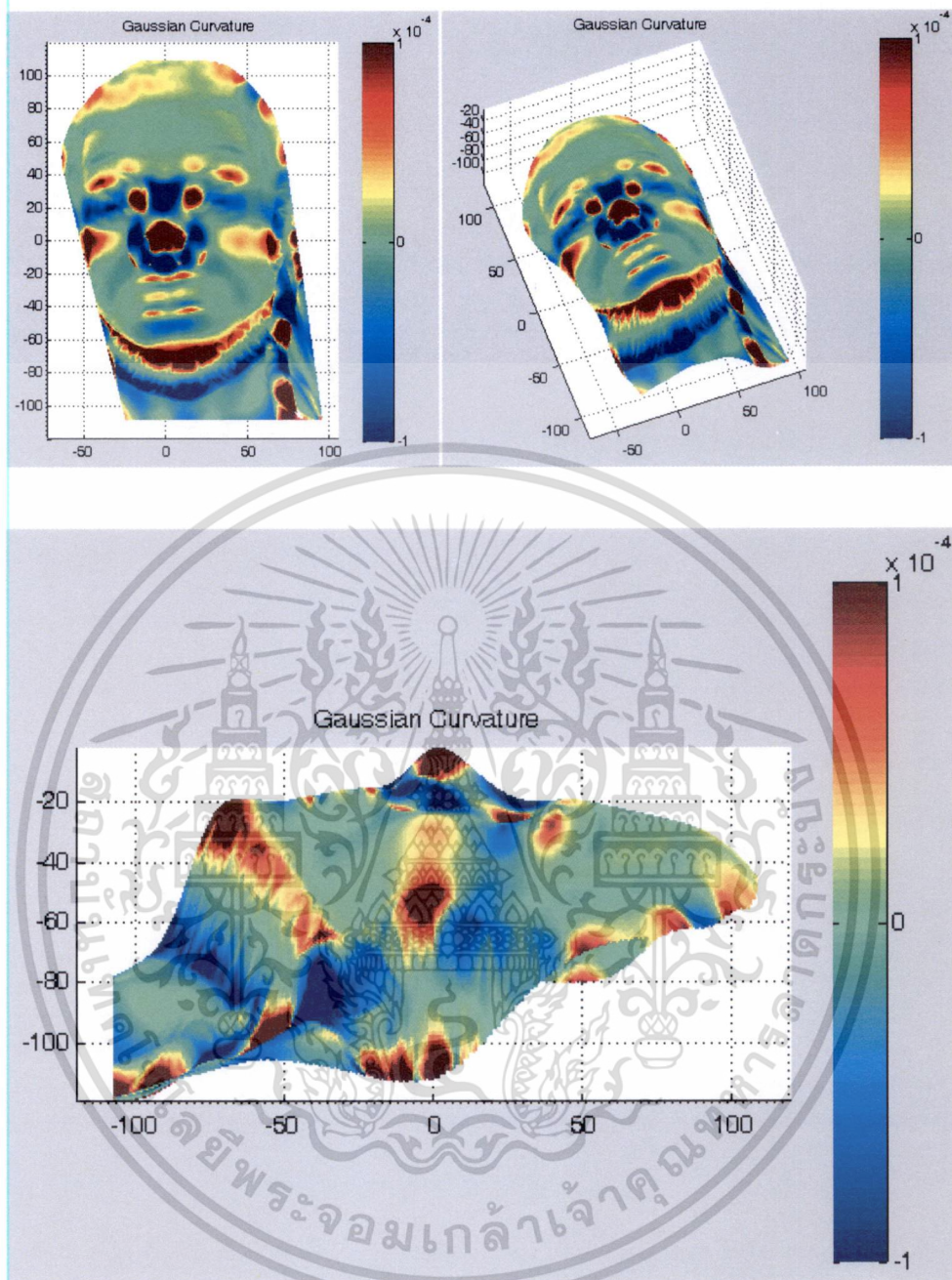
7.7 คำนวณหาความโค้งเกาส์เซียน

คำนวณความโค้งเกาส์เซียนได้โดยคำนวณจากอัตราส่วนของดีเทอร์มิแนนของพารามิเตอร์ พื้นฐานที่สองและพื้นฐานที่หนึ่ง รูปที่ 7.17 แสดงค่าระดับความโค้งเกาส์เซียน ที่มุมมองต่างๆ โดยมี แถบสีแสดงค่าความโค้งร่วมด้วย บริเวณสีแดงเข้มหมายถึงบริเวณที่มีค่าความโค้งเกาส์เซียนสูง (พื้นผิวนูนขึ้น) ส่วนบริเวณสีน้ำเงินเข้มหมายถึงบริเวณที่มีค่าความโค้งเกาส์เซียนต่ำ (พื้นผิวเว้าลง)

$$k_G = \frac{\det II}{\det I} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (7.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

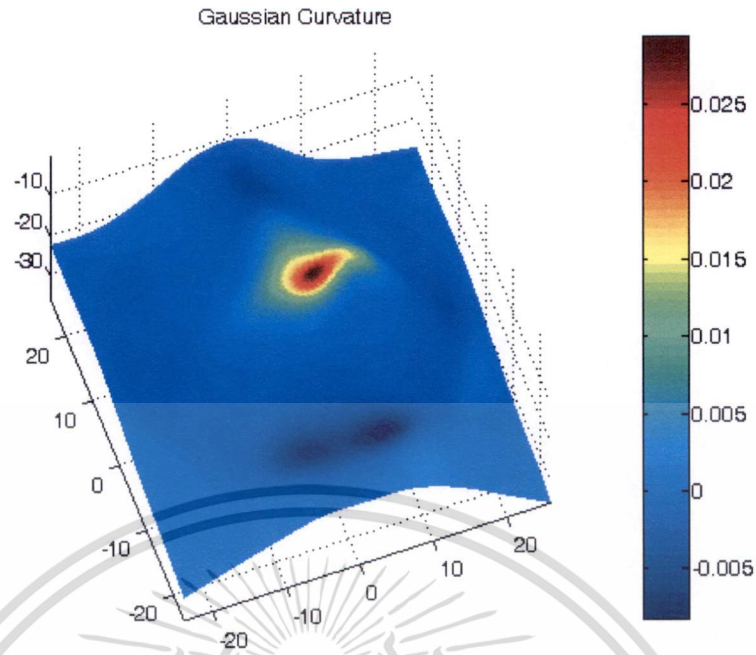
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



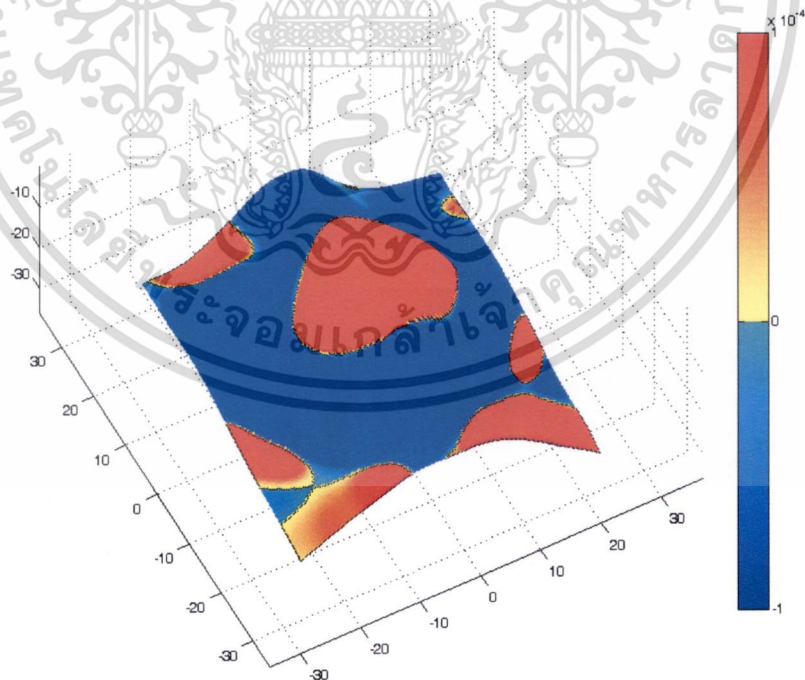
รูปที่ 7.17 ความโค้งเกาส์เซียน

เพื่อให้เห็นขั้นตอนการทดลองที่ชัดเจนจึงขอถ่ายภาพเฉพาะบริเวณปลายจมูกขึ้นมาแสดงเท่านั้น ดังในรูปที่ 7.18 เป็นภาพของความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูก แสดงให้เห็นว่ามีค่าความโค้งเกาส์เซียนประมาณ -0.005 ถึง ประมาณ 0.025 mm^{-2} รูปที่ 7.19 เป็นภาพความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูกที่ปรับระดับการแสดงผลให้แสดงตั้งแต่ -0.1×10^{-4} ถึง 1×10^{-4} เพื่อให้แสดงรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงค่าความโค้งจากค่าที่เป็นลบผ่านศูนย์สู่ค่าที่เป็นบวกอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.18 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูก



รูปที่ 7.19 ความโค้งเกาส์เซียนบริเวณปลายจมูกที่ปรับระดับการแสดงผล

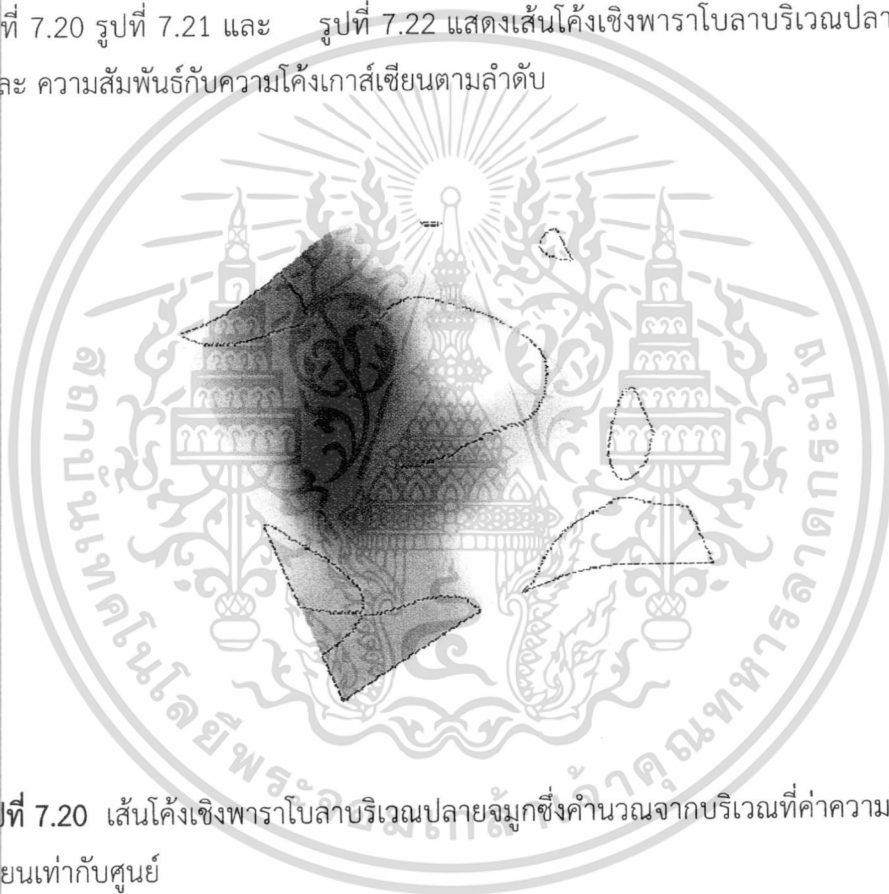
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.8 การคำนวณหาเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

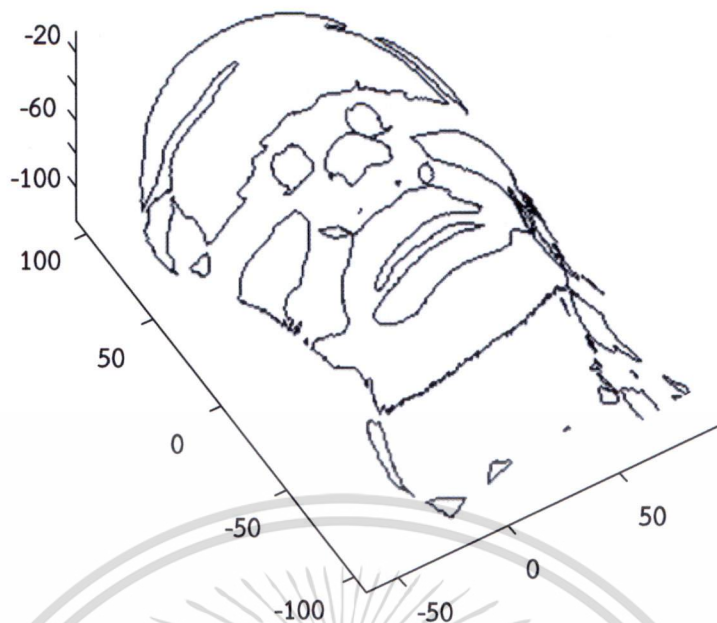
เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคำนวณจากบริเวณที่ความโค้งเกาส์เซียนมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงบริเวณที่มีการโค้งงอของพื้นผิวที่เปลี่ยนรูปร่างจากรูปโค้งหงายเป็นโค้งคว่ำ โดยคำนวณจากสมการ 3.36

$$k_G = \frac{\det II}{\det I} = \frac{LN-M^2}{EG-F^2} = 0 \quad (7.8)$$

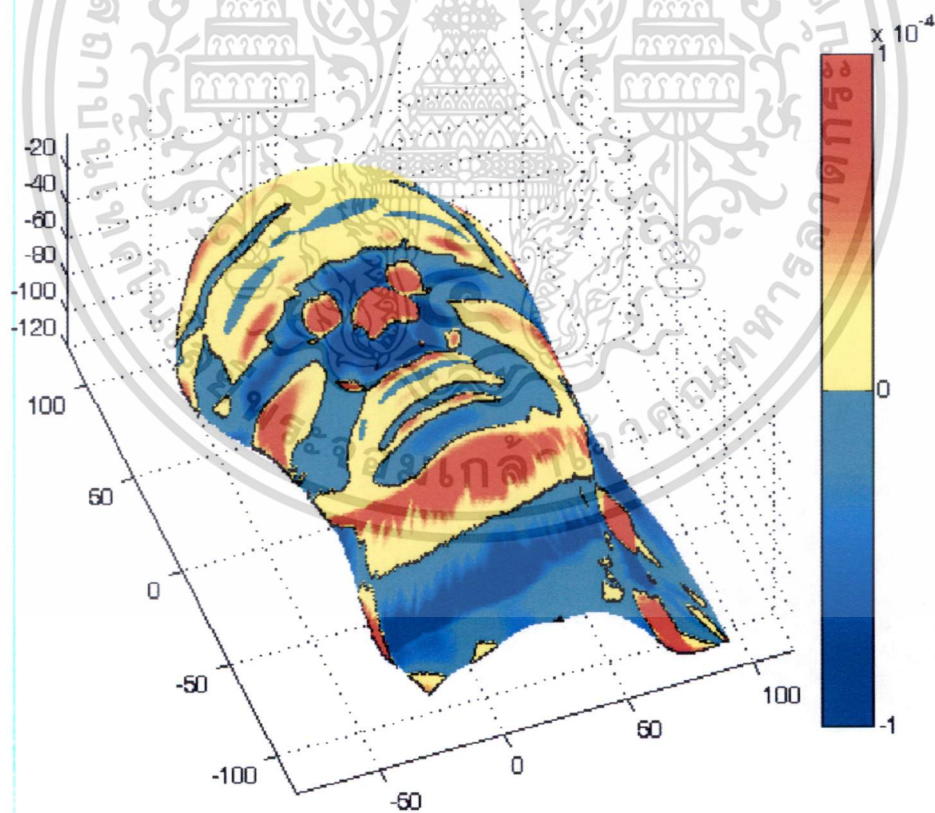
รูปที่ 7.20 รูปที่ 7.21 และ รูปที่ 7.22 แสดงเส้นโค้งเชิงพาราโบลาระยะปลายจุมก บน ใบหน้า และ ความสัมพันธ์กับความโค้งเกาส์เซียนตามลำดับ



รูปที่ 7.20 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาระยะปลายจุมกซึ่งคำนวณจากบริเวณที่ค่าความโค้งเกาส์เซียนเท่ากับศูนย์



รูปที่ 7.21 เส้นโค้งเชิงพาราโบลบนใบหน้า

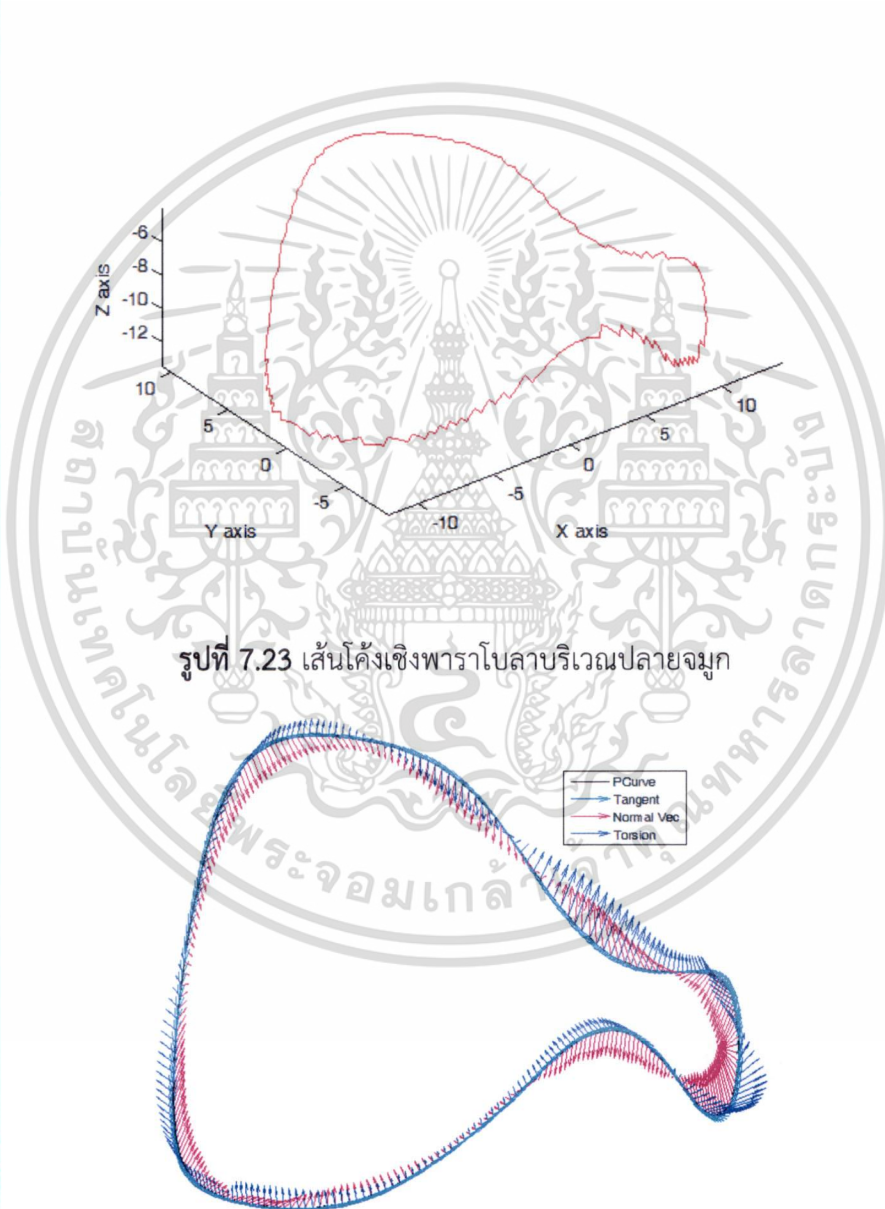


รูปที่ 7.22 เส้นโค้งเชิงพาราโบลที่แสดงอยู่บนใบหน้าระดับสีของความโค้งเกาส์เซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.9 การคำนวณหาตำแหน่งจุดเด่นเอกลักษณ์

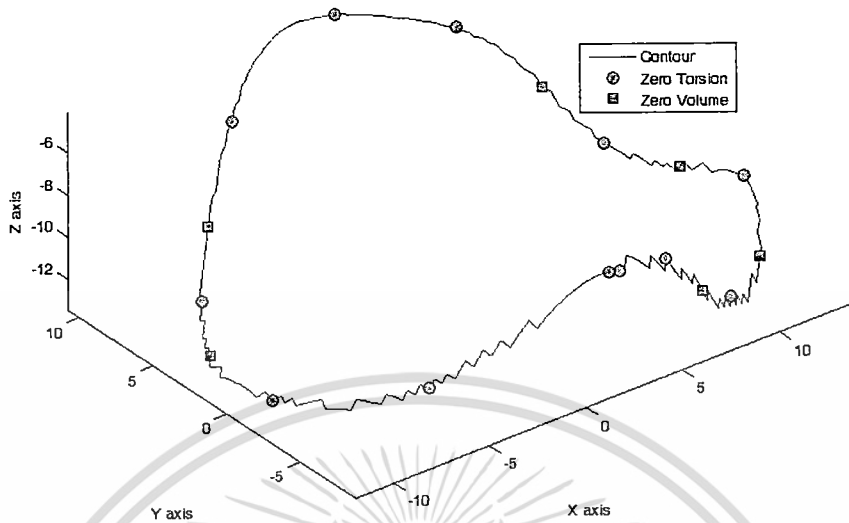
เป็นการคำนวณหาบริเวณที่มีการบิดงอ เปลี่ยนมุมหรือเปลี่ยนระนาบของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา โดยคำนวณจากบริเวณที่ค่าปริมาตรเท่ากับศูนย์ และค่าแรงบิดเท่ากับศูนย์ โดยคำนวณจากผลลัพท์ของสามเวกเตอร์ ค่าปริมาตรเท่ากับศูนย์ $v_1(t) = \langle r^{(0)}(t) \times r^{(1)}(t), r^{(2)}(t) \rangle$ ค่าแรงบิดเท่ากับศูนย์ $v_2(t) = \langle r^{(1)}(t) \times r^{(2)}(t), r^{(3)}(t) \rangle$ เมื่อ $r^{(0)}, r^{(1)}, r^{(2)}$ และ $r^{(3)}$ คืออนุพันธ์ลำดับต่างๆ ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา r รูปที่ 7.23 เส้นโค้งเชิงพาราโบลามีบริเวณปลายจมุกที่คำนวณได้จากขั้นตอน 7.7



รูปที่ 7.23 เส้นโค้งเชิงพาราโบลามีบริเวณปลายจมุก

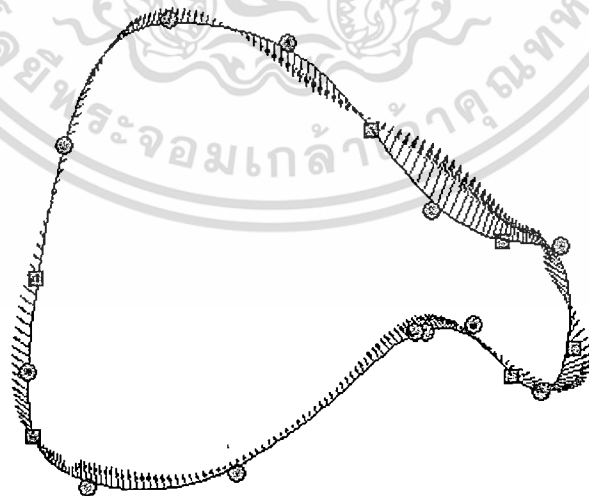
รูปที่ 7.24 เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคือแสดงเวกเตอร์เส้นสัมผัสเป็นสีฟ้า เวกเตอร์ปกติเป็นสีชมพู และเวกเตอร์ที่แสดงแรงบิดเป็นสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



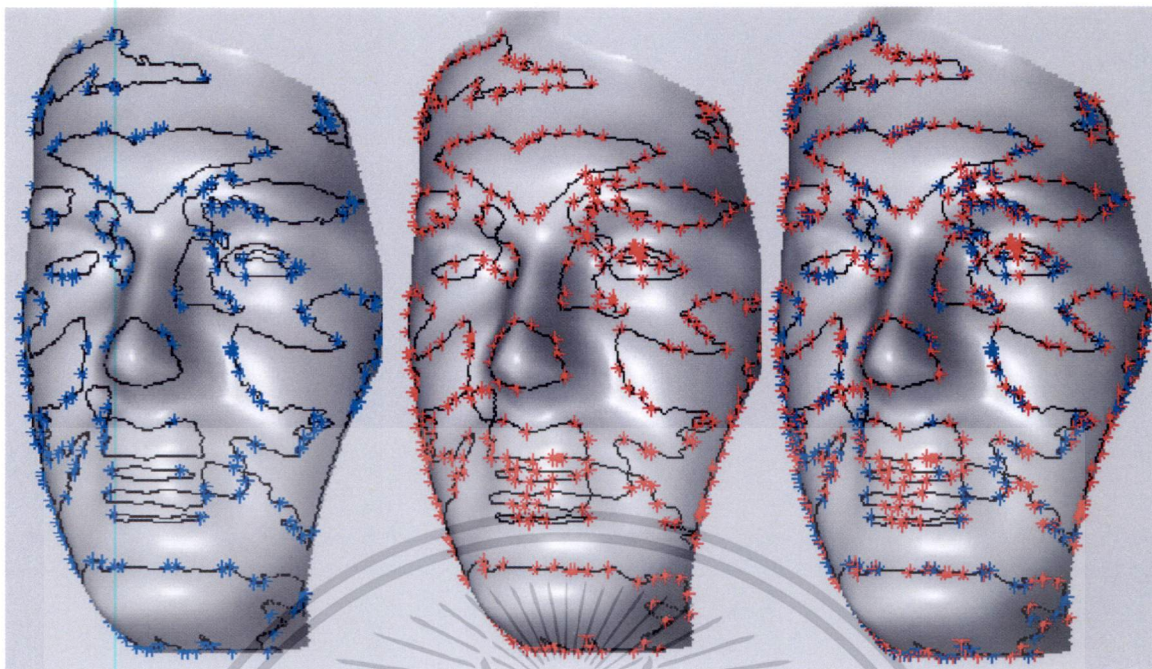
รูปที่ 7.25 เส้นโค้งเชิงพาราโบลابرเวณปลายจุมกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง) และจุดที่ปริมาตรเป็นศูนย์ (จุดสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน)

รูปที่ 7.24 แสดงแรงบิดที่เกิดขึ้นบนเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า ส่วนรูปที่ 7.25 แสดงตำแหน่งที่ปริมาตรสามเวกเตอร์และแรงบิดเท่ากับศูนย์ รูปที่ 7.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตำแหน่งที่ปริมาตรสามเวกเตอร์และแรงบิดเท่ากับศูนย์ รูปที่ 7.27 จุดเด่นเอกลักษณ์บนภาพใบหน้าตัวอย่าง



รูปที่ 7.26 เส้นโค้งเชิงพาราโบลابرเวณปลายจุมกแสดงจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์ (จุดกลมสีแดง) และจุดที่ปริมาตรเป็นศูนย์ (จุดสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. จุดปริมาตรเป็นศูนย์

ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์

ค. จุดปริมาตรเป็นศูนย์และ

จุดแรงบิดเป็นศูนย์

รูปที่ 7.27 จุดเอกลักษณ์บนใบหน้า (*) ที่อยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

ก. จุดปริมาตรเป็นศูนย์ Zero-volume (v_1) points

ข. จุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-torsion (t_2) points

ค. จุดปริมาตรเป็นศูนย์และจุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-volume (v_1) points and Zero-torsion (t_2) points

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

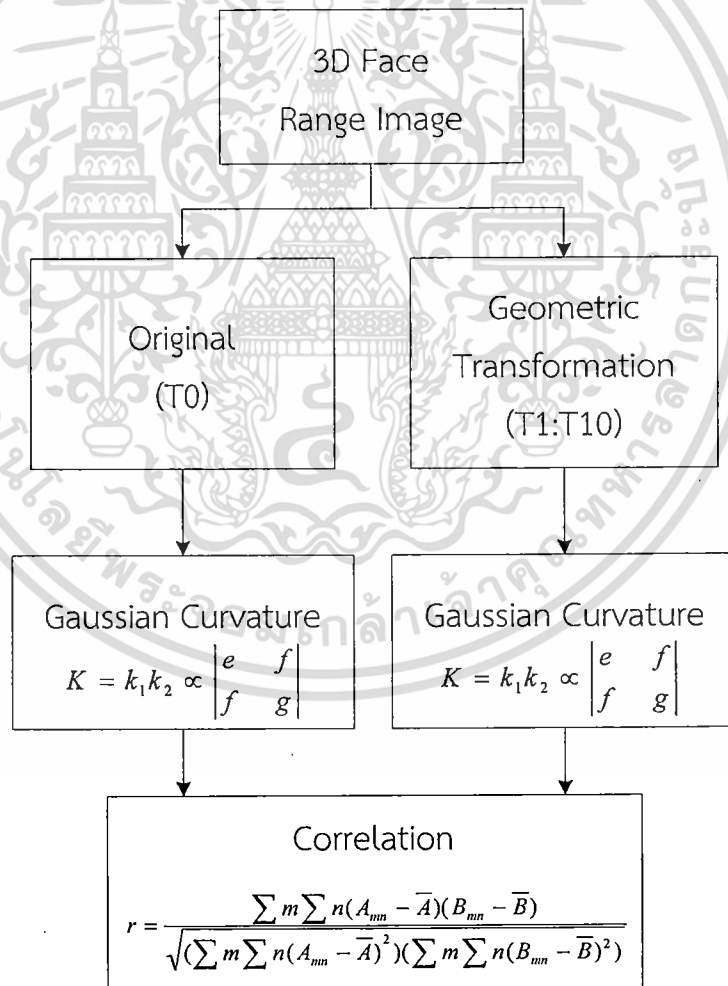
8.1 บทนำ

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

แนวคิดในการออกแบบการทดลองคือ ทำการทดลองพื้นฐานก่อนแล้วเพิ่มระดับการทดลองสู่ความซับซ้อนที่สูงขึ้น เนื่องจากตัวแปรที่ซับซ้อนที่สุดในการทดลองคือ จุดแรงบิดเป็นศูนย์คำนวณได้จากเส้นโค้งเชิงพาราโบลา เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคำนวณได้จากความโค้งเกาส์เซียน และความโค้งเกาส์เซียนคำนวณได้จากพิกัดพื้นผิวของใบหน้า ดังนั้นจึงเริ่มทดลองจากตัวแปรพื้นฐานก่อนคือ ความโค้งเกาส์เซียน เมื่อทดสอบโปรแกรมจนมั่นใจความถูกต้องแล้วจึงเพิ่มระดับสู่ตัวแปรที่ซับซ้อนขึ้นคือ เส้นโค้งเชิงพาราโบลา และจุดแรงบิดเป็นศูนย์ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Matlab เป็นเครื่องมือ การทดลองทั้งหมดประกอบด้วย หัวข้อที่ 8.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ หัวข้อที่ 8.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ หัวข้อที่ 8.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน หัวข้อที่ 8.5 การทดลองซ้อนทับภาพการและจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติ โดยใช้ข้อมูลภาพบริเวณจมูก หัวข้อที่ 8.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอ้าปากค้าง หัวข้อที่ 8.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล

8.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ

การทดลองหาความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ มีลำดับขั้นตอนการทดลอง ดังรูปที่ 8.1 โดยคำนวณตามสมการที่ 5.1 $K = k_1 k_2 \propto \begin{vmatrix} e & f \\ f & g \end{vmatrix}$ และ ค่าเฉลี่ยของความโค้งเกาส์เซียน จาก $K_m = \frac{1}{2}(k_1 k_2)$ ซึ่งจะทำให้เราสามารถบอกรูปร่างของพื้นผิวได้ ดังรูป 3.14 วัตถุประสงค์ ของการทดลองนี้ เพื่อพิสูจน์ว่าความโค้งเกาส์เซียนสามารถคงทนต่อการแปลงต่างๆ ได้หรือไม่ การทดลองทำโดยนำข้อมูลภาพที่ได้จากการสแกนหุ่นจำลองด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท 3D 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



รูปที่ 8.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพความโค้งเกาส์เซียน

ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 8.2 รูปใบหน้าที่นูนบับ แสดงรูปร่างของพื้นที่บริเวณต่างๆของ ใบหน้าด้วยสีที่แตกต่างกัน โดยถ้าค่าความโค้งเกาส์เซียนมีค่าเป็นลบหมายถึงบริเวณที่เว้าลง (concave) แสดงเป็นสีน้ำตาล (เว้ามาก) และสีเหลือง (เว้าน้อย) ส่วนบริเวณที่ค่าความโค้งเกาส์เซียน มีค่าเป็นบวกหมายถึงพื้นที่ที่นูน (convex) ขึ้นมาจากผิวหน้า แสดงเป็นสีน้ำเงิน (นูนมาก) และสีฟ้า (นูนน้อย) รูปที่ 8.3 ก ข ค และ ง รูปหุ่นจำลองแสดงรูปร่างพื้นผิวภายใต้การแปลงแบบหมุน (Rotate) รูปที่ 8.4 ก ข และ ค รูปหุ่นจำลองแสดงรูปร่างพื้นผิวภายใต้การแปลงแบบขยายขนาด (Scale) รูปที่ 8.5 ก ข และ ค รูปหุ่นจำลองแสดงรูปร่างพื้นผิวภายใต้การแปลงแบบเฉือน (Shear)

ผลการทดลองเชิงปริมาณ ได้ใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติ (3D Correlation coefficient) โดยคำนวณจาก

$$r = \frac{\sum m \sum n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum m \sum n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum m \sum n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (8.1)$$

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

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



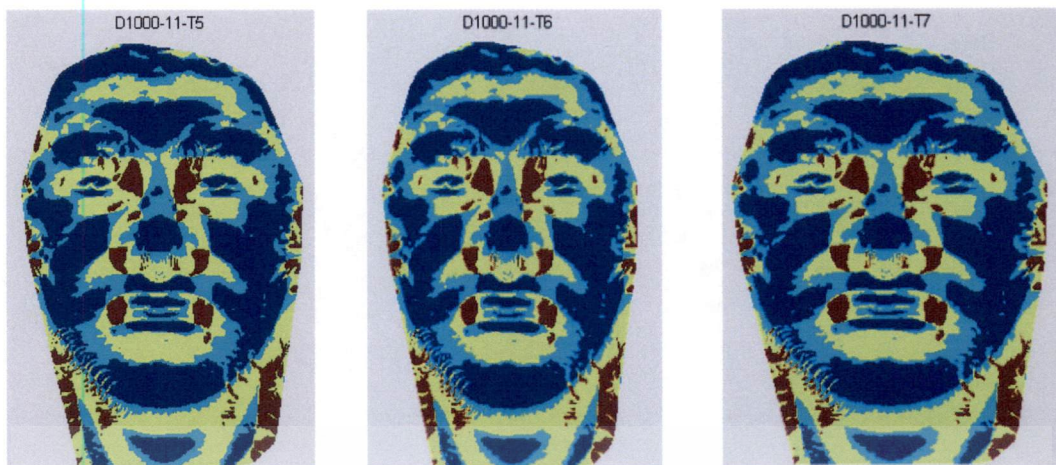
รูปที่ 8.2 รูปร่างพื้นผิวของใบหน้าต้นฉบับหน้าตรง [63]



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

รูปที่ 8.3 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบหมุน ก.ก้มหน้า 10 องศา ข.หันหน้าไปทางขวา 10 องศา ค.เงยหน้า 10 องศา ง.เอียงคอไปทางขวา 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ยืดขนาดตามแกน X 10%
(Scale X)

ข. ยืดขนาดตามแกน Y 10%
(Scale Y)

ค. ยืดขนาดตามแกน Z 10%
(Scale Z)

รูปที่ 8.4 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลงแบบยืดขนาด ก. ยืดขนาดตามแกน X 10% ข. ยืดขนาดตามแกน Y 10% และ ค. ยืดขนาดตามแกน Z 10%



ก. เฉือนตามแกน X 10%
(Shear X)

ข. เฉือนตามแกน Y 10%
(Shear Y)

ค. เฉือนตามแกน Z 10%
(Shear Z)

รูปที่ 8.5 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลง ก. เฉือนตามแกน X 10% ข. เฉือนตามแกน Y 10% และ ค. เฉือนตามแกน Z 10%

ตารางที่ 8.1 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่แว้า (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%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1 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	0.9988	0.9952	1

ตารางที่ 8.2 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

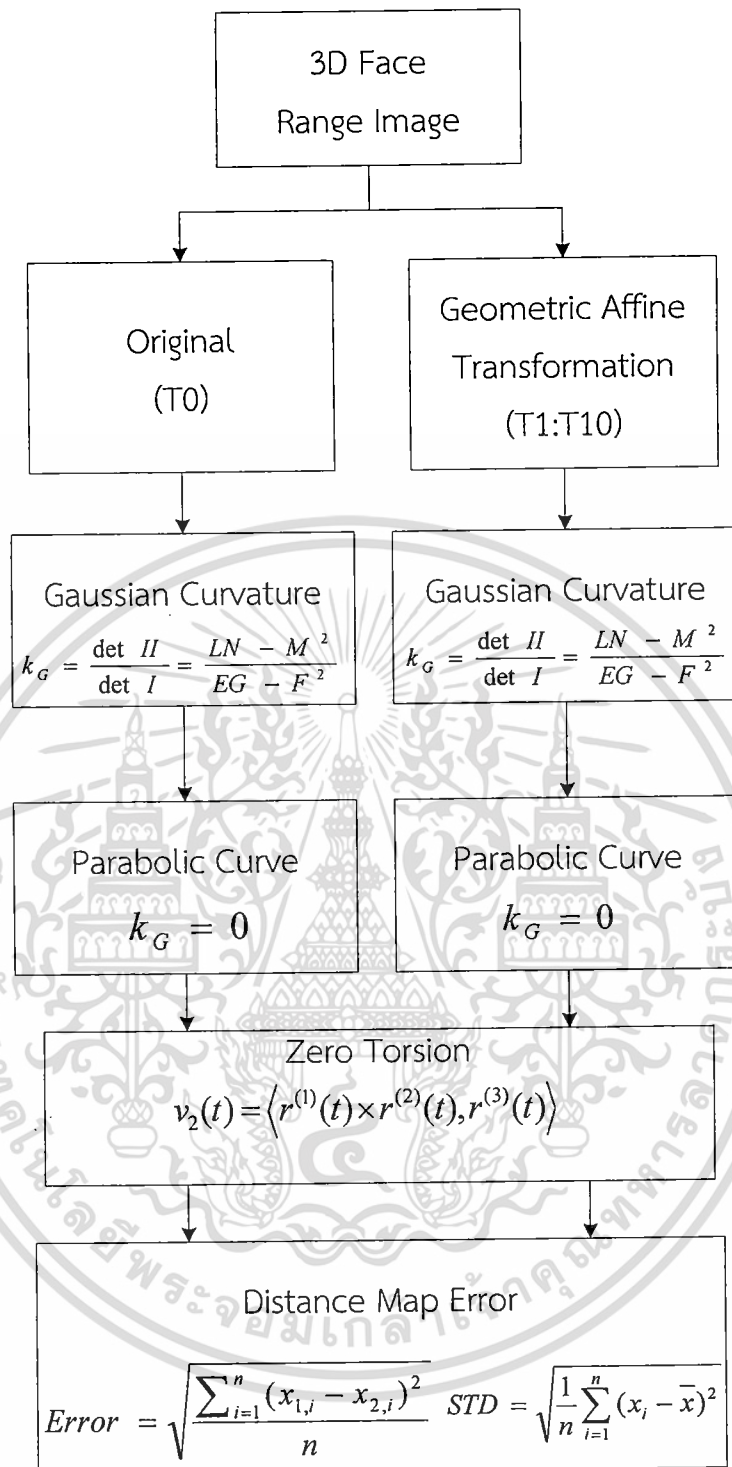
สรุปผลการทดลอง จาก รูปที่ 8.2 ถึงรูปที่ 8.5 แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวที่นูน(สีน้ำเงิน)และพื้นผิวที่เว้า(สีน้ำตาล)ของใบหน้า ที่ผ่านการแปลงชนิดต่างๆนั้น ไม่มีความแตกต่างกันจนสังเกตได้ และเมื่อวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ ดังในตารางที่ 8.1 และตารางที่ 8.2 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์นั้นพบว่าพื้นที่ทั้งเว้าและนูนของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้าผ่านการแปลงชนิดต่างๆนั้นไม่มีความแตกต่างกันโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์มากกว่า 0.9

8.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการทดสอบความคงสภาพ ของจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์ ในการทดลองนี้ ได้ใช้ภาพข้อมูลใบหน้าจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D นำมาแปลงแบบต่างๆ เช่น ก้มหน้า เงยหน้า เอียงคอ ปรับขนาด และ การเอียง แล้วนำไปคำนวณหาความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ดังรูปที่ 8.6 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 8.7 ภาพจุดแรงบิดเป็นศูนย์ (ดอกจันทร์สีแดง) บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา(เส้นสีดำ) บนใบหน้าต้นฉบับรูปที่ 8.8 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้าภายใต้การแปลงแบบหมุน ก. ก้มหน้า 10 องศา ข. เงยหน้า 10 องศา ค. หันหน้าไปทางขวา 10 องศา และ ง. เอียงคอไปทางขวา 10 องศา รูปที่ 8.9 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าภายใต้การแปลงขยายขนาด ก.ขยายขนาดตามแกน X 10% ข. ขยายขนาดตามแกน Y 10% และ ค. ขยายขนาดตามแกน Z 10% สำหรับรูปที่ 8.10 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงแบบเฉือน ก. เฉือนตามแกน X 10% ข. เฉือนตามแกน Y 10% และ ค. เฉือนตามแกน Z 10%

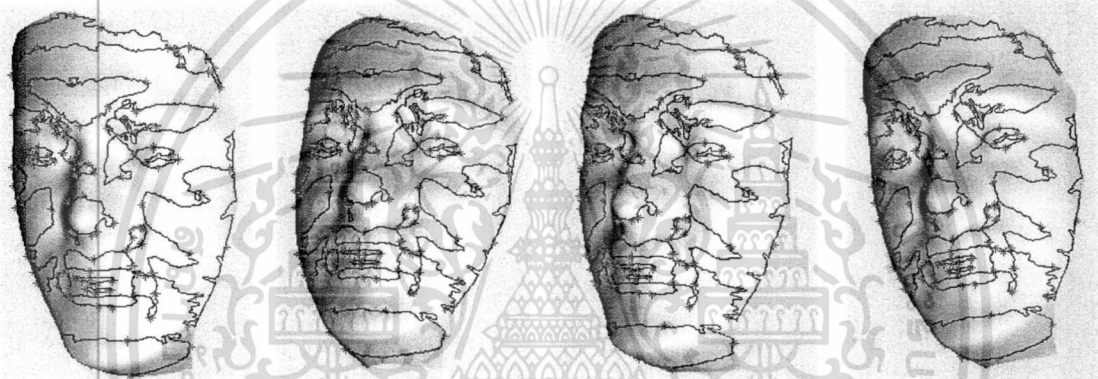




รูปที่ 8.6 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์



รูปที่ 8.7 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับ



ก.ก้มหน้า 10°
(Rotate $+X$)

ข.เงยหน้า 10°
(Rotate $-X$)

ค.หันขวา 10°
(Rotate Y)

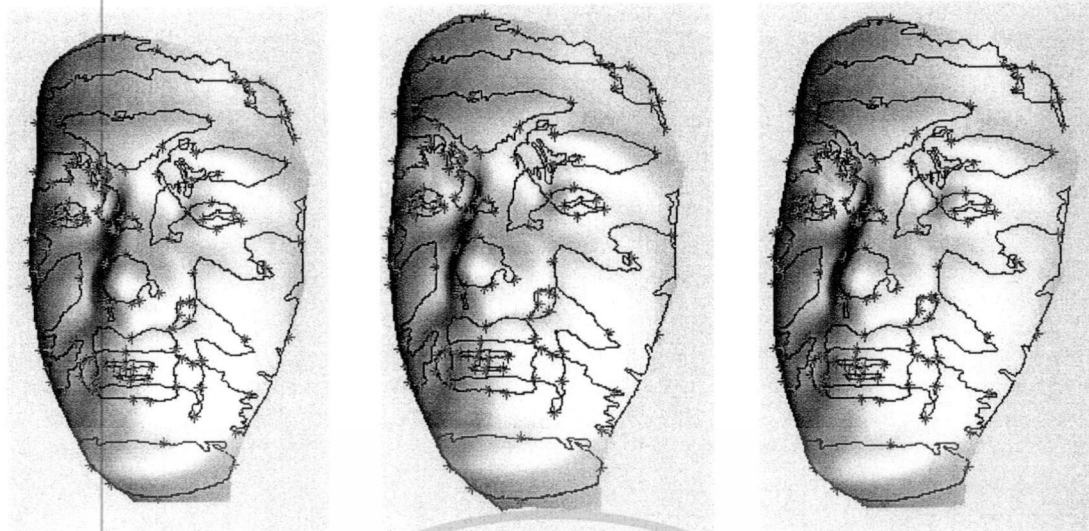
ง.เอียงคอ 10°
(Rotate Z)

รูปที่ 8.8 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้าภายใต้การแปลงแบบหมุน



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

รูปที่ 8.9 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ของใบหน้าภายใต้การแปลงขยายขนาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.เหือนตามแกน $X10\%$ ข.เหือนตามแกน $Y10\%$ ค.เหือนตามแกน $Z10\%$

รูปที่ 8.10 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงแบบเหือน

ตารางที่ 8.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของมิลลิเมตรระหว่างภาพต้นฉบับกับภายใต้การแปลงต่างๆ 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 เหือนตามแกน X 10% (Shere X) T9 เหือนตามแกน Y 10% (Shere Y) และ T10 เป็นการแปลงแบบเหือนตามแกน Z 10% (Shere Z)

ตารางที่ 8.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของมิลลิเมตรระหว่างภาพต้นฉบับกับภายใต้การแปลงต่างๆ

	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

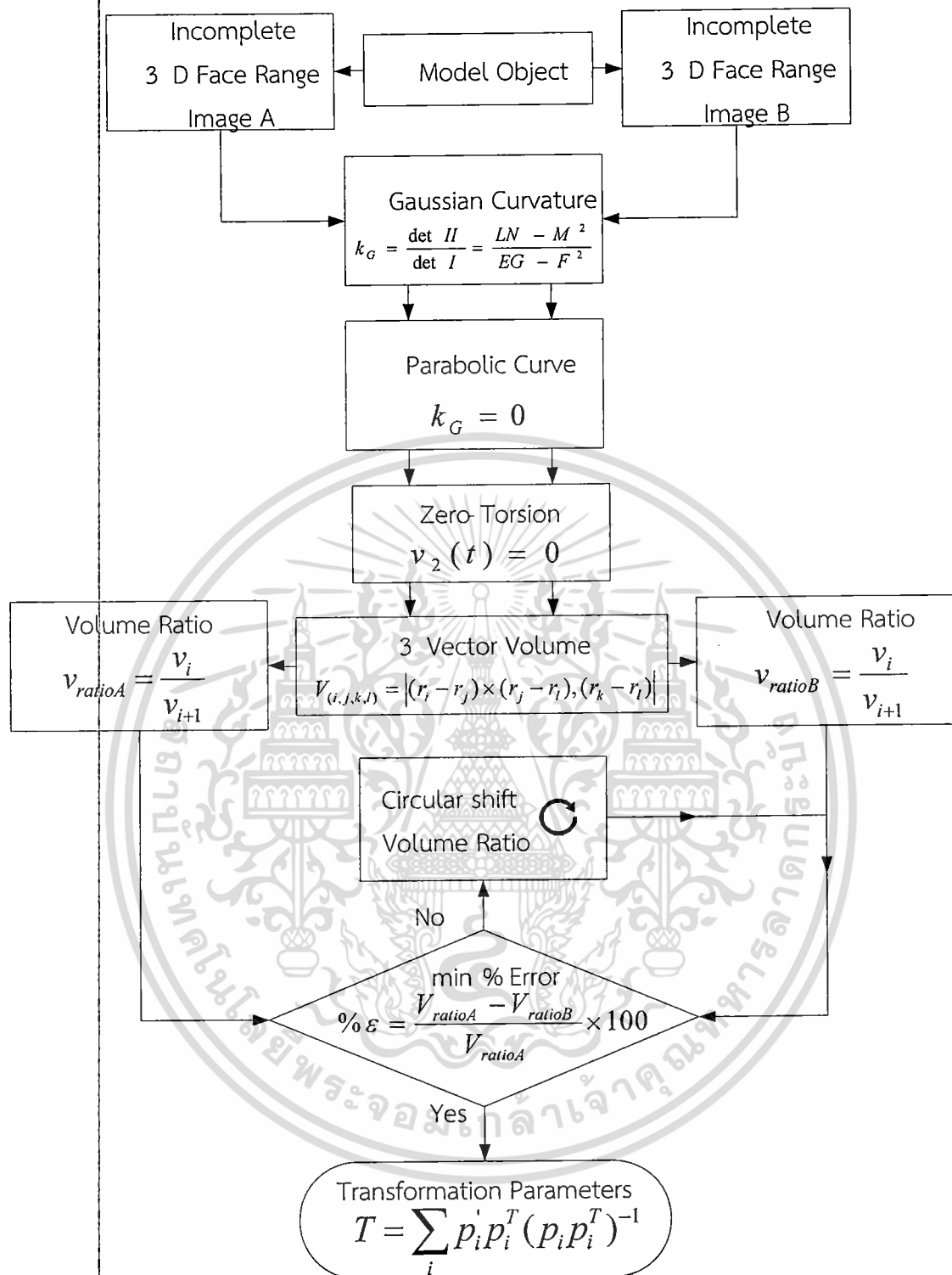
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ผ่านการแปลงชนิดต่าง ๆ นั้น พบว่าค่าความผิดพลาดของภาพที่ผ่านการแปลงแบบหมุนนั้น (T1-T4) ไม่เกิน 2.75 มิลลิเมตร แบบขยายขนาด (T5-T7) ไม่เกิน 2.4 มิลลิเมตร และแบบเอียงนั้น (T8-T10) สูงสุดอยู่ที่การแปลงแบบเอียงตามแกน Z ไม่เกิน 3.22 มิลลิเมตร โดยการแปลงทุกชนิดนั้นมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 2.71 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ความคงทนของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์นั้น มีความคงสภาพ

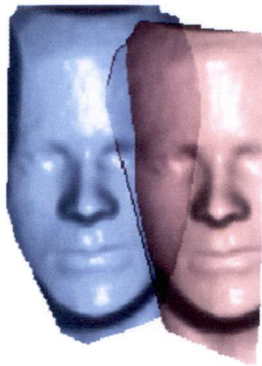
8.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน

การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถใช้ในกรณีที่ข้อมูลภาพบางส่วนขาดหายไปหรือไม่ ในการทดลองนี้ ทำตามขั้นตอนดังรูปที่ 8.11 โดยใช้เครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ เช่นเดียวกับการทดลองแรก สร้างภาพของหุ่นจำลองมนุษย์ โดยวางเครื่องสแกนห่างจากหุ่น 50 เซนติเมตร และสแกนสองครั้งโดยครั้งแรกตั้งการทำงานเครื่องสแกนให้สร้างภาพใบหน้าโดยที่ข้อมูลใบหน้าด้านขวาของใบหน้าขาดหายไปประมาณ 10% ดังรูปที่ 8.12ก ภาพใบหน้าด้านซ้าย และการสแกนครั้งที่สองของหุ่นจำลองหุ่นเดียวกันแต่ครั้งนี้ตั้งเครื่องให้สแกนใบหน้าโดยให้ข้อมูลทางด้านซ้ายของใบหน้าขาดหายไปประมาณ 30% ดังรูปที่ 8.12ก ภาพใบหน้าด้านขวา ผลการทดลองหลังการซ้อนทับภาพสามมิติในกรณีที่ข้อมูลของภาพบางส่วนขาดหายไป แสดงไว้ในรูปที่ 8.12 ข และ ง ซึ่งเป็นภาพหลังการซ้อนทับภาพ และรูปที่ 8.13ก ภาพมุมมองด้านล่างก่อนการซ้อนทับภาพ และ รูปที่ 8.13ข ภาพมุมมองด้านล่างหลังการซ้อนทับภาพใบหน้าในกรณีที่ข้อมูลของภาพขาดหายไปบางส่วน

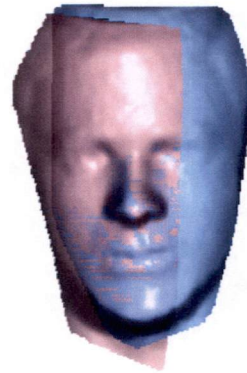


รูปที่ 8.11 ลำดับขั้นตอนการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.ภาพด้านหน้า ก่อนการซ้อนทับภาพ



ข.ภาพด้านหน้า หลังการซ้อนทับภาพ



ค.ภาพด้านข้าง ก่อนการซ้อนทับภาพ



ง.ภาพด้านข้าง หลังการซ้อนทับภาพ

รูปที่ 8.12 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก.ภาพด้านหน้าก่อนการซ้อนทับภาพ และ ข.ภาพด้านหน้าหลังการซ้อนทับภาพ ค.ภาพด้านข้างก่อนและ ง.หลังการซ้อนทับภาพ



ก.ภาพด้านล่าง ก่อนการซ้อนทับภาพ

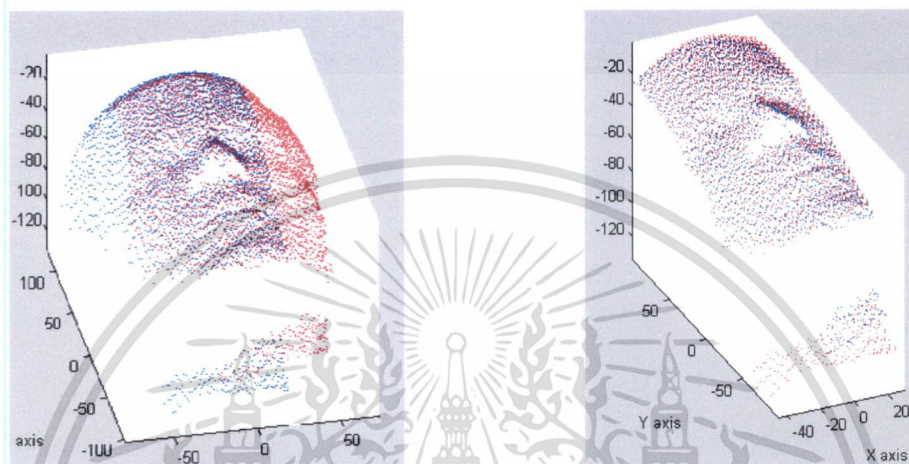


ข.ภาพด้านล่าง หลังการซ้อนทับภาพ

รูปที่ 8.13 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก.ภาพด้านล่างก่อนการซ้อนทับภาพ และ ข.ภาพด้านล่างหลังการซ้อนทับภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเชิงปริมาณ ของการซ้อนทับภาพในกรณีข้อมูลที่ใบหน้าไม่สมมาตร โดยคำนวณค่าความผิดพลาดโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการทดลองที่ 8.2 ได้ผลค่าความแตกต่างของระยะทางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยได้แยกคำนวณโดยใช้ข้อมูลทั้งใบหน้าและเฉพาะบริเวณที่ใบหน้าซ้อนทับกันดังรูปที่ 8.14 ได้ผลดังตารางที่ 8.4 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพในกรณีข้อมูลภาพสามมิติไม่สมมาตร



ก. ข้อมูลภาพหลังการซ้อนทับทั้งหมด

ข. ข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกันของข้อมูลภาพ

รูปที่ 8.14 บริเวณใบหน้าที่น่าสนใจในการคำนวณความผิดพลาดของระยะทาง

จากผลการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพสามมิติของใบหน้าที่มีข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน พบว่าเมื่อนำข้อมูลภาพที่จัดให้ตรงกันแล้วมาคำนวณหาความผิดพลาด พบว่าสูงมาก เนื่องจากข้อมูลภาพทั้งสองใบหน้าที่มีความแตกต่างกันมาก เพราะบางส่วนของภาพด้านหนึ่งขาดหายไปในขณะที่อีกด้านหนึ่งเกินขึ้นมา และเมื่อนำเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกันของภาพมาคำนวณค่าความผิดพลาด พบว่าได้ค่าที่ต่ำลงมาก โดยลดลงเหลือเพียง 1.5 มิลลิเมตร และความเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงเหลือ 0.8 มิลลิเมตร

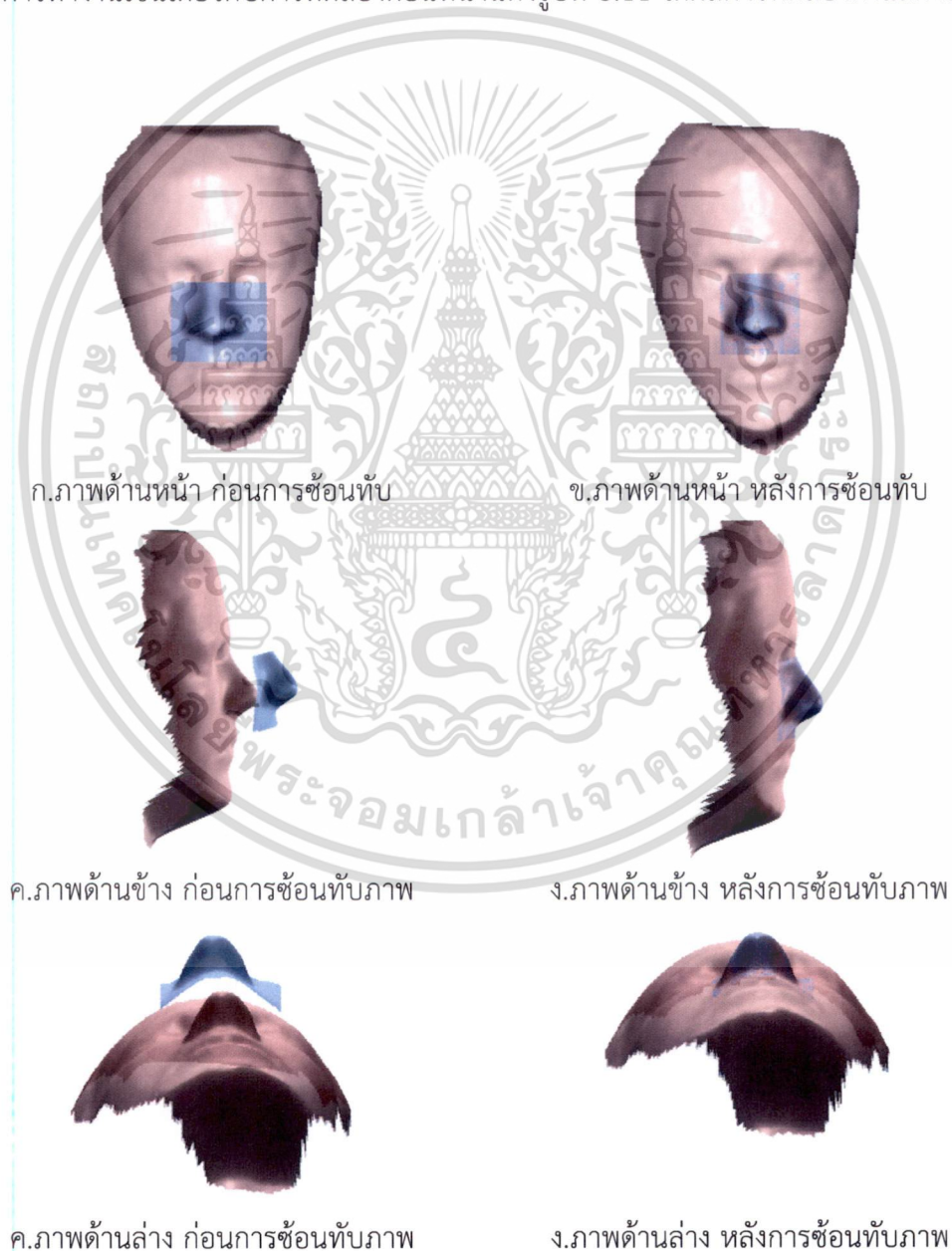
ตารางที่ 8.4 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพในกรณีข้อมูลภาพสามมิติไม่สมมาตร

หลังการจัดให้ตรงกัน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ข้อมูลทั้งใบหน้า (รูปที่ 8.14ก)	11.0758	16.6376
ข้อมูลเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกัน (รูปที่ 8.14ข)	1.5045	0.7891

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5 การทดลองซ้อนทับภาพการและจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติโดยใช้ข้อมูลภาพบริเวณจมูก

การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติระหว่างใบหน้าต้นฉบับกับข้อมูลภาพบริเวณจมูกของใบหน้าเดียวกันที่สแกนต่างเวลากัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่า เส้นโค้งเชิงพาราโบลาเพียงเส้นเดียวสามารถนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพได้หรือไม่ ในการทดลองนี้เป็นการซ้อนทับภาพของใบหน้าหุ่นที่สแกนด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D แบบเต็มหน้ากับใบหน้าหุ่นที่สแกนเฉพาะบริเวณจมูกเท่านั้น มีลำดับการทำงานเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ดังรูปที่ 8.11 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8.15



รูปที่ 8.15 ภาพก่อนและหลังการซ้อนทับภาพพระหว่างใบหน้าทั้งหมดกับเฉพาะบริเวณจมูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเชิงปริมาณของการจัดใบหน้าให้ตรงกันของใบหน้าทั้งใบหน้าที่ข้อมูลภาพเฉพาะบริเวณจมูก ได้ใช้ค่าความผิดพลาดของระยะทางของจุดที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ผลดังตารางที่ 8.5

คำนวณโดย $Distance\ map\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$ เมื่อ $x_{1,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าทั้งใบหน้าที่ และ $x_{2,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าบริเวณจมูก ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

คำนวณได้จาก $STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ เมื่อ x_i คือ ค่าผลต่างระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันของข้อมูลภาพใบหน้าทั้งหมดกับบริเวณจมูกของอีกข้อมูลใบหน้าหนึ่งหลังการซ้อนทับภาพ และ

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

ตารางที่ 8.5 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพระหว่างใบหน้าต้นฉบับทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น

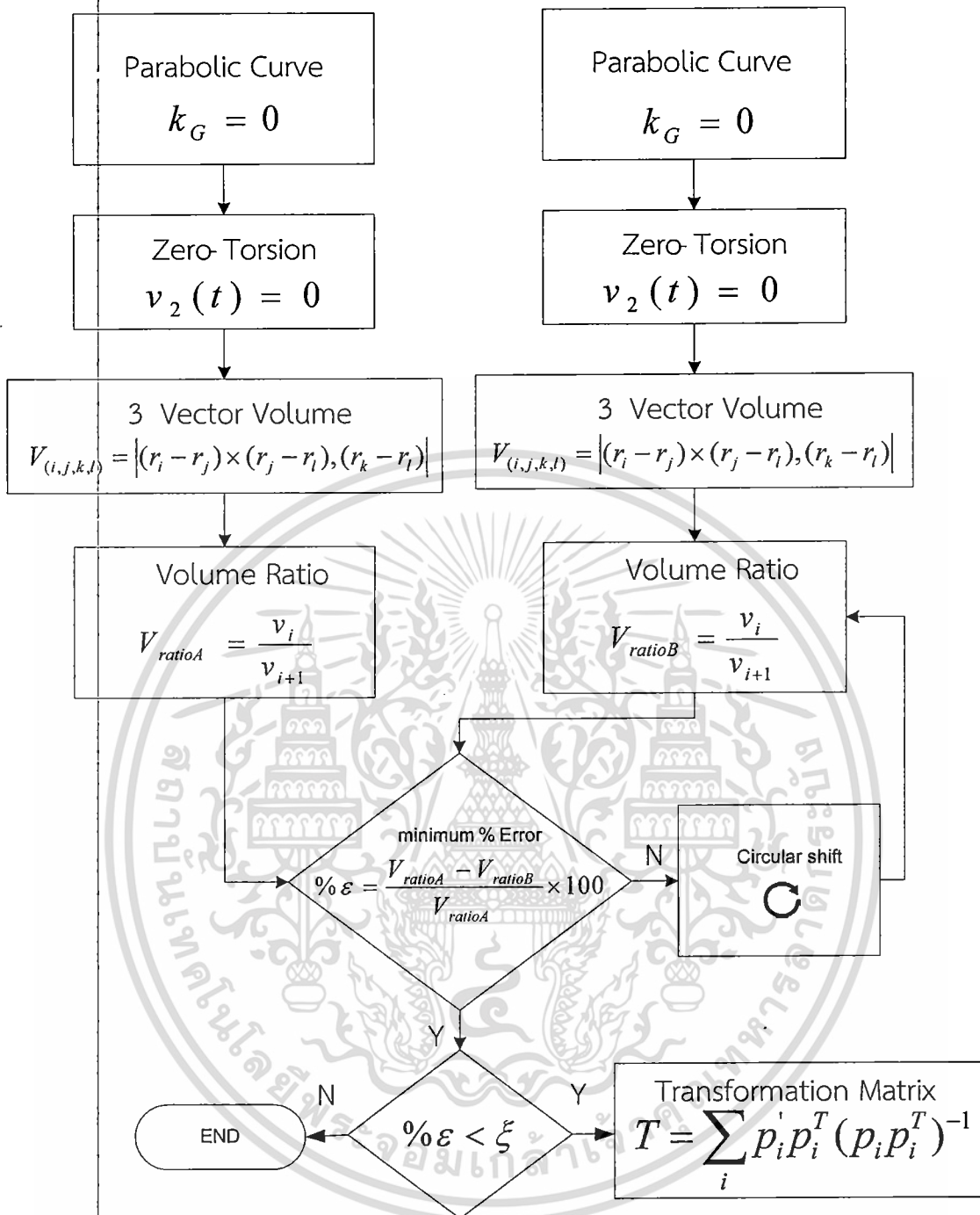
หลังการจัดให้ตรงกัน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ข้อมูลทั้งใบหน้าที่กับจมูก	28.4132	25.3149
ข้อมูลเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกัน	1.3592	0.5784

สรุปผลการทดลอง

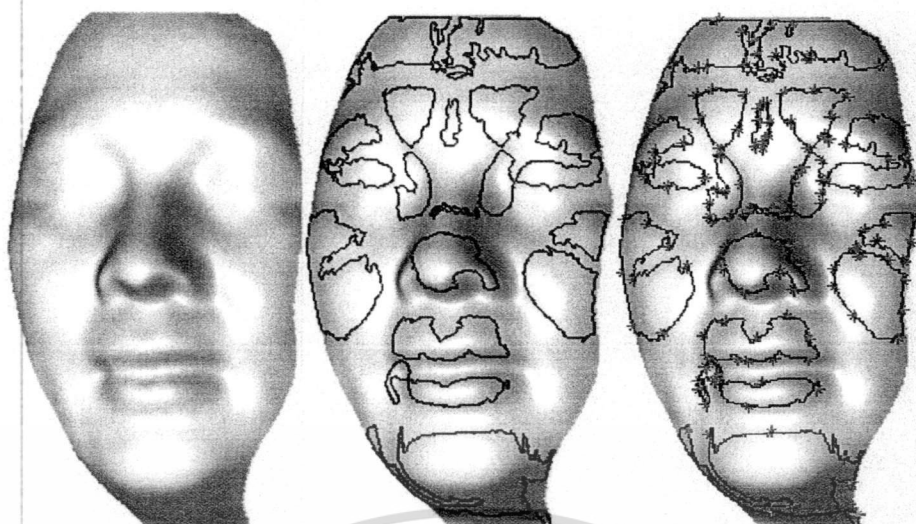
จากผลการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพสามมิติของใบหน้าทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น พบว่าเมื่อนำข้อมูลภาพที่จัดให้ตรงกันแล้วมาคำนวณหาความผิดพลาด พบว่าสูงมากเช่นเดียวกับการทดลองที่ 8.4 และลดลงเมื่อนำข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกันเท่านั้นมาคำนวณค่าความผิดพลาด พบว่าได้ค่าที่ต่ำลงมาก โดยลดลงเหลือเพียง 1.35 มิลลิเมตร และความเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงเหลือ 0.57 มิลลิเมตร

8.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอ้าปากค้าง

การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้ สามารถใช้ลงทะเบียนภาพใบหน้าที่มีอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันได้หรือไม่ ในการทดลองนี้ได้ใช้ เครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D โดยให้ความละเอียดได้ 0.135-0.210 มิลลิเมตร ที่ระยะการทำงาน 300-650 มิลลิเมตร มาสร้างภาพอาสาสมัครขณะแสดงอารมณ์สีหน้าปกติและขณะอ้าปากค้างอยู่ มีลำดับขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 8.16 โดยกำหนดระดับขีดขึ้นไว้ว่าถ้าค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยกว่า 5% จะถือว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาที่จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์รั้งอยู่นั้น สอดคล้องกัน แล้วจึงนำคู่สอดคล้องทั้งหมดของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาไปคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงเพื่อนำไปแปลงภาพเปรียบเทียบกลับมาซ้อนทับกับภาพต้นฉบับ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 8.17 ก.ภาพใบหน้าอาสาสมัครขณะอารมณ์สีหน้าปกติ ข.ภาพใบหน้าอาสาสมัครอารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าปกติซึ่งเป็นจุดที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา รูปที่ 8.18 ภาพใบหน้าอาสาสมัครขณะอ้าปากค้าง ส่วนรูปที่ 8.19 เป็นภาพใบหน้าก่อนและหลังการจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติและขณะอ้าปากค้าง

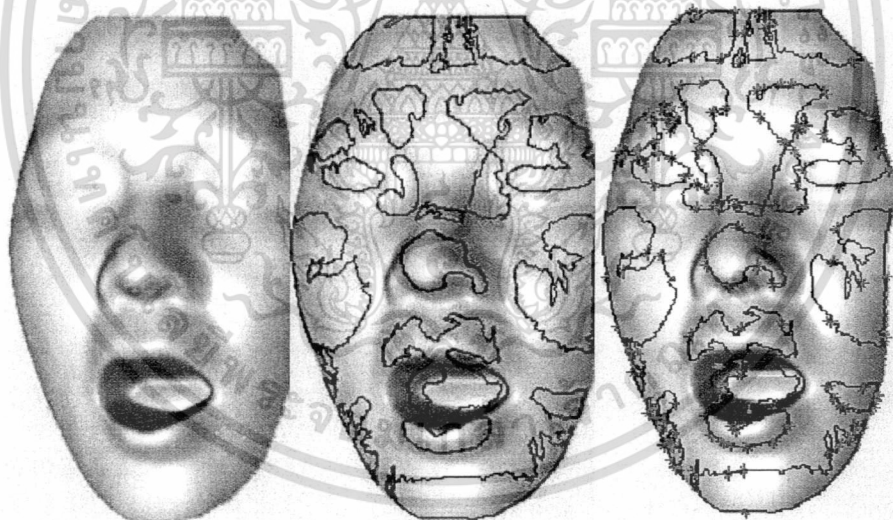


รูปที่ 8.16 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติ
ที่แสดงอาการผิดปกติและอ้าปากค้าง



ก.อารมณ์สีหน้าปกติ ข.อารมณ์สีหน้าปกติและ
เส้นโค้งเชิงพาราโบลา ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บน
ใบหน้าปกติ

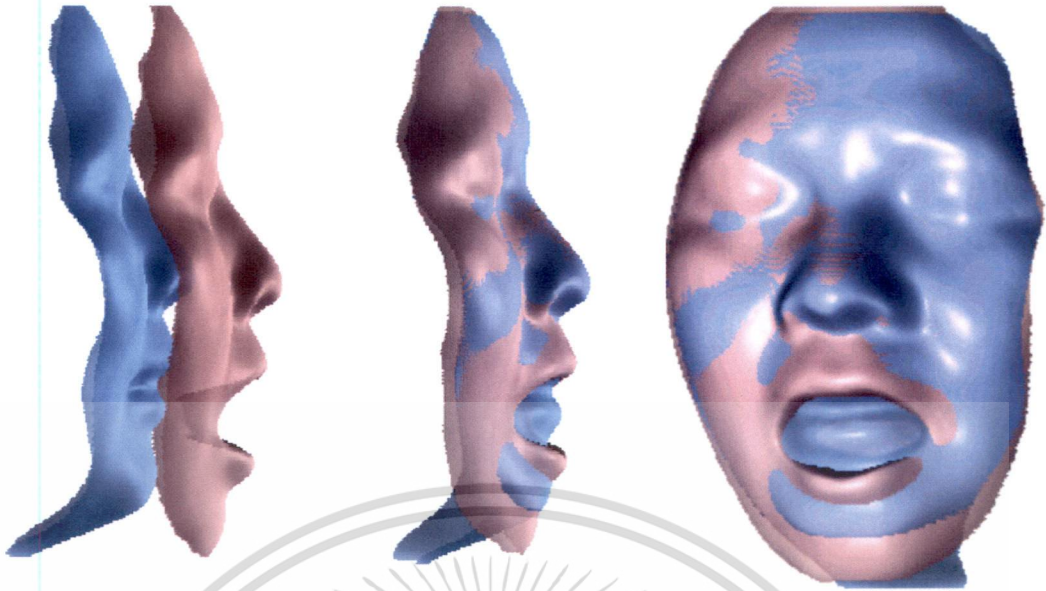
รูปที่ 8.17 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าอารมณ์ปกติ ก.อารมณ์สีหน้าปกติ ข.อารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์ที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนใบหน้าอารมณ์ปกติ [64]



ก.ใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ข.เส้นโค้งเชิงพาราโบลา
ขณะอ้าปากค้าง ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บน
ใบหน้าขณะอ้าปากค้าง

รูปที่ 8.18 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ก.ใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ข.เส้นโค้งเชิงพาราโบลาขณะอ้าปากค้าง และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าขณะอ้าปากค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.มุมมองด้านขวาของใบหน้า ก่อนจัดให้ตรงกัน ข.มุมมองด้านขวาของใบหน้า หลังการจัดให้ตรงกัน ค.มุมมองด้านหน้าของใบหน้า หลังการจัดให้ตรงกัน

รูปที่ 8.19 ภาพใบหน้าก่อนและหลังการซ้อนทับและจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติและขณะอ้าปากค้าง [64]

ผลการทดลองเชิงปริมาณของการจัดใบหน้าให้ตรงกันของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง ได้ใช้ค่าความผิดพลาดของระยะทางของจุดที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ผลดังตารางที่ 8.6 คำนวณโดย

$Distance\ map\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$ เมื่อ $x_{1,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าปกติ และ $x_{2,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้จาก $STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ เมื่อ x_i คือ ค่าผลต่างระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันของข้อมูลภาพใบหน้าอารมณ์ปกติกับใบหน้าอ้าปากค้างหลังการซ้อนทับภาพ และ $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

ตารางที่ 8.6 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพสามมิติของใบหน้าที่แสดงอารมณ์ปกติกับใบหน้าที่อำปากค้าง พบว่าเมื่อนำข้อมูลภาพที่จัดให้ตรงกันแล้วมาคำนวณหาความผิดพลาด พบว่าค่าความผิดพลาดจะสูงเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณความผิดพลาด และลดลงเมื่อนำข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือริมฝีปากบนขึ้นไปมาคำนวณเท่านั้น โดยพบค่าความผิดพลาดเพียง 1.6 มิลลิเมตร และความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.75 มิลลิเมตร

8.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล

ในการทดลองสุดท้ายนี้ได้ทดลองจัดให้ตรงกันและลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันของภาพใบหน้าสามมิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการระบุตัวบุคคล แม้ว่าบุคคลนั้นจะมีสีหน้าไม่เหมือนกับภาพต้นฉบับที่ได้ลงทะเบียนไว้ และได้เปรียบเทียบกับวิธีการที่เป็นที่นิยมอีกสองวิธี คือ ICP และ CPD โดยการนำข้อมูลภาพจากฐานข้อมูลที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมาทดสอบ

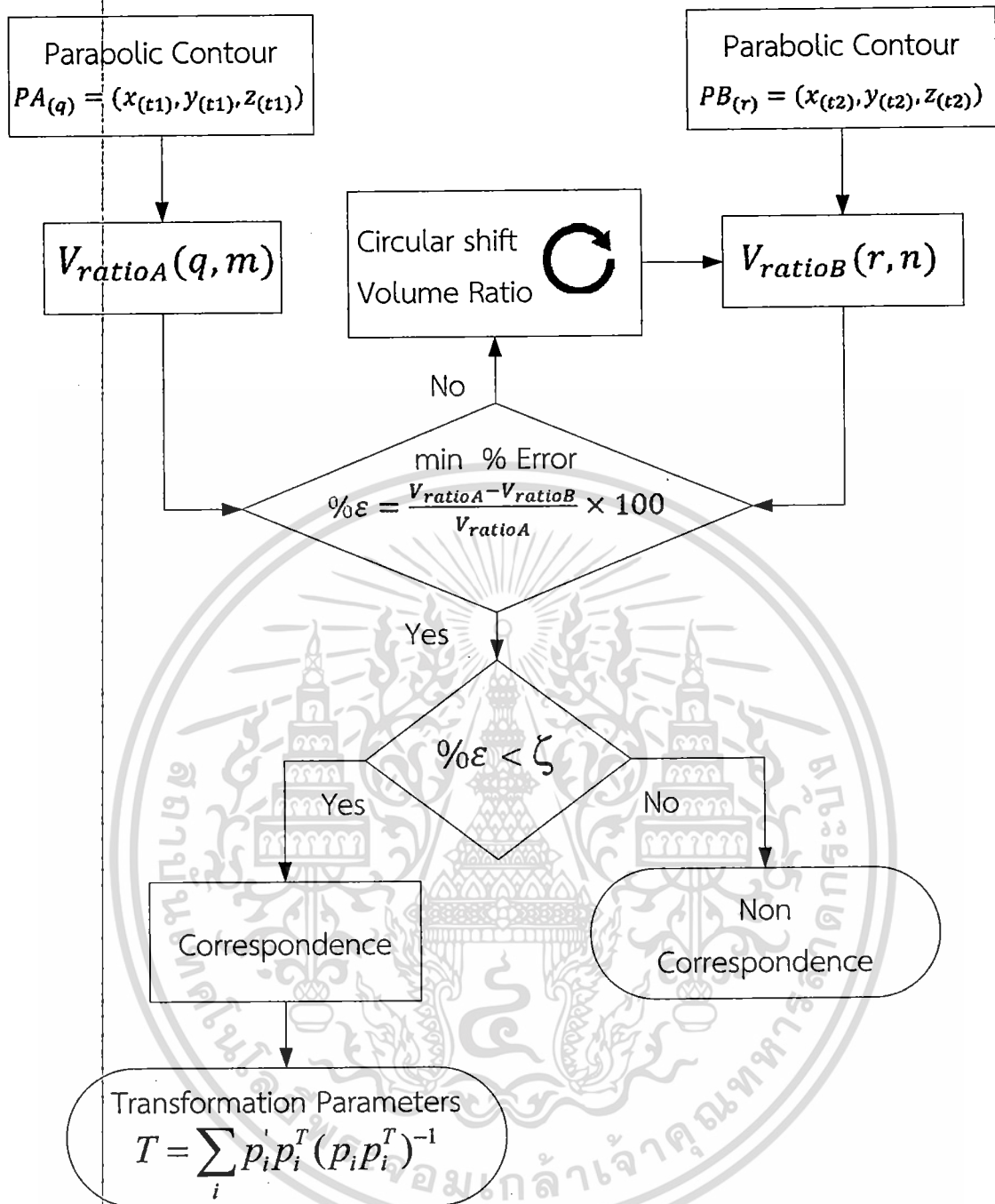
ฐานข้อมูลภาพใบหน้าสามมิติ GavabDB [65] เป็นฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบทฤษฎีที่ใช้ในการซ้อนทับภาพสามมิติและการรู้จำภาพใบหน้าสามมิติ เป็นที่นิยมใช้และรู้จักอย่างกว้างขวางในการนำมาทดสอบทฤษฎีการประมวลผลภาพสามมิติ เพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ฐานข้อมูลนี้ได้จากการสแกนใบหน้าอาสาสมัครจำนวน 61 คน ด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท Minolta รุ่น VI-700 digitizer อาสาสมัครแต่ละคนจะถูกถ่ายภาพคนละ 7 ภาพที่มุมมองต่างๆกัน ประกอบด้วย ภาพถ่ายหน้าตรงสองภาพ ภาพเงาหน้า ภาพก้มลง ภาพยิ้ม ภาพหัวเราะ และภาพสุม (ตามใจอาสาสมัคร)

ขั้นตอนการทดลอง เริ่มจากสุมข้อมูลใบหน้าจากฐานข้อมูลจำนวน 10 ภาพที่มีใช้คนๆเดียวกันขึ้นมา กำหนดให้เป็นภาพต้นฉบับ แล้วสุมข้อมูลภาพของบุคคลเดิมที่มีใช้ข้อมูลต้นฉบับ กำหนดให้เป็นภาพเทียบ คำนวณหาความโค้งเคาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลา จุดแรงบิดเป็นศูนย์เชิงพาราโบลา และอัตราส่วนปริมาตรสามเวกเตอร์ แล้วนำมาลงทะเบียนภาพ ตามลำดับการทำงานในรูปที่ 8.20 โดยจะนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลาทุกเส้นของภาพต้นฉบับมาหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างอัตราส่วนปริมาตร ซึ่งจะพิจารณาที่ค่าต่ำที่สุดแล้วตรวจสอบว่าต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าต่ำกว่าจะถือว่าคู่เส้นโค้งเชิงพาราโบลานี้สอดคล้องกัน ทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดนี้


































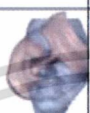












































































เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนครบทุกคู่ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา แล้วนำไปหาพารามิเตอร์การแปลง เพื่อแปลงภาพเทียบไป ซ้อนให้ตรงกับภาพต้นฉบับ แสดงผลในเชิงคุณภาพด้วยภาพผลการจัดภาพให้ตรงกัน แสดงผลเชิง ปริมาณด้วย ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของระยะทาง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ผลการทดลอง ดังรูป ที่ 8.21 ซึ่งเป็นตารางภาพ โดยใบหน้าแถวแรกเป็นภาพต้นฉบับจำนวน 10 ภาพ ภาพในหลักแรกเป็น ภาพที่สุ่มจากภาพบุคคลในแถวแรกแต่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน นำมาจัดให้ตรงกันกับภาพ ต้นฉบับ โดยได้แสดงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจัดให้ตรงกัน(ค่าบน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าล่าง) กำกับไว้ที่ด้านล่างของผลการจัดให้ตรงกันของภาพแต่ละคู่ด้วย

การทดลองนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการจัดให้ตรงกันของภาพและการซ้อนทับภาพสามมิติ กับ วิธีการ ICP (Iterative Closed Points)[44] และวิธี CPD (Coherent Points Drift) [17] ได้ผล แสดงดังรูปที่ 8.22 และรูปที่ 8.23 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ผลค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการ จับถูกคู่ (ผลค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตามแนวทแยงมุมซ้ายบนซ้ายไปล่างขวา) และผลค่าเฉลี่ยของความ ผิดพลาดของการจับผิดคู่ (ผลค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอื่นๆ ยกเว้นตามแนวทแยงมุมซ้ายบนซ้ายไปล่าง ขวา) นำไปแสดงในตารางที่ 8.7 ซึ่งได้แสดงเวลาที่ใช้ในการทำงานของแต่ละวิธี นอกจากนั้นยังแสดง ให้เห็นว่าวิธีการ ICP จำเป็นต้องมีการจัดให้ตรงกันแบบหยาบก่อนด้วย























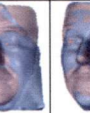

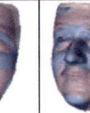



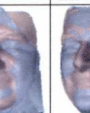






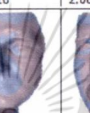

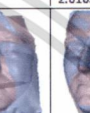





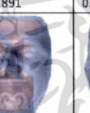
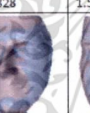
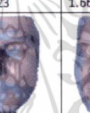


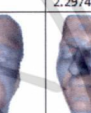

















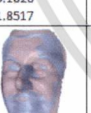







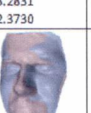

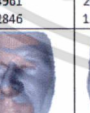





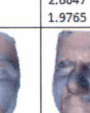

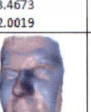
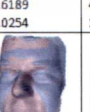

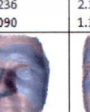





รูปที่ 8.20 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกัน ของใบหน้าสามมิติ ที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันเพื่อการระบุตัวบุคคล

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	9.8850 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	19.1664 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	1.5062 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	14.3984 11.0952	26.7102 18.4743
											
		9.1019 7.4067	14.0174 10.1811	11.1050 8.3224	13.8818 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	13.0436 8.8677	6.8454 5.1201	28.7809 20.4989	3.6981 3.0411	17.8562 11.1877
											
		14.1803 11.0160	30.5296 21.3472	13.1324 8.9796	16.7648 10.2082	16.3452 11.2697	15.1857 11.9198	5.3057 3.6319	24.5680 15.5037	20.2437 12.4688	3.0597 2.3923

รูปที่ 8.21 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูล GavabDB โดยแสดงผลค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ที่ด้านล่างของคู่ภาพด้วย [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ 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	3.6601 2.6734	3.6062 2.0600	3.5505 2.4871	3.0388 2.4336	2.9906 2.1549
										
	2.9482 2.7986	2.3347 1.5080	4.0164 2.7191	2.3525 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	2.4804 1.6285	3.9207 2.5143	4.7326 3.7440	3.9234 2.7457
										
	3.2831 2.3730	3.0096 1.6928	2.4961 1.2846	2.8947 1.5322	4.3681 2.6928	3.5327 1.9792	3.0669 1.6614	2.0388 1.3265	2.9977 1.6595	2.6047 1.9765
										
	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

รูปที่ 8.22 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ ICP แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reference										
Query										
	1.3833 0.5695	1.6566 0.7284	2.0682 1.1092	1.6369 0.7742	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	1.5863 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 0.9073	1.8150 1.0188	1.8036 0.9572	1.8117 1.7162	1.8404 1.6781
										
	1.5020 0.7371	1.5579 0.7791	1.7768 1.0510	1.0930 0.4389	1.2730 0.6047	1.6697 0.8954	1.7676 0.9213	1.8528 1.0726	1.7571 1.4765	1.7991 1.6356
										
	1.5480 0.6781	1.5772 0.6663	1.9890 1.0599	1.4886 0.6340	1.2844 0.5896	1.7848 0.9599	1.8597 0.9442	2.1746 1.1622	2.0263 1.7911	1.9698 1.5909
										
	1.6210 0.7970	1.5635 0.7815	1.5342 0.7393	1.4218 0.6257	1.7281 0.8949	1.4259 0.7042	1.6305 0.8813	1.5100 0.8603	1.6009 1.1859	1.5733 1.4104
										
	1.8415 0.8984	2.0672 1.0922	2.2729 1.3994	2.1007 1.0836	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 0.8813	1.9066 0.8683	1.6979 0.6934	1.8787 0.9358	1.7745 0.8408	1.8193 0.9159	1.4844 0.6819	1.8949 0.9596	1.9403 1.6872
										
	1.5727 0.7769	1.7938 0.8604	2.2202 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 0.8929	2.2595 1.3574	1.5082 0.6646	1.7573 0.9123	1.7789 0.9255	1.8283 0.9868	1.8901 1.1183	2.1590 1.9687	1.9324 1.6395

รูปที่ 8.23 ผลการจัดให้ตรงกันของใบหน้าบุคคล 10 คนจากฐานข้อมูลภาพ GavabDB ด้วยวิธีการ CPD และแสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (บน) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ล่าง) ไว้ด้วย [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลสุดท้ายของการทดลอง เป็นการนำค่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR (Signal to noise ratio) มาเพื่อใช้ในการประเมิน ความสามารถในการจับคู่ได้ถูกต้อง โดยถ้ามีค่ามาก หมายถึง มีความสามารถในการจับคู่ได้ถูกต้องที่สูงกว่า โดยคำนวณจาก

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

เมื่อ μ_M คือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจับคู่ถูกต้อง (ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยตามแนวทแยงมุม ในรูปที่ 8.21 รูปที่ 8.22 หรือรูปที่ 8.23)

σ_M คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการจับคู่ถูกต้อง (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยตามแนวทแยงมุมในรูปที่ 8.21 รูปที่ 8.22 หรือรูปที่ 8.23)

μ_{NM} คือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจับคู่ไม่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยนอกแนวทแยงมุม ในรูปที่ 8.21 รูปที่ 8.22 หรือรูปที่ 8.23)

σ_{NM} คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการจับคู่ไม่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยนอกแนวทแยงมุมในรูปที่ 8.21 รูปที่ 8.22 หรือรูปที่ 8.23)

ตารางที่ 8.7 ความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการจับคู่ภาพลูกคู่และผิดคู่

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

การใช้จุดแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเป็นจุดเด่นเอกลักษณ์เพื่อการจัดภาพไบหน้าสามมิติให้ตรงกันนั้น เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันนั้น สามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับวิธี ICP แต่ด้อยกว่าวิธี CPD ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณนานมาก นานกว่าวิธี ICP 52 เท่า และนานกว่าวิธีที่นำเสนอ (Zero-Torsion) ถึง 94 เท่า เมื่อเปรียบเทียบในด้านประสิทธิภาพการจับคู่หรือรู้จำภาพนั้น วิธีการที่นำเสนอให้ผลดีที่สุดเนื่องจาก ให้ผลความแตกต่างระหว่างการจับคู่ถูกต้องและการจับคู่ผิดพลาดที่สูง ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างการจับคู่ถูกต้องและการจับคู่ผิดพลาดสูงถึง 1.19 ในขณะที่วิธี ICP และ CPD ให้ผลที่ 0.37 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงวิธีการทั้งสองนั้นสามารถใช้ในการจัดให้ตรงกันและลงทะเบียนภาพได้ดี แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในการรู้จำไบหน้าบุคคลได้เนื่องจากผลการทดลองพบว่า แม้ว่าจะมีใช้ไบหน้าของบุคคลคนเดียวกัน ก็ยังสามารถจัดให้ตรงกันได้ โดยผลความผิดพลาดเฉลี่ยของการจับคู่ถูกต้องและจับคู่ผิดนั้นใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่วิธีการที่เสนอสามารถแยกแยะระหว่างจับคู่ได้ถูกต้องและจับคู่ผิดพลาดได้ดีกว่า

บทที่ 9

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ เริ่มศึกษาจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิคการถ่ายภาพแบบสเตริโอ โดยการใช้กล้องสองตัว ถ่ายภาพใบหน้าบุคคล ด้วยกล้องวิดีโอที่ติดตั้งขนานกัน ขณะที่ฉายภาพจุดแสงที่เข้ารหัสไว้ด้วยเครื่องแอลซีดีโปรเจคเตอร์ แล้วนำภาพที่ได้มาถอดรหัสจนได้ภาพใบหน้าสามมิติ ใช้เวลาในการถ่ายภาพประมาณ 20 วินาที และใช้เวลาในการคำนวณเพื่อสร้างภาพสามมิติน้อยกว่า 3 วินาที เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องฉายภาพแอลซีดีที่ใช้มีรายละเอียดในการแสดงภาพเพียง 800x600 พิกเซล ทำให้เมื่อฉายจุดแสงออกไปที่วัตถุที่ระยะทาง 50 เซนติเมตร ขนาดของจุดแสงหนึ่งจุดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น ประมาณ 6x6 พิกเซล (รูปที่ 7.6) ของกล้องวิดีโอและการรับภาพ ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ที่ 768x576 พิกเซล ทำให้ได้รายละเอียดของภาพในระนาบ x, y อยู่ที่ 7x5 มิลลิเมตร แนวทางในการพัฒนาการถ่ายภาพ ควรเพิ่มรายละเอียดของแอลซีดีโปรเจคเตอร์ให้มากขึ้น

การศึกษาความคงสภาพของความโค้งเคาส์เซียนเมื่อนำใบหน้าสามมิติที่ได้จากเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์มาแปลงแบบระดับแอฟไฟน์นั้น พบว่าความโค้งเคาส์เซียนมีความคงสภาพต่อการแปลงมาก โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์กับภาพต้นฉบับมากกว่า 0.9 จึงเป็นเหตุผลให้เกิดการทดลองต่อมาคือ การศึกษาเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ เพื่อการทดสอบความคงสภาพ ของจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์เช่นเดียวกัน พบว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ ก็มีความคงทนต่อการแปลงเรขาคณิตระดับแอฟไฟน์เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเส้นโค้งเชิงพาราโบลานั้นคำนวณมาจากความโค้งเคาส์เซียนที่คงสภาพอยู่แล้ว จากการทดลองเชิงปริมาณพบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ผ่านการแปลงแบบคงที่ (rigid transformation) ขยายขนาดตามแกน X และ Y (Scale X, Scale Y) และ เือนตามแกน X และ Y (Shear X, Shear Y) ไม่เกิน 1.75 มิลลิเมตร และสูงชันขึ้นไม่เกิน 2.75 มิลลิเมตร เมื่อขยายขนาดตามแกน Z (Scale Z) และเือนตามแกน Z (Shear Z) ที่ระดับการแปลงถึง 10% ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมากในชีวิตจริง เพราะการเปลี่ยนอารมณ์สีหน้าของบุคคลมักเป็นการแปลงในระนาบ X, Y เช่นการยิ้ม อ้าปาก หรือหัวเราะ เป็นต้น ส่วนการแปลงขยายขนาดหรือเือนจะเกิดขึ้นเมื่อบุคคลนั้นทำปากยื่นออกมาเป็นต้น ดังนั้นจึงมี

ความเป็นไปได้สูงที่เราสามารถนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดบนเส้นโค้งพาราโบลาเป็นศูนย์กลางมาใช้ในการซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกัน หรืออาจนำไปสู่การรู้จำบุคคลได้

เพื่อเป็นการทดสอบว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดบนเส้นโค้งพาราโบล่าจะสามารถนำมาใช้ในการลงทะเบียนภาพสามมิติของใบหน้าได้ จึงได้ทำการทดลองเพื่อดูว่าในกรณีที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วนแล้ว เรายังสามารถลงทะเบียนภาพได้หรือไม่ และอาจจะทำให้เราตัดพื้นที่ที่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงออกไปจากพื้นที่ที่สนใจได้ จากการทดลองสแกนใบหน้าหุ่นจำลองสองครั้งที่มีมุมมองแตกต่างกัน แล้วนำมาลงทะเบียนภาพสามมิติและจัดให้ภาพทั้งสองตรงกัน พบว่าสามารถทำได้ถ้าใบหน้าทั้งสองนั้นยังคงมีพื้นที่ร่วมกันที่สามารถคำนวณความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์กลางได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้พิสูจน์อีกว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาเพียงเส้นเดียวนั้น สามารถนำมาใช้ในการลงทะเบียนภาพได้หรือไม่ ในการทดลองต่อมา จากผลการทดลองก็พบว่าสามารถทำได้ อย่างไรก็ตาม การนำเส้นโค้งเชิงพาราโบล่าหลายเส้นและหลากหลายบริเวณให้ผลการจัดภาพให้ตรงกันที่ดีกว่า

ต่อมาผู้วิจัยได้ทดลองลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติที่มีอารมณ์สีหน้าแตกต่างกัน ระหว่างใบหน้าปกติกับใบหน้าที่อ้าปากค้าง เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าวิธีการที่นำเสนอขึ้นสามารถนำมาใช้กับใบหน้าบุคคลได้จริง เนื่องจากใบหน้าของเราเมื่อแสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการแปลงระดับแอมพลิจูดขึ้น ในกรณีที่อ้าปากนี้ จะเกิดแรงเฉือนตามแนวแกน Y ถ้าทำปากเบี้ยวด้วยก็จะเกิดแรงเฉือนตามแกน X ส่วนการทำปากยื่นออกมานั้นจะเป็นการเฉือนตามแนวแกน Z ดังนั้นในการทดลองนี้เป็นการทดสอบการแปลงแบบแอมพลิจูดที่เกิดการเฉือนตามแกน Y จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สามารถทำได้ โอกาสต่อไปน่าจะได้มีการทดสอบ การลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติสำหรับอารมณ์สีหน้าอื่นๆต่อไป

เพื่อเป็นการทดสอบว่าเราสามารถนำวิธีการของการหาจุดที่แรงบิดบนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาสามารถนำมาใช้กับใบหน้ามนุษย์ที่หลากหลายอารมณ์ได้นั้น ผู้วิจัยได้นำฐานข้อมูลภาพใบหน้าสามมิติขนาดใหญ่ที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมาทดสอบ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำวิธีการที่เสนอนี้ไปใช้ในการรู้จำบุคคล พบว่า วิธีการ ICP และ CPD นั้น น่าจะเหมาะกับการซ้อนทับภาพและจัดภาพให้ตรงกันมากกว่า ในขณะที่วิธีการ Zero-torsion ที่นำเสนอขึ้นสมควรนำไปใช้ในงานการรู้จำบุคคลได้ เนื่องจาก ICP และ CPD ให้ผลการจัดภาพให้ตรงที่ดี แม้ว่าใบหน้านั้นจะเป็นของต่างบุคคลก็ตาม จึงเหมาะกับการจัดภาพให้ตรงกันในกรณีที่รู้ว่าเป็นภาพของบุคคลคนเดียวกันอยู่แล้ว หรือใช้ในกรณีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการรวมข้อมูลภาพจากการสแกนบุคคลหรือวัตถุเดิมจากหลากหลายมุมมองเพื่อการรวบรวมภาพข้อมูลสามมิติที่สมบูรณ์ ในขณะที่วิธีการที่เสนอนั้นให้ผลดีพอสมควรสำหรับใบหน้าของบุคคลคนเดียวกันแต่ให้ผลที่แย่มากในกรณีที่ใบหน้านั้นเป็นของคนละคนกัน ทำให้โอกาสที่จะตัดสินว่าสองใบหน้าที่เข้าสู่การทดสอบนั้นเป็นคนเดียวกันได้ถูกต้องมากกว่า

นอกจากนี้วิธีการ Zero-torsion ที่นำเสนอแล้วยังเหมาะกับการนำไปเก็บเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ระบุตัวบุคคลได้ดี เนื่องจากเราสามารถเก็บข้อมูลเฉพาะ อัตราส่วนปริมาตรที่ประจำอยู่บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาก็เพียงพอต่อการยืนยันตัวบุคคลได้ ทำให้ฐานข้อมูลมีขนาดเล็กมากเนื่องจากไม่ต้องเก็บข้อมูลภาพทั้งใบหน้า ซึ่งจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำงานอีกด้วย

กระบวนการทำงานที่เด่นประการหนึ่งของ วิธีที่เสนอนี้คือ การที่สามารถคำนวณหาเมตริกซ์การแปลงได้ภายในรอบเดียวของการทำงานเพื่อหาเมตริกซ์การแปลง ในขณะที่ ICP และ CPD จำเป็นต้องทำงานซ้ำกับข้อมูลภาพขนาดใหญ่ทั้งหมด ในขณะที่การคำนวณซ้ำของวิธีการที่เสนอนั้นเกิดขึ้นในช่วงของการค้นหาคู่สอดคล้องของเส้นโค้งเชิงพาราโบล่า ซึ่งเป็นข้อมูลขนาดเล็กมากและมีจำนวนครั้งที่จำกัด เพียงหมดจำนวนเส้นของเส้นโค้งพาราโบล่าเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาทั้งใบหน้านั้นมีเส้นโค้งพาราโบล่าไม่เกิน 20 เส้น

สำหรับคำแนะนำ มีความเป็นไปได้ที่เราสามารถนำวิธีการนี้ไปใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เพื่อการรู้จำบุคคลก็ได้ อาจเป็น ICP เนื่องจาก ICP นั้นจำเป็นต้องมีการจัดให้ตรงกันแบบหยาบเป็นการเริ่มต้นก่อน ส่วน CPD นั้นเหมาะกับการทำงานที่ไม่สนใจเวลาว่าจะมากน้อยก็ตาม

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): pp. 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): pp. 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. pp. 16-23.
- [4] Maes, F., et al. "Multimodality Image Registration by Maximization of Mutual Information." *Medical Imaging, IEEE Transactions on.* 1997. 16(2): pp. 187 -198.
- [5] Studholme, C., D.L. Hill, and D.J. Hawkes. "Automated 3-D Registration of MRI and CT Images of the Head." *Medical Image Analysis.* 1996. 1(2): pp. 163-175.
- [6] Studholme, C., D.L.G. Hill, and D.J. Hawkes. "Automated 3d Registration of MRI and PET Brain Images by Multi-Resolution Optimisation of Voxel Similarity Measures." *MedPhys.* 1997. 24(1): pp. 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): pp. 1749-1760.
- [8] Buzug, T., et al., *Image Registration: Convex Weighting Functions for Histogram-Based Similarity Measures*, in *Cvrmcd-Mrcas'97*, J. Troccaz, E. Grimson, and R. Mages, Editors. 1205. Springer Berlin / Heidelberg, 1997
- [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. pp. 42 -51.
- [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 Medial Robotics and Computer-Assisted Surgery.* 1997. pp. 119-128 %&.
- [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): pp. 164 -168.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Joseph, L.M. and Z. Andrew, eds. **Geometric Invariance in Computer Vision**. MIT Press, 1992
- [13] Andrew, Z., et al., **Recognizing General Curved Objects Efficiently**, in **Geometric Invariance in Computer Vision**, L.M. Joseph and Z. Andrew, Editors.: MIT Press, 1992
- [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): pp. 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): pp. 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. pp. 1246 - 1251.
- [17] Myronenko, A. and X. Song. "Point Set Registration: Coherent Point Drift." **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on**. 32(12): pp. 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): pp. 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. pp. 640 -643.
- [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): pp. 1034 -1044.
- [21] Bookstein, F.L., **Morphometric Tools for Landmark Data Geometry and Biology**: Cambridge University Press, 1991
- [22] Miller, M.I., et al. "A Mathematical Textbook of Deformable Neuroanatomies." **Proc Natl Acad Sci USA**. 1993. 90: pp. 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): pp. 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. pp. 1 -6.
- [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): pp. 788-795.
- [26] Kanal 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. pp. 347-351.
- [27] Goshtasby, A. "Piecewise Linear Mapping Functions for Image Registration." **Pattern Recognition.** 1986. 19: pp. 459 -466.
- [28] Cohen, F.S., et al. "Automatic Matching of Homologous Histological Sections." **Biomedical Engineering, IEEE Transactions on.** 1998. 45(5): pp. 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): pp. 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): pp. 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): pp. 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. pp. 576 -578.
- [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): pp. 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): pp. 1031 -1043.
- [35] Joaquim, S., et al. "A Review of Recent Range Image Registration Methods with Accuracy Evaluation." *Image Vision Comput.* 2007. 25(5): pp. 578-596.
- [36] Chin Seng, C. and J. Ray. "Point Signatures: A New Representation for 3D Object Recognition." *Int. J. Comput. Vision.* 1997. 25(1): pp. 63-85.
- [37] Johnson, A. "Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching" Ph.D. Thesis of Robotics Institute, Carnegie Mellon University. 1997
- [38] Chung, D.H., I.D. Yun, and S.U. Lee. "Registration of Multiple-Range Views Using the Reverse-Calibration Technique." *Pattern Recognition.* 1998. 31(4): pp. 457 - 464.
- [39] song Chen, C., Y. ping Hung, and J. bo Cheng. "Ransac-Based Darces: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1999. 21: pp. 1229-1234.
- [40] Tarel, J.P., H. Civi, and D.B. Cooper. "Pose Estimation of Free-Form 3D Objects without Point Matching Using Algebraic Surface Models." *Conference.* 1998: pp. 13-21.
- [41] Ioannis, S., et al. "Integrating Automated Range Registration with Multiview Geometry for the Photorealistic Modeling of Large-Scale Scenes." *Int. J. Comput. Vision.* 2008. 78(2-3): pp. 237-260.
- [42] Joris Vanden, W. and G. Luc Van. "Automatic Crude Patch Registration: Toward Automatic 3d Model Building." *Comput. Vis. Image Underst.* 2002. 87(1-3): pp. 8-26.
- [43] Jacques, F. and A. Nicholas. "Rigid, Affine and Locally Affine Registration of Free-Form Surfaces." *Int. J. Comput. Vision.* 1996. 18(2): pp. 99-119.
- [44] Besl, P.J. and N.D. McKay. "A Method for Registration of 3-D Shapes." *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 1992. 14(2): pp. 239-256.
- [45] Yang, C., G, and M. rard. "Object Modelling by Registration of Multiple Range Images." *Image Vision Comput.* 1992. 10(3): pp. 145-155.

- [46] Greg, T. and L. Marc. "Zippered Polygon Meshes from Range Images". in *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. 1994.
- [47] Takeshi, M. "Registration and Integration of Multiple Range Images by Matching Signed Distance Fields for Object Shape Modeling." *Comput. Vis. Image Underst.* 2002. 87(1-3): pp. 51-65.
- [48] Rusinkiewicz, S. and M. Levoy. "Efficient Variants of the Icp Algorithm". in *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on. 2001.* pp. 145 -152.
- [49] Godin, G., M. Rioux, and R.e.j. Baribeau. "Three-Dimensional Registration Using Range and Intensity Information". in *Proceedings of the SPIE: Videometrics III*. 1994 November. pp. 279-290.
- [50] Zhengyou, Z. "Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces." *Int. J. Comput. Vision*. 1994. 13(2): pp. 119-152.
- [51] Masuda, T. "Generation of Geometric Model by Registration and Integration of Multiple Range Images". in *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on. 2001.* pp. 254 -261.
- [52] Masuda, T. "Object Shape Modelling from Multiple Range Images by Matching Signed Distance Fields". in *3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. First International Symposium on. 2002.* pp. 439 - 448.
- [53] Chow, C.K., H.-T. Tsui, and T. Lee. "Surface Registration Using a Dynamic Genetic Algorithm." *Pattern Recognition*. 2004. 37(1): pp. 105-117.
- [54] Silva, L., O.R.P. Bellon, and K.L. Boyer. "Enhanced, Robust Genetic Algorithms for Multiview Range Image Registration". in *3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Fourth International Conference on. 2003 oct.* pp. 268 - 275.
- [55] Carmo, M.P.D., *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. 1 ed: Prentice Hall, 1976
- [56] Mynatt, I., S. Bergbauer, and D.D. Pollard. "Using Differential Geometry to Describe 3-D Folds." *Journal of Structural Geology*. 2007. 29: pp. 1256-1266.
- [57] ปิณฑวิรุจน์, ช., *การประมวลผลภาพดิจิทัลด้วย Matlab*. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551

- [58] Dhond, U.R. and J.K. Aggarwal. "Structure from Stereo-a Review." **Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on**. 1989. 19(6): pp. 1489 -1510.
- [59] 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): pp. 1326 -1329.
- [60] Pajdla, T., Laser Plane Range Finder, in **The Implementation at the CVL**. 1995.
- [61] Tosranon, P., et al. "Multiple Correspondences in Stereoscopy Using Frequency-Encoding Light Point". in **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2007. ECTI-CON 2007. 4th International Conference on**. 2007. pp.
- [62] 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 may. pp. 533 -536.
- [63] 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 may. pp. 1124 -1127.
- [64] 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.
- [65] Moreno, A.B. and S. A. "Gavabdb: A 3d Face Database". 2004. pp. 77-85.
- [66] 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. 8.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายประสงค์ ชูสรานนท์

วัน เดือน ปีเกิด 25 มกราคม 2509 จ.สุพรรณบุรี

ที่อยู่ ต.บางรักใหญ่ อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110

ประวัติการศึกษา 2540 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์รังสี

มหาวิทยาลัยมหิดล

2532 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขารังสีเทคนิค

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์

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. 8.

