

การจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติผ่านกล้องเดี่ยวที่อยู่นิ่ง



นาย ปฐมพงษ์ เรืองแยม

ศูนย์วิทยพัทยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

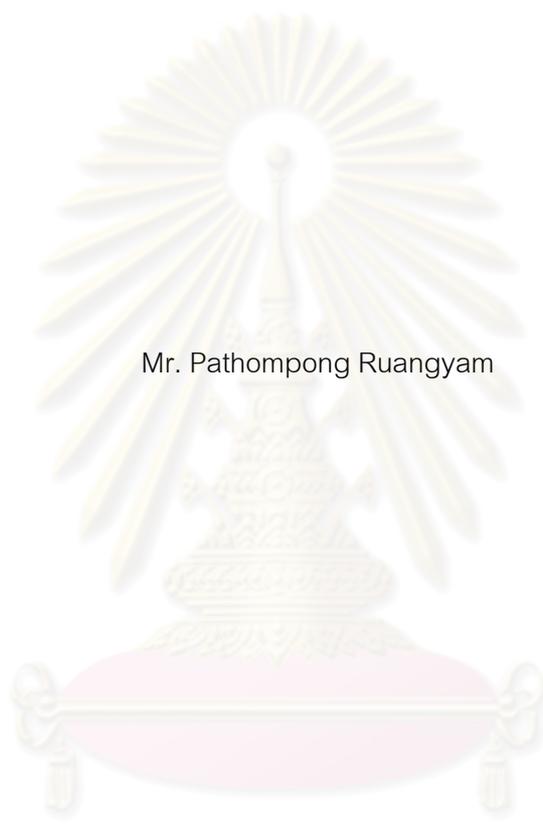
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THREE-DIMENSIONAL HUMAN FACE MODELING VIA A FIXED-POSITION CAMERA



Mr. Pathompong Ruangyam

ศูนย์วิทยทรัพยากร
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติผ่านกล้องเดี่ยวที่อยู่นิ่ง

โดย

นาย ปฐมพงษ์ เรืองแย้ม

สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

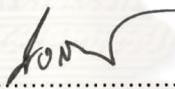
รองศาสตราจารย์ นางลักษณ โควาวิสารัช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิตศึกษา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศhiratวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ วิฒนาวุฒิ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ นางลักษณ โควาวิสารัช)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สืบสกุล พิภพมงคล)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ มาดาร์คี)

ประชุมพงษ์ เรืองแย้ม : การจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติผ่านกล้องเดี่ยวที่อยู่นิ่ง. (THREE-DIMENSIONAL HUMAN FACE MODELING VIA A FIXED-POSITION CAMERA)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ นางลักษณ โควาวิสารัช , 93 หน้า.

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติโดยใช้กล้องเดี่ยวที่อยู่นิ่งโดยเก็บภาพนิ่งใบหน้าบุคคลที่หันหน้ารอบแกนตั้ง (ลำคอ) จำนวนประมาณ 150 ภาพ โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม ภาพใบหน้าทีบันทึกครอบคลุมมุมหันระหว่าง ± 45 องศาสำหรับนำมาจำลองใบหน้าบุคคลโดยผ่านกระบวนการสกัดข้อมูลรูปร่างสองมิติ การปรับเหมาะด้วยแบบจำลองใบหน้าสามมิติ และการรวมข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งกระบวนการทั้งหมดเป็นแบบอัตโนมัติโดยตลอดทำให้สามารถนำไปใช้งานได้โดยสะดวก

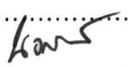
ขั้นตอนการสกัดข้อมูลรูปร่างดำเนินการโดยคัดเลือกบริเวณใบหน้าจากภาพด้วยแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ซึ่งมีอัตราการตรวจหาบริเวณใบหน้าจากภาพสูงและประมวลผลได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีแบบดั้งเดิมด้วยการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน จากนั้นใช้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์เพื่อสกัดตำแหน่งจุดพีเจอร์สองมิติจากบริเวณใบหน้าเพื่อนำไปปรับเหมาะเข้ากับแบบจำลองสามมิติโดยใช้ขั้นตอนวิธีค้นหาแบบผ่อนปรนและปรับปรุงรูปร่างแบบเฉพาะบริเวณที่เสนอในงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ท่าทางและรูปร่างของใบหน้าสามมิติจากภาพที่มีความแม่นยำสูงโดยใช้ระยะเวลาการประมวลผลไม่มาก เมื่อได้ข้อมูลรูปร่างและท่าทางของใบหน้าในแต่ละภาพแล้วจะรวมข้อมูลดังกล่าวเข้าด้วยกันแบบถ่วงน้ำหนักขึ้นกับข้อมูลความลึกและด้านกว้างที่ปรากฏในแต่ละภาพทั้งในส่วนรูปร่างและพื้นผิวซึ่งสอดคล้องกัน เพื่อให้แบบจำลองใบหน้าสามมิติผลลัพธ์มีความถูกต้องทั้งด้านรูปร่างด้านกว้าง ด้านลึกและพื้นผิว โดยทดลองบนฐานข้อมูลใบหน้าทีเก็บบันทึกด้วยกล้องเว็บแคมร่วมกับฐานข้อมูล MIT-CBCL ได้ค่าความผิดพลาดของพื้นผิวแบบจำลองเทียบกับชุดภาพทดสอบเป็น 8.36% และค่าความผิดพลาดของรูปร่างแบบจำลองเทียบกับชุดภาพทดสอบเป็น 7.44 จุดภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... 

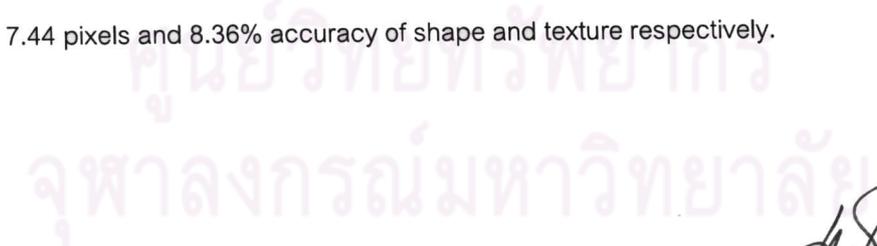
5170369621 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : 3D FACE / RECONSTRUCTION / MODELING

PATHOMPONG RUANGYAM : THREE-DIMENSIONAL HUMAN FACE MODELING VIA A FIXED-POSITION CAMERA. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NONGLUK COVAVISARUCH, 93 pp.

This thesis proposes a 3D human face modeling technique using a single fixed-position camera by acquiring a face set containing face images with rotating angle varying between ±45 degrees, of approximately 150 frames per subject. The entire process is automated and consists of three main tasks: 2D shape information acquisition, 3D face model fitting, and weighted shape and texture incorporation.

The proposed process starts with 2D shape information acquisition using active shape model on the region localized by region-based skin color model which is empirically fast and reliable. The 3D face shape and pose is then obtained by fitting a parameterized 3D face model onto the extracted 2D feature points using the proposed relaxed-search and local refinement. Finally, a 3D specific-person face is accomplished by incorporating a set of shape and corresponding textures in a weighting method based on poses and accuracy of fitting. The test database is a combination of a set of face images acquired using a web camera and MIT-CBCL face database. The experimental results are displayed in shape and texture errors between the face model and a set of test images as the ground truth which yields 7.44 pixels and 8.36% accuracy of shape and texture respectively.



Department : Computer Engineering.....
Field of Study : Computer Engineering.....
Academic Year : 2010.....

Student's Signature
Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ณรงค์ลักษณ์ โค้วาวิสารัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งงานวิจัยนี้คงไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้โดยราบรื่นหากขาดคำแนะนำและการสนับสนุนของอาจารย์มาโดยตลอดตั้งแต่ต้น ซึ่งท่านได้สละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำวิธีการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้โดยสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สืบสกุล พิภพมงคล รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ และ รองศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ มาตารัศมี ซึ่งแต่ละท่านได้สละเวลาให้คำแนะนำเป็นเพื่อขัดเกลากะบวนการและแนวทางดำเนินงานทั้งในภาพรวมและรายละเอียดปลีกย่อยของงานวิจัยนี้ด้วยดี

ขอบพระคุณคุณวาริน นักศึกษาปริญญาเอกวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรีภายใต้การดูแลของรองศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ มาตารัศมี ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการเฉพาะรวมถึงแนวทางการแก้ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ขอบพระคุณคุณสรพฤทธิ์ มฤคทัต จากหน่วยปฏิบัติการวิจัย IMG สถาบันวิจัย NECTEC ผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และวิธีการพิเศษในการประมวลผลภาพด้วย OpenCV ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ได้จนเป็นผลสำเร็จในท้ายที่สุด

ขอบคุณน้อง ๆ นิสิตคณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ชมรมวรรณศิลป์ และชมรมเกษตรสาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อาสาเป็นตัวอย่างให้เก็บชุดภาพใบหน้าสำหรับงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และคุณน้าอรพรรณ วรรณศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุกประการและช่วยเหลือแก้ไขปัญหาที่พบบทตลอดระยะเวลาการศึกษาจนผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี งานวิจัยชิ้นนี้จึงขออุทิศประโยชน์ทั้งปวงให้แก่บุพการีและผู้มีพระคุณของผมหันต์สามท่านข้างต้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการหาตำแหน่งและบริเวณใบหน้า.....	2
1.2.2 แบบจำลองใบหน้าสามมิติ.....	3
1.2.3 งานวิจัยสกัดข้อมูลรูปร่างใบหน้าสามมิติ.....	6
1.2.4 งานวิจัยสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าสามมิติ.....	7
1.3 วัตถุประสงค์.....	9
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	10
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	10
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	11
1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	11
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 การเปรียบเทียบกล้องและแก้ไขความผิดเพี้ยนจากคุณสมบัติกล้อง.....	12
2.2 แบบจำลองสีผิวและการตรวจหาใบหน้าจากภาพ.....	13
2.2.1 ปริภูมิสี HSV.....	14

2.2.2	ปริภูมิสี TSL.....	15
2.3	การประมาณรูปร่างวัตถุในภาพ	15
2.3.1	การประมาณรูปร่างวัตถุด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด.....	15
2.3.2	การประมาณรูปร่างวัตถุด้วยรูปหลายเหลี่ยม	16
2.4	ทักษะคอมพิวเตอร์.....	17
2.4.1	แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์.....	17
2.4.2	แบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE.....	20
2.4.3	การจับคู่วิธีแบบจำลองใบหน้าสามมิติ.....	23
2.5	การปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติ.....	24
2.5.1	ขั้นตอนวิธีป็นเขา.....	25
2.5.2	ขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด	26
2.5.3	ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม.....	27
2.6	การส่งผ่านพื้นผิว	28
3	การจำลองใบหน้าบุคคลแบบสามมิติ	31
3.1	การเก็บชุดภาพใบหน้าบุคคล.....	32
3.2	การฝึกสอนและเตรียมข้อมูล.....	34
3.2.1	การสอนแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่สำหรับตรวจหาบริเวณใบหน้า	34
3.2.2	การสอนแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์สำหรับพีเจอร์บนใบหน้า	35
3.2.3	การเตรียมแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE	38
3.3	กระบวนการจำลองใบหน้าสามมิติบุคคล.....	40
3.3.1	การเลือกบริเวณใบหน้า	41
3.3.2	การสกัดจุดพีเจอร์บนใบหน้าด้วยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์	42
3.3.3	การปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติ	44
3.3.4	การประกอบข้อมูลแบบจำลองใบหน้าสามมิติ	48
4	การทดลองและผลการทดลอง.....	55

4.1	การทดลองตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิว	55
4.1.1	วิธีการทดลอง.....	57
4.1.2	ผลการทดลอง	58
4.1.3	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	60
4.2	การทดลองปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจเจอร์	60
4.2.1	วิธีการทดลอง.....	61
4.2.2	ผลการทดลอง	61
4.2.3	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	62
4.3	การทดลองปรับปรุงรูปร่างแบบจำลองใบหน้าสามมิติเฉพาะบริเวณ	63
4.3.1	วิธีการทดลอง.....	63
4.3.2	ผลการทดลอง	63
4.3.3	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	67
4.4	การทดลองวัดความถูกต้องของรูปร่างใบหน้าสามมิติ	68
4.4.1	วิธีการทดลอง.....	68
4.4.2	ผลการทดลอง	69
4.4.3	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	70
4.5	การทดลองวัดความถูกต้องของพื้นผิวใบหน้าสามมิติ	71
4.5.1	วิธีการทดลอง.....	71
4.5.2	ผลการทดลอง	72
4.5.3	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	74
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2	การคัดเลือกบริเวณใบหน้าจากภาพ	77
5.3	การสกัดข้อมูลรูปร่างใบหน้าและการปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติ	78
5.4	การรวมข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวของใบหน้าสามมิติ	79

5.5	ข้อเสนอแนะ	80
5.5.1	ข้อเสนอแนะในส่วนแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่	80
5.5.2	ข้อเสนอแนะในส่วนการปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติ	80
5.5.3	ข้อเสนอแนะในส่วนการรวมข้อมูลรูปร่างและพื้นผิว	80
	รายการอ้างอิง.....	82
	ภาคผนวก.....	86
	ภาคผนวก ก.....	87
	ภาคผนวก ข.....	90
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1	
ข้อแตกต่างระหว่างแบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ (AAM) และรูปร่างกัมมันต์ (ASM).....	20
ตารางที่ 2.2	
ทิศทางการปรับตัวแปรในแต่ละรอบด้วยขั้นตอนวิธีลงทางลาดขั้นที่สุด.....	26
ตารางที่ 3.1	
ลำดับและตำแหน่งของจุดพีเจอร์สองมิติบนใบหน้า	36
ตารางที่ 3.2	
หน่วยกระทำเฉพาะจุดของแบบจำลอง CANDIDE ที่แก้ไขและเพิ่มสำหรับงานวิจัยนี้	39
ตารางที่ 3.3	
ลำดับการปรับปรุงพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรน	47
ตารางที่ 3.4	
รหัสเทียมการสร้างภาพพิกัดพื้นผิวจากข้อมูลพื้นผิวที่ประกอบขึ้น.....	53
ตารางที่ 4.1	
ผลความแม่นยำของการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิว	58
ตารางที่ 4.2	
ผลระยะเวลาการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิว.....	58
ตารางที่ 4.3	
ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์สองมิติ	62
ตารางที่ 4.4	
ผลการเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูลใบหน้าทำทางต่าง ๆ	64
ตารางที่ 4.5	
ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูลใบหน้าทำทางต่าง ๆ	64
ตารางที่ 4.6	
ผลเปรียบเทียบความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างรูปร่างสามมิติและภาพหน้ามุ่มต่าง ๆ	69
ตารางที่ 4.7	
ค่าความผิดพลาดของพื้นผิวแบบจำลองต่อบุคคล	72
ตารางที่ 4.8	
เปรียบเทียบใบหน้าสามมิติที่ได้จากการรวมพื้นผิวสองวิธี	73
ตารางที่ ก.1	
ชุดคู่จุดบนโครงใบหน้า.....	87
ตารางที่ ก.2	
ชุดคู่จุดบนคิ้วทั้งสองข้าง.....	88
ตารางที่ ก.3	
ชุดคู่จุดบนดวงตาทั้งสองข้าง.....	88
ตารางที่ ก.4	
ชุดคู่จุดบนจมูก.....	88
ตารางที่ ก.5	
ชุดคู่จุดบนริมฝีปาก.....	89
ตารางที่ ข.1	
ตัวอย่างผลจำลองใบหน้าสามมิติจากฐานข้อมูลที่เก็บจากกล้องเว็บแคม.....	90
ตารางที่ ข.2	
ตัวอย่างผลจำลองใบหน้าสามมิติจากฐานข้อมูล MIT-CBCL.....	92

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 แบบจำลองใบหน้าทั่วไปปรับรูปร่างได้	4
รูปที่ 1.2 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE	5
รูปที่ 1.3 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE-2	5
รูปที่ 1.4 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE-3	6
รูปที่ 1.5 ตำแหน่งจุดพีเจอร์สำหรับแบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์	7
รูปที่ 2.1 แบบจำลองสี่ผิวนแบบประมาณด้วยวงรีบนปริภูมิ Cr-Cb [16]	14
รูปที่ 2.2 ลำดับการประมาณวัตถุด้วยรูปหลายเหลี่ยม [24]	17
รูปที่ 2.3 แบบจำลองรูปร่าง [20]	19
รูปที่ 2.4 แบบจำลองภาพฉายระดับเทา [20]	19
รูปที่ 2.5 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE ในมุมมองหน้าตรงและด้านข้าง	21
รูปที่ 2.6 แกนหมุนในปริภูมิสามมิติของแบบจำลองใบหน้า	22
รูปที่ 2.7 สามเหลี่ยมที่ผ่านการซัดวิชันด้วยวิธี Triangular Subdivision	23
รูปที่ 2.8 พิกัดพื้นผิวในระบบ U-V	29
รูปที่ 2.9 พิกัดพื้นผิวของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ	30
รูปที่ 3.1 ลำดับชุดภาพตัวอย่างจากฐานข้อมูลภาพใบหน้าบุคคล	33
รูปที่ 3.2 ภาพตัวอย่างจากฐานข้อมูลใบหน้า MIT-CBCL	33
รูปที่ 3.3 แบบจำลองสี่ผิวนเชิงพื้นที่	35
รูปที่ 3.4 ลำดับและตำแหน่งจุดพีเจอร์สองมิติบนใบหน้า	35
รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบแบบจำลอง CANDIDE ที่ซัดวิชันกับต้นฉบับ	38
รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติ	40
รูปที่ 3.7 ภาพที่ผ่านกระบวนการกรองบริเวณที่ไม่ใช่สี่ผิวนอก	42
รูปที่ 3.8 ผลการสกัดจุดพีเจอร์ด้วยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์	43
รูปที่ 3.9 แผนภาพเส้นทางการค้นหาแบบผ่อนปรน	45
รูปที่ 3.10 ภาพพิกัดพื้นผิวจากการขั้นตอนประกอบข้อมูลพื้นผิว	54
รูปที่ 3.11 แบบจำลองใบหน้าผลลัพธ์ที่ได้	54
รูปที่ 4.1 แบบจำลองสี่ผิวนเชิงพื้นที่แบบ T-S	56
รูปที่ 4.2 แบบจำลองสี่ผิวนเชิงพื้นที่แบบ H-S	56

รูปที่ 4.3 ปริภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลองสี่ผิวเชิงพื้นที่ T-S 57

รูปที่ 4.4 ปริภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลองสี่ผิวเชิงพื้นที่ H-S..... 57

รูปที่ 4.5 ผลการคัดเลือกบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวแบบจุด T-S 59

รูปที่ 4.6 ผลการคัดเลือกบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวแบบจุด H-S..... 59

รูปที่ 4.7 ผลการคัดเลือกบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวเชิงพื้นที่ T-S 59

รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูล
ใบหน้าท่าทางต่าง ๆ 65

รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูล
ใบหน้าท่าทางต่าง ๆ 65

รูปที่ 4.10 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นกับเวลาการประมวลผล..... 66

รูปที่ 4.11 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นกับค่าความผิดพลาด 66

รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์การปรับเหมาะและปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณของหน้าหันเกิน 10 องศา ไม่
เกิน 10 องศา และหน้าตรงตามลำดับ 67

รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของพื้นผิวจากตัวอย่างรายบุคคล 73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันแบบจำลองใบหน้าสามมิติของบุคคลเริ่มเป็นที่แพร่หลายในเกมสามมิติที่อนุญาตให้ผู้เล่นสามารถสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติของผู้เล่นเพื่อใช้แทนตัวละครในเกมได้ด้วยตนเอง นอกจากนี้ใบหน้าสามมิตียังเป็นส่วนสำคัญในการสร้างแบบจำลองตัวละครสำหรับภาพเคลื่อนไหว (Animation) [1-8] ที่ต้องการให้มีลักษณะใบหน้าแบบสามมิติคล้ายคลึงบุคคลจริงด้วยเช่นกัน

การสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติของบุคคลในปัจจุบันมีหลายวิธี ได้แก่ การสแกนเลเซอร์โดยตรงด้วยเครื่องมือสแกนใบหน้าสามมิติ [1] ซึ่งจะได้แบบจำลองใบหน้าสามมิติที่มีความละเอียดสูง แต่อุปกรณ์มีราคาแพงและมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีวิธีการสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติจากภาพนิ่ง เช่น การใช้ภาพนิ่งภาพเดียวเพื่อสร้างแบบจำลองใบหน้า [2] การใช้ภาพนิ่งสองภาพจากกล้องสองตัวเลียนแบบการมองเห็นของมนุษย์แบบคู่สองตา (Stereo-pair) [3] การถ่ายภาพใบหน้าหลายมุมมอง โดยการสกัดข้อมูลรูปร่างจากภาพรับเข้าดังกล่าวเพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นแบบจำลองสามมิติ ซึ่งโดยทั่วไปความถูกต้องของรูปร่างและพื้นผิวของแบบจำลองใบหน้าที่สร้างขึ้นจะขึ้นกับความหลากหลายของลักษณะการหันหน้าดังที่ปรากฏในภาพด้วย

งานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอขั้นตอนวิธีสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าบุคคลแบบสามมิติด้วยการใช้กล้องรับภาพ (web camera) ตัวเดียวที่อยู่นิ่ง สำหรับบันทึกภาพใบหน้าบุคคลที่หันรอบแกนตั้งเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างใบหน้าและกล้องเพื่อจำลองลักษณะการถ่ายภาพใบหน้าบุคคลที่ครอบคลุมมุมมองหน้าตรงไปจนถึงมุมหันข้าง จากนั้นตรวจหาตำแหน่งของกลุ่มจุดพีเจอร์ (Feature Points) ของใบหน้าจากแต่ละภาพนิ่งเพื่อนำมาประเมินข้อมูลรูปร่างสามมิติและท่าทางของใบหน้าด้วยแบบจำลองใบหน้าสามมิติ

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ งานวิจัยการหาตำแหน่งและบริเวณใบหน้าจากภาพ และ งานวิจัยการสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติ ดังนี้

1.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการหาตำแหน่งและบริเวณใบหน้า

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 เป็นต้นมา งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ฟีเจอร์ใบหน้า (Facial Features Analysis) และการหาตำแหน่งบริเวณใบหน้าในภาพเพื่อนำไปใช้ในด้านทางการแพทย์ (Medical Imaging) [1][2][3] ภาพเคลื่อนไหว (Animation) [1][4][5][7][9] การเข้ารหัสวิดิทัศน์ โดยวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของใบหน้า [10][11][12] และชีวมาตร (Biometrics) [6][13] ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง โดยฟีเจอร์ที่นำมาวิเคราะห์เพื่อค้นหาตำแหน่งและบริเวณของใบหน้าจากภาพ ได้แก่ ไอเกนเฟส การใช้โครงข่ายประสาทเทียมตรวจหาบริเวณใบหน้า และการใช้แบบจำลองสีผิวตรวจหาบริเวณใบหน้า

1.2.1.1 ไอเกนเฟส

ไอเกนเฟส (Eigenfaces) [13] เป็นฟีเจอร์ที่เป็นค่าทางสถิติของใบหน้าบุคคลที่ได้จากชุดรูปภาพใบหน้าตรง คิดค้นและนำเสนอโดย M. Turk และ A. Pentland ในปี ค.ศ. 1991 โดยใช้เซตของภาพระดับเทาของใบหน้าบุคคลในท่าทางหน้าตรงเป็นชุดข้อมูลสอน แปลงข้อมูลระดับเทาของภาพไปเป็นเวกเตอร์ ขนาด $N \times N$ สำหรับใช้เป็นชุดข้อมูลสอนซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนภาพ จากนั้นใช้ขั้นตอนวิธี Principal Component Analysis (PCA) ลดมิติของข้อมูลสอนให้เล็กลงโดยยังคงคุณสมบัติของข้อมูลเอาไว้โดยการคำนวณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของชุดข้อมูลสอน แล้วคำนวณค่าไอเกนและไอเกนเวกเตอร์ของเมทริกซ์ โดยจะเลือกกลุ่มไอเกนเวกเตอร์ที่สอดคล้องกับค่าไอเกนสูงสุด M อันดับ โดย $M < N$ และถือว่าชุดของไอเกนเวกเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแทนของข้อมูลใบหน้าทั้งหมด เรียกข้อมูลนี้ว่า “ปริภูมิใบหน้า” (Faces Space) ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลใบหน้าที่ใช้สอนทั้งหมด งานวิจัยนี้ถือเป็นงานวิจัยแรก ๆ เกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูลใบหน้าโดยไม่มีกำหนดจุดฟีเจอร์บนใบหน้าและไม่มีการใช้แบบจำลองของโครงสร้างใบหน้า

1.2.1.2 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมตรวจหาบริเวณใบหน้า

ในปี ค.ศ. 1998 H. Rowley และคณะได้เสนอขั้นตอนวิธีตรวจหาใบหน้าจากภาพโดยอาศัยโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) [14] ทำหน้าที่ทดสอบบริเวณต่าง ๆ ในภาพว่ามีคุณสมบัติเป็นบริเวณใบหน้าหรือไม่ โดยใช้ข้อมูลสอนเป็นชุดภาพใบหน้าตรงเป็นกลุ่มตัวอย่างบวก และชุดภาพที่ไม่มีใบหน้าปรากฏอยู่เป็นกลุ่มตัวอย่างลบ ผลทดสอบกับชุดของภาพใบหน้า

ตรง 1,001 ภาพจากฐานข้อมูล FERET [15] พบว่ามีอัตราการตรวจพบใบหน้าสูงสุด 98 % และภาพใบหน้าหันซ้ายขวา ก้มหรือเงยหน้าไม่เกิน 45 องศาที่จำนวนภาพเท่ากัน ด้วยอัตราตรวจพบใบหน้าอยู่ระหว่าง 86 ถึง 91%

ต่อมา Rowley และคณะได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาใบหน้าเฉียงซ้ายหรือขวาบนระนาบของภาพ [16] โดยได้เพิ่มโครงข่ายอีกชั้น เรียกว่า “โครงข่ายจัดเส้นทาง” (Router Network) เพื่อปรับมุมเฉียงของหน้าต่างสำรวจ (Exploring Window) สำหรับแก้ไขมุมเฉียงของใบหน้าให้เป็นหน้าตรงก่อนส่งต่อให้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทดสอบคุณสมบัติว่ามีใบหน้าปรากฏในบริเวณนั้น ๆ หรือไม่ โดยขั้นตอนการสอนได้เพิ่มเติมมุมเฉียงของใบหน้าที่รวมเข้ากับข้อมูลภาพสอนด้วยเช่นกัน และใช้วิธีการค้นหาแบบทั่วถึง (Exhaustive Search) ในขั้นตอนการค้นหาใบหน้าในทุกมุมเฉียงที่เป็นไปได้ ทำให้ความซับซ้อนของการประมวลผลเพิ่มขึ้นจากที่เสนอใน [14] อย่างไรก็ตาม อัตราการตรวจพบใบหน้าเฉียงไม่เกิน 45 องศา นั้นได้ผลที่แม่นยำมากขึ้นเป็นระหว่าง 92 และ 97 %

1.2.1.3 การใช้แบบจำลองสีผิวตรวจหาบริเวณใบหน้า

ในปี ค.ศ. 2005 Y. P. Lin [16] ได้นำแบบจำลองสีผิว (Skin Color Model) ที่ไม่ขึ้นกับสภาพความส่องสว่างมาใช้ในการพิจารณาบริเวณใบหน้าจากภาพ โดยเลือกใช้แบบจำลองสีผิวในปริภูมิสี YCbCr ซึ่งแยกองค์ประกอบพารามิเตอร์ของรงค์และความส่องสว่างของสีออกจากกัน และออกแบบการใช้งานให้ประมวลผลไม่ซับซ้อนเพื่อให้สามารถใช้งานแบบทันกาล (Realtime) ได้ ขั้นตอนวิธีนี้เลือกใช้เฉพาะพารามิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบรงค์ (Cr และ Cb) ของแต่ละจุดสีและสามารถคัดเลือกบริเวณสีผิวจากเฟรมภาพวิดีโอได้ นอกจากนี้ Y. P. Lin ได้เลือกใช้วิธีตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุในเฟรมเพื่อหาตำแหน่งที่แน่นอนของบริเวณใบหน้าสำหรับแก้ปัญหาสีผิวกับสีของฉากหลังที่ใกล้เคียงกันด้วย สำหรับตำแหน่งของดวงตา Y. P. Lin ได้ใช้องค์ประกอบความส่องสว่าง Y จากภาพเพื่อระบุตำแหน่งดวงตาจากบริเวณใบหน้าที่ได้โดยใช้ระยะเวลาประมวลผลเพียงเล็กน้อย โดยมีข้อสังเกตว่าบริเวณดวงตามักจะมีค่าของความส่องสว่างที่มีค่าต่ำแม้ว่ามีสภาพแสงจะเปลี่ยนแปลงไปจึงเหมาะสมต่อการหาพิกัดของดวงตาภายใต้สภาพแสงที่ไม่แน่นอน

1.2.2 แบบจำลองใบหน้าสามมิติ

ในปัจจุบันแบบจำลองใบหน้าสามมิติแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบจำลองใบหน้าสามมิติทั่วไป (Generic 3D Face Model) และ แบบจำลองแบบมีพารามิเตอร์ CANDIDE ดังนี้

1.2.2.1 แบบจำลองใบหน้าสามมิติทั่วไป

แบบจำลองใบหน้าสามมิติทั่วไป [2][4] เป็นแบบจำลองรูปร่างใบหน้ามนุษย์แบบสามมิติที่สร้างขึ้นไว้เป็นต้นแบบเพื่อปรับเหมาะเข้ากับข้อมูลรูปร่างของใบหน้าที่สกัดได้จากภาพ มีลักษณะดังรูปที่ 1.1 โดยการปรับรูปร่างของแบบจำลองดังกล่าวนี้จะใช้วิธีการย้ายตำแหน่งจุดองค์ประกอบในสามมิติของแบบจำลองแต่ละจุดโดยตรงจนกว่าจะได้รูปร่างแบบจำลองผลลัพธ์ตามต้องการ

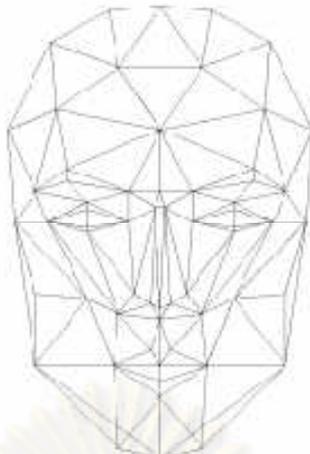


รูปที่ 1.1 แบบจำลองใบหน้าทั่วไปปรับรูปร่างได้ [4]

1.2.2.2 แบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE

CANDIDE [10][11] คือ แบบจำลองใบหน้าแบบสามมิติที่ผู้ใช้สามารถปรับท่าทางและรูปร่างเองได้ด้วยการปรับพารามิเตอร์ (Parameters) ได้รับการออกแบบมาสำหรับงานเข้ารหัสการเคลื่อนไหวของใบหน้าโดยอาศัยแบบจำลอง (Model-based Coding) จากวีดิทัศน์ เพื่อให้สามารถสร้างภาพเคลื่อนไหวใบหน้ากลับมาจากข้อมูลที่เข้ารหัสเก็บไว้ได้อย่างรวดเร็วด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพปานกลางได้

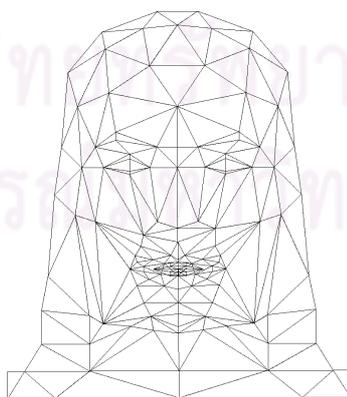
ความเป็นมาของแบบจำลอง CANDIDE แบบดั้งเดิมเริ่มจากรายงานของ M. Rydfalk [12] เมื่อ ค.ศ. 1987 ที่เสนอแนวคิดการสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่อาศัยพารามิเตอร์ (Parameterized 3d Face Model) เพื่อควบคุมท่าทางและรูปร่าง แบบจำลองดั้งเดิมนี้นี้ประกอบด้วยจุดมุม (Vertex) ทั้งหมด 75 จุด หน้าสามเหลี่ยม (Triangle Face) 100 ชิ้น แต่ไม่ได้รับความนิยมเท่าใดนัก



รูปที่ 1.2 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE [10]

จากรายงานลำดับพัฒนาแบบจำลอง CANDIDE [10] ที่เขียนโดย Jorgen Ahlberg (ผู้พัฒนาแบบจำลอง CANDIDE-3) ระบุว่าต่อมา Märten Strömberg ได้ปรับปรุงแบบจำลอง CANDIDE ที่เสนอโดย M. Rydfalk โดยเพิ่มหน่วยกระทำ (Action Unit) สำหรับปรับปรุงรูปร่างของแบบจำลอง ซึ่งหน่วยกระทำนี้ยังใช้จนถึงแบบจำลอง CANDIDE ในปัจจุบัน แบบจำลอง CANDIDE ที่เสนอนี้ประกอบด้วยจุดมุมทั้งสิ้น 79 จุด หน้าสามเหลี่ยม 108 ชิ้น และหน่วยกระทำ 11 ตัวแปร และเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในชื่อแบบจำลอง CANDIDE-1 มีลักษณะดังรูปที่ 1.2

ต่อมา Bill Welsh ได้นำแบบจำลอง CANDIDE-1 มาสร้างใหม่ให้ครอบคลุมทั้งศีรษะ ลำคอ รวมถึงชีพัน โดยมีจุดประสงค์สำหรับเข้ารหัสการเคลื่อนไหวของทั้งศีรษะ โดยแบบจำลองที่ B. Welsh สร้างใหม่นี้มีจุดมุมเพิ่มขึ้นเป็น 160 จุด หน้าสามเหลี่ยมทั้งสิ้น 238 ชิ้น แต่ลดจำนวนหน่วยกระทำเหลือเพียง 6 ตัวแปร แบบจำลองที่สร้างขึ้นใหม่นี้เรียกว่า CANDIDE-2 มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE-2 [10]

ปัจจุบันแบบจำลอง CANDIDE ได้รับการแก้ไขโดย Jorgen Ahlberg โดยนำเอาแบบจำลอง CANDIDE-1 มาปรับปรุงแทนที่จะเป็น CANDIDE-2 เนื่องจากต้องการเข้ารหัสการ

เคลื่อนไหวในรูปแบบ MPEG-4 เฉพาะส่วนใบหน้าเท่านั้น แต่ต้องการความละเอียดมากขึ้นในบางตำแหน่งบนใบหน้า โดยแบบจำลองใหม่นี้เปลี่ยนตำแหน่งของจุดมุมให้สัมพันธ์กับจุดพีเจอร์ สำหรับเข้ารหัส MPEG-4 โดยมีจุดมุมใหม่ทั้งสิ้น 113 จุด และหน้าสามเหลี่ยม 168 แบบจำลองนี้เป็นที่รู้จักในชื่อ CANDIDE-3 โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE-3 [10]

1.2.3 งานวิจัยสกัดข้อมูลรูปร่างใบหน้าสามมิติ

การปรับรูปร่างของแบบจำลองสามมิติจะต้องอาศัยข้อมูลรูปร่างของใบหน้าเป็นหลัก โดยงานวิจัยที่เสนอวิธีการสกัดข้อมูลรูปร่างใบหน้าจากภาพที่นิยมใช้งานในปัจจุบันได้แก่ แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ (Active Shape Model) [18][19][20] และ แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ (Active Appearance Model) [2] แบบจำลองทั้งสองถูกคิดค้นและนำเสนอโดย T.F. Cootes และคณะ ในช่วงทศวรรษ 1990 [18][19] โดยรายละเอียดของแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์จะอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 2.4.1 ต่อไป

1.2.3.1 แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์

แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์เป็นการแทนวัตถุในภาพด้วยแบบจำลองทางสถิติของทั้งรูปร่างและพื้นผิวของวัตถุที่สนใจ มีงานวิจัยหลายชิ้นเลือกใช้แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ เช่น งานวิจัยของ Jorgen Ahlberg ใน ค.ศ. 2002 [21] ที่เสนอวิธีการปรับเหมาะแบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ด้วยขั้นตอนวิธีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความเร็วของการประมวลผล งานวิจัยของ Mikkel Stegmann ใน ค.ศ. 2003 [22] เสนอวิธีการสอนแบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ให้เรียนรู้โครงสร้างใบหน้าได้ถูกต้องกว่าแบบดั้งเดิม โดยลักษณะของโครงสร้างใบหน้าที่ประกอบด้วยจุดพีเจอร์ที่ M. Stegmann ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 1.5 และ งานวิจัยของ Hu

Fengsong และคณะ ใน ค.ศ. 2008 [6] เสนอการใช้แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์สกัดจุดพีเจอร์และพื้นผิวใบหน้าจากภาพเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติ

แบบจำลองกัมมันต์สามารถใช้เรียนรู้รูปร่างของวัตถุจากภาพระดับเทาได้ดี คงทนต่อสิ่งรบกวน (Noise) และสามารถปรับรูปร่างให้เข้ากับวัตถุในภาพได้รวดเร็ว ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับเรียนรู้รูปร่างวัตถุที่มี รูปร่างค่อนข้างแน่ชัดและเฉพาะตัว มีจำนวนภาพที่ใช้สอนมากพอ โดย Tim Cootes ได้สรุปไว้ใน [18] ว่าแบบจำลองกัมมันต์จะใช้ไม่ได้ผลกับวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปร่างอย่างหลากหลาย เช่น หนอน โปรโตซัว เป็นต้น หรือวัตถุที่มีขนาดเล็กจนเกินไป ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมของแบบจำลองกัมมันต์จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.4.1 ต่อไป



รูปที่ 1.5 ตำแหน่งจุดพีเจอร์สำหรับแบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ [22]

1.2.4 งานวิจัยสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าสามมิติ

งานวิจัยการสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าสามมิติที่พบมากในปัจจุบันมักใช้แบบจำลองใบหน้าเปล่าที่สร้างขึ้นก่อนมาปรับรูปร่างให้ใกล้เคียงกับรูปร่างของใบหน้าจริงที่สกัดและวิเคราะห์จากภาพถ่าย ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดของการสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าจุดหนึ่งคือลักษณะการรับข้อมูลเข้าสู่กระบวนการ ได้แก่ การใช้ภาพเดี่ยว การใช้ภาพสองภาพเลียนแบบการรับรู้ภาพจากดวงตาสองข้างของมนุษย์ (Stereo Vision) และ การใช้ภาพหลายภาพ

1.2.4.1 การสังเคราะห์ใบหน้าสามมิติจากภาพสองภาพเลียนแบบตามมนุษย์

ใน ค.ศ. 2007 Ying Zheng และคณะ [23] ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าบุคคลจากการใช้กล้องถ่ายภาพสองตัวในลักษณะเลียนแบบลักษณะการรับภาพของตาทั้งสองของมนุษย์ โดยที่ไม่จำเป็นต้องระบุตำแหน่งและมุมของกล้องทั้งสองแก่ระบบ

วิธีการที่เสนอในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การตรวจหาตำแหน่งจุดพีเจอร์จากภาพใบหน้า การปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าเข้ากับจุดพีเจอร์จากภาพทั้งสองเพื่อหามุมหันของ

ใบหน้าซึ่งทำให้สามารถประเมินตำแหน่งของกล้องได้ และการขึ้นรูปสามมิติจากข้อมูลความลึกซึ่งประเมินได้จากตำแหน่งของกล้องและความสอดคล้องระหว่างจุดพีเจอร์ที่สกัดได้จากภาพใบหน้าทั้งสอง

ผลการทดลองของงานวิจัยนี้รายงานว่าระยะเวลาที่ใช้ตลอดกระบวนการเพื่อสร้างใบหน้าสามมิติไม่มากนักเนื่องจากใช้ภาพเพียงสองภาพในการประมวลผล และการประมาณข้อมูลความลึกจากความสอดคล้องของใบหน้าจากภาพสองภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังต้องอาศัยขั้นตอนวิธีพิเศษเพิ่มเติมสำหรับการปรับปรุงรูปร่างของแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสม

1.2.4.2 การสังเคราะห์ใบหน้าสามมิติจากแบบจำลองใบหน้าทั่วไปปรับปรุงร่างได้ด้วยภาพหลายภาพ

ใน ค.ศ. 2006 Ming Zhao และคณะ [4] ได้เสนอกระบวนการสังเคราะห์ใบหน้าสามมิติโดยการขึ้นรูปจากแบบจำลองใบหน้าสามมิติทั่วไปที่ปรับปรุงร่างได้ (Morphable Generic Face Model) ขั้นการสกัดข้อมูลทางรูปร่างของใบหน้าเพื่อขึ้นรูปสามมิติที่เสนอในงานวิจัยนี้ใช้ขั้นตอนวิธีส่งผ่านจุดภาพสองมิติไปยังปริภูมิภาพสามมิติ (2D-to-3D Mapping) โดยใช้ภาพรับเข้าหลายภาพ ที่เสนอโดย Pighin และคณะ [7] เมื่อ ค.ศ. 1998 สิ่งที่ได้รับจากขั้นตอนดังกล่าว ได้แก่ ท่าทางของใบหน้าและศีรษะในปริภูมิสามมิติ กลุ่มของจุดมุมแบบสามมิติของใบหน้า จากการใช้ภาพหลายภาพเป็นข้อมูลรับเข้าจะช่วยให้ข้อมูลทางรูปร่างใกล้เคียงค่าจริงมากกว่าการใช้ภาพเพียงสองภาพ

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังเลือกใช้วิธีสังเคราะห์ใบหน้าสามมิติจากแบบจำลองใบหน้าทั่วไปปรับปรุงร่างได้โดยการนำข้อมูลทางรูปร่างที่ได้จากกระบวนการสกัดข้างต้นมาปรับปรุงแบบจำลองแบบซักรอบ กระทั่งได้ใบหน้าสามมิติที่ปรับปรุงร่างให้ค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลรูปร่างต่ำที่สุดและยึดถือเป็นผลลัพธ์ของกระบวนการ

1.2.4.3 การสังเคราะห์ใบหน้าสามมิติจากภาพเดียว

ใน ค.ศ. 2007 Yepeng Guan [2] ได้เสนอแนวคิดว่าการใช้ภาพหลายภาพเป็นการสิ้นเปลืองระยะเวลาคำนวณ และสามารถลดการประมวลผลลงเหลือเพียงการใช้ภาพใบหน้าตรงภาพเดียวได้ ภาพใบหน้าที่รับเข้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ขอบเขตของมุมเอียง หมุน ในแกน x , y และ z ไม่เกิน ± 30 องศาเทียบกับใบหน้าหันตรง

เนื่องจากงานนี้ใช้ภาพรับเข้าภาพเดียว จึงไม่ใช้วิธีการส่งผ่านจุดสองมิติไปเป็นจุดในปริภูมิสามมิติดังเช่นงานวิจัยของ M. Zhao และคณะ แต่จะใช้การปรับปรุงร่างวัตถุในภาพด้วยการ

แปลง Affine ทำให้ได้ภาพใบหน้าตรงก่อน จากนั้นจึงตรวจหาบริเวณดวงตาด้วยแม่แบบ จากการแปลง Affine กับภาพจะได้ตัวแปรการหมุนและการเลื่อนในสองมิติของใบหน้าออกมาด้วย

ขั้นตอนการสังเคราะห์ใบหน้าสามมิติในงานวิจัยนี้เลือกใช้การฉายจุดพีเจอรที่สกัดจากภาพหน้าตรง (หลังการแปลง Affine) ลงบนแบบจำลองใบหน้าสามมิติทั่วไปปรับรูปร่างคล้ายกับที่ใช้ในงานวิจัยของ M. Zhao ในลักษณะหน้าตรง สิ่งที่ได้คือ จุดสองมิติบนใบหน้าจะถูกส่งผ่านไปยังตำแหน่งในสามมิติของแบบจำลองใบหน้าไปโดยปริยาย

ข้อสังเกตหนึ่งจากงานวิจัยนี้คือการฉายจุดดังกล่าวจะไม่สามารถปรับรูปร่างของใบหน้าสามมิติได้ดีเท่ากับการใช้การส่งผ่านจุดสองมิติไปเป็นสามมิติ แต่ช่วยให้การสร้างใบหน้าสามมิติและการส่งผ่านพื้นผิวจากภาพไปยังแบบจำลองก็ทำได้ค่อนข้างเร็วกว่าการใช้หลายภาพ

1.2.4.4 การสังเคราะห์สามมิติด้วยแบบจำลอง CANDIDE จากภาพเดียว

ใน ค.ศ. 2008 H. Fengsong และคณะ [6] ได้เสนอการใช้แบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE สกัดพารามิเตอร์ของใบหน้าจากภาพโดยตรง เนื่องจากแบบจำลอง CANDIDE สามารถปรับรูปร่างและท่าทางได้โดยการปรับค่าตัวแปรหน่วยกระทำแทนที่จะเคลื่อนย้ายตำแหน่งของจุดบนแบบจำลองโดยตรง ทำให้สามารถใช้วิธีนี้เพื่อปรับเหมาะตำแหน่งของจุดมุมให้ตรงกับจุดพีเจอรที่สกัดได้จากภาพเพื่อประมาณรูปร่างของใบหน้าในภาพได้

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์เพื่อค้นหาแบบจำลองสามมิติ CANDIDE ที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถปรับเข้ากับภาพใบหน้าสองมิติได้ โดยมีนิยามว่า แบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองระหว่างตำแหน่งจุดพีเจอรและจุดมุมต่ำสุดจะถือว่าเหมาะสมที่สุด

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้ภาพใบหน้าสองมิติภาพเดียวเท่านั้นในกระบวนการสังเคราะห์ ดังนั้น แม้ว่าการประมวลผลจะใช้เวลาน้อย แต่ก็มีผลผิดพลาดของผลลัพธ์ได้เช่นกัน เนื่องจากภาพเพียงภาพเดียวไม่สามารถให้ข้อมูลทางรูปร่างของใบหน้าได้อย่างครบถ้วน

1.3 วัตถุประสงค์

1. ใช้กล้องรับภาพตัวเดียว (web camera) เพื่อรวบรวมข้อมูลภาพของใบหน้าในมุมมองตั้งแต่ใบหน้าหันข้าง +45 องศาจนถึง -45 องศา โดยประมาณ รอบแกนตั้ง (ลำคอ) เพื่อให้สะดวกในการติดตั้งและใช้งานจริง แทนที่จะใช้กล้องจำนวนสองตัวหรือมากกว่า หรือกล้องถ่ายภาพหลายครั้ง

2. วิเคราะห์หาวิธีการสกัดข้อมูลรูปร่างสามมิติของใบหน้าจากภาพด้วยการใช้แบบจำลองใบหน้าสามมิติแบบปรับพารามิเตอร์ และการเลือกพื้นผิวสำหรับแบบจำลองใบหน้าสามมิติจากชุดภาพนิ่ง
3. เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าสามมิติด้วยกล้องหนึ่งตัว สำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองตัวละครสามมิติสำหรับภาพเคลื่อนไหว (Animation) และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. กล้องเว็บแคมที่ใช้จะต้องอยู่หนึ่ง ไม่มีการเปลี่ยนมุมมอง ภายใต้สภาพแสงคงที่ตลอดกระบวนการเก็บภาพใบหน้าบุคคล โดยไม่มีการปรับลักษณะการรับแสงโดยอัตโนมัติ เช่น การปรับระดับสีขาว (White Balance) เพื่อรักษาระดับสีให้คงที่ตลอดกระบวนการเก็บชุดภาพรับเข้า
2. การเก็บภาพใบหน้าบุคคลเป็นการคัดเลือกจากเฟรมภาพที่บันทึกผ่านกล้องเว็บแคม ประมาณ 5 เฟรมภาพต่อวินาที โดยให้บุคคลนั่งหันหน้าเป็นมุมไม่เกิน -45 ถึง +45 องศา โดยประมาณเทียบกับมุมหน้าตรงรอบแกนตั้ง (ลำคอ) โดยไม่มีการก้มหรือเงยหน้าร่วมด้วย
3. ระยะห่างระหว่างใบหน้ากับกล้องประมาณ 1 ฟุต และไม่มีการเปลี่ยนระยะห่างดังกล่าวระหว่างกระบวนการเก็บภาพใบหน้าบุคคล
4. ไม่มีวัตถุอื่นใดบดบังส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของใบหน้า
5. ภาพวิดีโอที่คัดเลือกจากวิดีโอเป็นแบบสี ความลึกสีละ 8 บิต ขนาด 640×480 จุดภาพ หรือ 320×240 จุดภาพ
6. ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพวิดีโอที่มีภาพใบหน้าของบุคคลเพียงคนเดียวต่อหนึ่งชุดของภาพ
7. ไม่มีการเคลื่อนไหวศีรษะและใบหน้าแบบฉับพลัน

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาปัญหาของการสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติจากภาพโดยทั่วไป และวิเคราะห์วิธีการที่งานวิจัยต่าง ๆ นำเสนอมาจนถึงปัจจุบัน

2. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล แบบจำลองใบหน้าสามมิติ วิธีการตรวจหาใบหน้าและการสร้างแบบจำลองใบหน้าสามมิติ
3. เก็บข้อมูลชุดภาพสำหรับใช้ในงานวิจัย
4. ออกแบบขั้นตอนวิธีและทดลองวัดประสิทธิภาพ พร้อมกับปรับปรุงวิธีการให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย
6. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ขั้นตอนวิธีสังเคราะห์แบบจำลองใบหน้าจากการเก็บข้อมูลรูปร่างของใบหน้าที่ได้รับเข้าทางกล้องเว็บแคมหนึ่งตัวได้ ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน
2. ได้วิธีการตรวจหาใบหน้าจากภาพโดยใช้แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ซึ่งมีอัตราการตรวจหาใบหน้าแม่นยำสูงแม้จะทำการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อน
3. สามารถใช้กล้องเว็บแคมตัวเดียวในการติดตามและสกัดท่าทางและรูปร่างของใบหน้าในปริภูมิสามมิติได้โดยใช้การประมวลผลที่ไม่ซับซ้อนเนื่องจากการส่งผ่านจุดพีเจอร์สองมิติไปสู่แบบจำลองสามมิติสามารถทำได้สะดวกกว่าการคำนวณพื้นผิวใบหน้าทั้งหมด
4. ข้อมูลสามมิติของใบหน้าที่ได้จากกระบวนการในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในด้านการระบุตัวบุคคลโดยใช้ข้อมูลใบหน้าสามมิติภายใต้กล้องความละเอียดต่ำ เกมสามมิติ และด้านอื่น ๆ ต่อไป

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ส่วนบทนำและส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อธิบายในบทที่ 1
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อธิบายในบทที่ 2
3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและวิธีการทดสอบ อธิบายในบทที่ 3
4. ผลการทดลองและสรุปผล อธิบายในบทที่ 4
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ อธิบายในบทที่ 5

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 รวบรวมหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับดำเนินการวิจัยนี้อันประกอบด้วย การปรับเทียบกล้องและการแก้ไขความผิดเพี้ยนของภาพจากคุณสมบัติของกล้องแบบจำลองสีผิวและการตรวจหาบริเวณใบหน้า การประมาณรูปร่างวัตถุจากภาพ ทศนะ คอมพิวเตอร์ การปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติ และการส่งผ่านพื้นผิวสู่แบบจำลองสามมิติ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การปรับเทียบกล้องและแก้ไขความผิดเพี้ยนจากคุณสมบัติกล้อง

ในระบบที่ต้องการความถูกต้องของรูปร่างวัตถุจากภาพที่ถ่ายได้จากกล้องนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับเทียบกล้อง (Camera Calibration) เสียก่อน เพื่อแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนทางรูปร่างวัตถุในภาพอันเนื่องมาจากคุณสมบัติเลนส์ของกล้อง [24] ซึ่งในปัจจุบันแบบจำลองของกล้องที่ใช้กันโดยทั่วไปเป็นไปตามสมการ (2.1)

$$m = PM = K[R|t]M \quad (2.1)$$

เมื่อ	m	แทน พิกัดสองมิติในภาพที่ถ่ายจากกล้อง
	M	แทน พิกัดจริงในปริภูมิสามมิติ
	K	แทน เมทริกซ์ค่า intrinsic ของกล้อง (3×3)
	R	แทน เมทริกซ์ค่าการหมุนของกล้อง (3×3)
	t	แทน เวกเตอร์ค่าการเลื่อนของกล้อง มีขนาดมิติเท่ากับ 3

ค่าของเมทริกซ์ intrinsic K เมทริกซ์การหมุน R และการเลื่อนที่ t เป็นคุณสมบัติกายภาพเฉพาะตัวของแต่ละกล้องซึ่งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนทางรูปร่างของภาพที่รับได้ ดังนั้นจึงได้ใช้คุณสมบัติดังกล่าวที่ได้จากการปรับเทียบกล้องมาแก้ไขภาพเสียก่อน

ในส่วนการแก้ไขความผิดเพี้ยนของภาพเนื่องจากคุณสมบัติของกล้องใช้วิธีชดเชยจากคุณสมบัติ Intrinsic และ Extrinsic ของกล้องที่ได้จากขั้นตอนการปรับเทียบ ดังนั้นจะได้ค่าของตำแหน่งจุดใหม่จากการชดเชยความผิดเพี้ยนดังสมการ (2.2)

$$\dot{m} = [\dot{R}|-t]K^{-1}m \quad (2.2)$$

เมื่อ	m	แทน พิกัดสองมิติจากภาพที่ถ่ายจากกล้อง
	\dot{m}	แทน พิกัดสองมิติจริงหลังจากการแก้ไขความผิดเพี้ยน
	K	แทน เมทริกซ์ค่า intrinsic ของกล้อง (3×3)
	R	แทน เมทริกซ์แก้ไขการหมุนเนื่องจากเลนส์กล้อง (3×3)
	t	แทน เวกเตอร์ค่าการเลื่อนของกล้อง มีขนาดมิติเท่ากับ 3

โดยที่

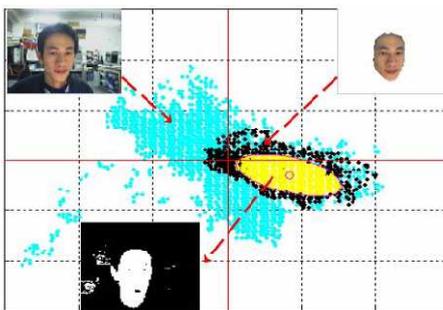
$$\dot{R} = R_z(-\theta)R_y(-\varphi)R_x(-\psi) \quad (2.3)$$

เมื่อ	ψ, φ, θ	แทน มุมการหมุนตามแกน x, y , และ z ตามลำดับ
-------	-------------------------	--

2.2 แบบจำลองสีผิวและการตรวจหาใบหน้าจากภาพ

แบบจำลองสีผิว [5][16][25][28][29][30] เป็นวิธีแทนรูปแบบการกระจายตัวของสีผิวในปริภูมิสี เช่น RGB, YCbCr, HSV, หรือ TSL โดยแบบจำลองประกอบด้วยค่าสีผิวทั้งหมดที่เลือกมาจากตัวอย่างภาพสีผิวมนุษย์จำนวนมากภายใต้สภาพแวดล้อมที่หลากหลาย โดยวิธีการสอนแบบจำลองใช้ตัวอย่างบวกร (สีผิว) เพียงอย่างเดียว เมื่อข้อมูลสีผิวถูกคัดเลือกเพื่อสอนให้กับแบบจำลองมากพอ จะได้ว่าการกระจายตัวของสีผิวในปริภูมิต่าง ๆ จะเข้าสู่รูปแบบเฉพาะตัวซึ่งแตกต่างกันออกไปตามชนิดของปริภูมิสีที่เลือกใช้

การนำแบบจำลองสีผิวไปใช้วิเคราะห์ว่าจุดสีที่สนใจเป็นสีผิวหรือไม่ทำได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยของ Y. P. Lin และคณะ [16] ได้ใช้แบบจำลองในปริภูมิสี YCbCr ที่ประมาณรูปแบบการกระจายของสีผิวในปริภูมิเป็นวงรี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ขั้นตอนการตัดสินใจจุดสีใดๆ จะทดลองแต่จุดสีดังกล่าวลงบนปริภูมิสีของแบบจำลองสีผิว หากจุดดังกล่าวแต่มีอยู่ในวงรีที่ประมาณไว้พอดีก็จะพิจารณาให้เป็นสีผิว แต่ถ้าจุดดังกล่าวแต่มีอยู่นอกวงรีจะพิจารณาว่าไม่ใช่สีผิว



รูปที่ 2.1 แบบจำลองสีผิวแบบประมาณด้วยวงรีบนปริภูมิ Cr-Cb [16]

$$skin(x, y) = \begin{cases} 1, & \frac{(Cr - Cx)^2}{A^2} + \frac{(Cb - Cy)^2}{B^2} \leq 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.4) เป็นวิธีการตัดสินใจว่าบริเวณสีผิวที่ตำแหน่ง x, y ใด ๆ จากภาพเป็นสีผิวหรือไม่ โดยคำนวณที่ค่าสีในรูปแบบ YCbCr โดยพิจารณาเพียงค่าสี Cb และสี Cr โดยจะทดสอบว่าจุดสีดังกล่าวเมื่อนำไปแต้มลงบนปริภูมิ Cr-Cb ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แล้ว ถ้าพิกัด (Cr, Cb) ดังกล่าวอยู่ในบริเวณวงรีที่มีขนาดของแกนเอกและแกนโทเป็น A, B ตามลำดับก็พิจารณาว่าสีนั้นเป็นสีผิว

2.2.1 ปริภูมิสี HSV

ปริภูมิสี HSV (Hue Saturation และ Value หรือ Brightness) [25] เป็นปริภูมิสีที่แทนแต่ละสีด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ รงค์ (Hue) ความอิ่มตัว (Saturation) และ ความส่องสว่าง (Value หรือ Brightness) โดยสามารถแปลงสีจากปริภูมิ RGB ไปเป็น TSL ได้ดังสมการ (2.5)-(2.7)

$$H = \begin{cases} \left(60 \times \frac{G - B}{range}\right) \bmod 360, & max = R \\ 60 \times \frac{B - R}{range} + 120, & max = G \\ 60 \times \frac{R - G}{range} + 240, & max = B \\ 0, & max = min \end{cases} \quad (2.5)$$

$$S = \begin{cases} 1 - \frac{min}{max}, & max \neq 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.6)$$

$$V = \max(R, G, B) \quad (2.7)$$

2.2.2 ปริภูมิสี TSL

ปริภูมิสี TSL (Tint Saturation และ Lightness) ถูกคิดค้นและนำเสนอโดย Jean-Christophe Terrillon และ Shigeru Akamatsu ใน ค.ศ. 2000 [25] มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้แทนสีผิวของมนุษย์โดยไม่ขึ้นกับความหลากหลายทางเชื้อชาติ แบบจำลองดังกล่าวมีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ สีต้น (Tint) ความอิ่มตัว (Saturation) และ ความส่องสว่าง (Lightness) โดยสามารถแปลงภาพในปริภูมิ RGB ไปเป็น TSL ได้ดังสมการ (2.8)-(2.10)

$$T = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \arctan\left(\frac{\acute{r}}{\acute{g}}\right) + \frac{1}{4} & , \acute{g} > 0 \\ \frac{1}{2\pi} \arctan\left(\frac{\acute{r}}{\acute{g}}\right) + \frac{3}{4} & , \acute{g} < 0 \\ 0 & , \acute{g} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$S = \sqrt{\frac{9}{5} \times (\acute{r}^2 + \acute{g}^2)} \quad (2.9)$$

$$L = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (2.10)$$

โดยที่

$$\acute{r} = \frac{R}{R+G+B} - \frac{1}{3}, \quad \acute{g} = \frac{G}{R+G+B} - \frac{1}{3}, \quad \acute{b} = \frac{B}{R+G+B} - \frac{1}{3}$$

เมื่อ R, G, B แทน ค่าความเข้มขององค์ประกอบสีแดง เขียว และ น้ำเงิน ในปริภูมิสี RGB จากภาพต้นฉบับ

2.3 การประมาณรูปร่างวัตถุในภาพ

การประมาณรูปร่างวัตถุ (Object Shape Approximation) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การปรับเหมาะรูปร่างวัตถุด้วยวงรี (Ellipse Fitting) และ การประมาณรูปร่างวัตถุด้วยรูปหลายเหลี่ยม (Polygon Approximation) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การประมาณรูปร่างวัตถุด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด

การหาฟังก์ชันวงกลมหรือวงรีที่ปรับเหมาะเข้ากับกลุ่มจุดในระนาบสองมิติด้วยการประมาณกำลังสองต่ำสุด (Least Square Ellipse Fitting) ถูกนำเสนอโดย Walter Gander และคณะ [26]

ใน ค.ศ. 1994 และได้รับการปรับปรุงวิธีการโดย Andrew Fitzgibbon และคณะ [27] ใน ค.ศ. 1999

ขั้นตอนวิธีเริ่มจากหาฟังก์ชันวงรีที่มีระยะทางเชิงพีชคณิต (Algebraic Distance) น้อยที่สุดระหว่างกลุ่มจุดข้อมูลและฟังก์ชันวงรีดังกล่าว โดยนิยามให้ฟังก์ชันวงรีนิยามทั่วไปดังสมการ (2.11)

$$F(x) = x^T A x + b^T x + c = 0 \quad (2.11)$$

เมื่อ $F(x)$ แทน ฟังก์ชันวงรีที่ปรับเหมาะจากกลุ่มจุดที่เขียนเป็นเวกเตอร์ x
 A, b, c แทน ค่าสัมประสิทธิ์ของวงรี
 x แทน เวกเตอร์แทนกลุ่มจุดข้อมูลจุดที่จะปรับเหมาะด้วยฟังก์ชันวงรี

ซึ่งการนำสมการวงรีดังกล่าวไปปรับเหมาะกับข้อมูลกลุ่มจุดในระนาบสองมิติที่เตรียมไว้จะทำให้ได้ว่าระยะทางเชิงพีชคณิตระหว่างสมการวงรีเพื่อปรับเหมาะและเวกเตอร์กลุ่มจุดข้อมูลเป็นดังสมการ (2.12)

$$D(B) = \sum_{i=1}^N F(x_i)^2 \quad (2.12)$$

เมื่อ $D(B)$ แทน ฟังก์ชันระยะทางเชิงพีชคณิต
 B แทน ชุดของสัมประสิทธิ์วงรี $\{A, b, c\}$

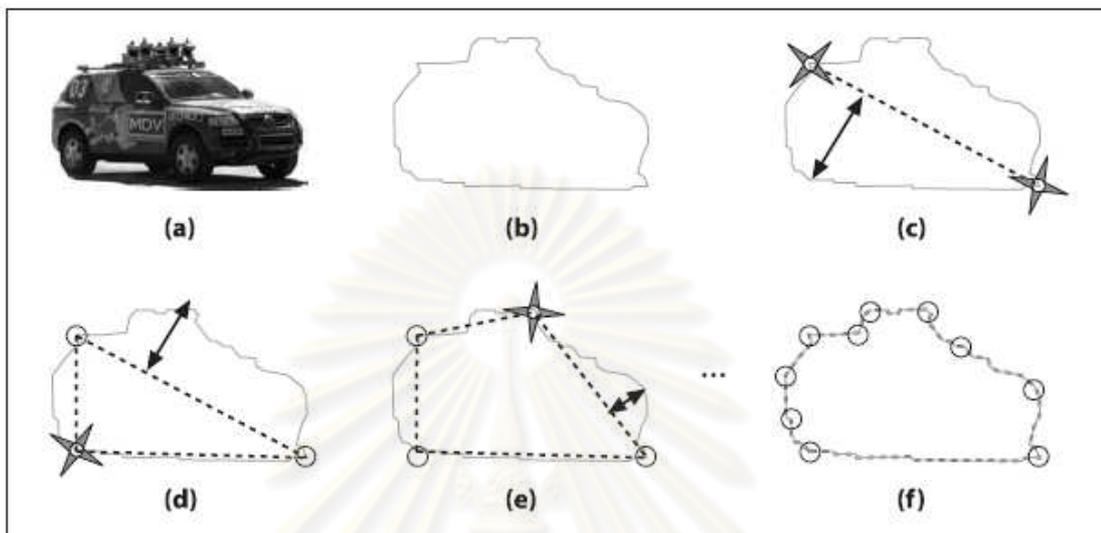
กระบวนการปรับเหมาะวงรีเข้ากับเวกเตอร์กลุ่มจุดข้อมูลเป็นการหาชุดของสัมประสิทธิ์ B_{fitted} ที่แทนค่าลงในสมการ 3.10 แล้วได้ค่าระยะทางเชิงพีชคณิตต่ำที่สุด นิยามได้ดังสมการ (2.13)

$$B_{fitted} = \operatorname{argmin}_B D(B) \quad (2.13)$$

2.3.2 การประมาณรูปวัตถุด้วยรูปหลายเหลี่ยม

วิธีการหนึ่งที่ใช้ประมาณรูปร่างวัตถุในภาพด้วยรูปหลายเหลี่ยมซึ่งมีจำนวนจุดมุมน้อยลงและมีค่าความผิดพลาดจากการประมาณต่ำที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์คือการประมาณด้วยรูปหลายเหลี่ยม (Polygon Approximation) คือ วิธีประมาณของ Douglas-Peucker [24] ซึ่งเป็นกระบวนการซ้ำรอบ กระบวนการเริ่มต้นจากเลือกคู่จุดมุมใดๆ ของรูปเส้น

ขอบของวัตถุแสดงใน (b) อันได้จากการประมวลผลภาพต้นฉบับ (a) ที่แยกจากกันห่างไกลที่สุด แสดงในรูป (c) และเพิ่มค่าระยะทางดังกล่าวลงในค่าตัวแปรระยะทางประมาณสะสม แล้ว คัดเลือกจุดถัดไปที่ให้ระยะทางแยกกันไกลที่สุดอีก (d,e,f) ทำเช่นนี้ซ้ำรอบ จนกว่าจะได้ระยะทาง ประมาณสะสมดังกล่าวที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลำดับการประมาณวัตถุด้วยรูปหลายเหลี่ยม [24]

2.4 ทักษะคอมพิวเตอร์

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการประมวลผลรูปร่าง เช่น การรู้จำ ตำแหน่งและขนาดรูปร่างวัตถุจากภาพรับเข้า ในทักษะคอมพิวเตอร์นั้นได้เริ่มใช้โดยมีจุดประสงค์ คือให้ทันทานต่อสิ่งรบกวนที่ปรากฏอยู่ในภาพ ซึ่งหลักการที่ใช้กันอยู่คืออาศัยแม่แบบที่ผู้ใช้สร้างขึ้นจากการสังเกตรูปร่างของวัตถุที่จะประมวลผลก่อน แล้วเปลี่ยนแปลงค่าตำแหน่งของจุดในรูป โดยอาศัยการกระจายเชิงสถิติอันได้มาจากการสอน ซึ่งแบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

2.4.1 แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์

แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ (Active Shape Model) [18][19][20] คือแบบจำลองทาง สถิติของการกระจายตัวของรูปร่างวัตถุ คิดค้นโดย Tim Cootes เพื่อใช้ในการปรับเหมาะเข้ากับรูป วัตถุในภาพ โดยการเรียนรู้รูปร่างของวัตถุดังกล่าวจะใช้กลุ่มของจุดที่เลือกจากเส้นรอบรูปหรือ โครงร่างวัตถุนั้น ๆ เป็นตัวแทนแสดงลักษณะของวัตถุดังกล่าว เรียกว่า รูปร่างวัตถุ (Shape) โดยที่ ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดเองจากในรูป (Manually Annotate) หลาย ๆ รูป โดยผู้ใช้ต้องกำหนดรูปร่างของ

วัตถุประสงค์ต้องการแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์เรียวอย่างชัดเจน ไม่แปรเปลี่ยนรูปร่างหลากหลายเกินไป ตำแหน่งของจุดต่าง ๆ ในรูปร่างต้องกำหนดแน่ชัด และมีปรากฏครบถ้วนอยู่ในทุกรูปที่นำมาสอน โดยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ แบบจำลองรูปร่าง (Shape Model) และ แบบจำลองภาพฉาย (Profile Model)

2.4.1.1 แบบจำลองรูปร่าง

นิยามของรูปร่างเฉลี่ย \bar{X} ที่ได้จากชุดข้อมูลสอนอันประกอบด้วยกลุ่มจุดอ้างอิงซึ่งใช้เป็นโครงสร้างของรูปร่างที่ต้องการจำนวน N จุด (ได้เป็นเวกเตอร์แทนรูปร่าง X ขนาด N มิติ) เป็นดังสมการ (2.14)

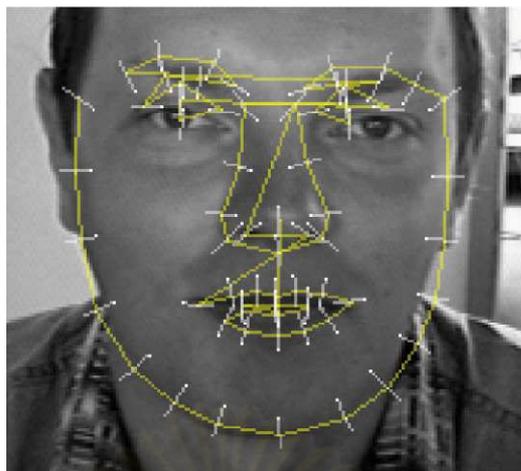
$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.14)$$

โดยที่รูปร่างเฉลี่ย (Mean Shape) จะยึดถือเป็นศูนย์กลางของรูปร่างในโดเมนรูปร่าง (Shape Domain) และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เรียนรู้ไม่เกินค่าการกระจายทางสถิติค่าหนึ่ง ๆ นิยามดังสมการ (2.15)

$$\hat{X} = \bar{X} + \Phi b \quad (2.15)$$

เมื่อ \hat{X} แทน เวกเตอร์รูปร่างผลลัพธ์ภายใต้เงื่อนไขดังสมการ
 \bar{X} แทน เวกเตอร์รูปร่างเฉลี่ย
 Φ แทน เมทริกซ์ของค่าไอเกนที่เลือกจากเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Covariance Matrix) จากชุดข้อมูลสอน
 b แทน ค่าสเกลาร์สำหรับปรับค่าการกระจายตัวของแบบจำลอง

จากสมการ เวกเตอร์รูปร่างผลลัพธ์จากสมการ \hat{X} จะกระจายตัวรอบ ๆ เวกเตอร์รูปร่างเฉลี่ยภายใต้ขอบเขตไม่เกินค่าการกระจายค่าหนึ่ง ๆ ที่ได้จากขั้นตอนการสอน ทำให้รูปร่างของวัตถุถูกจำกัดให้คงสภาพรูปร่างขึ้นกับการกระจายของข้อมูลรูปร่างสอนและมีความคงทนต่อสภาพสิ่งรบกวนจากในภาพได้ดี ซึ่งผู้ใช้สามารถปรับค่าสเกลาร์ b เพื่อปรับขอบเขตการกระจายของรูปร่างที่อนุญาต โดยความแปรปรวนต่ำจะให้รูปร่างที่ใกล้เคียงรูปร่างเฉลี่ยมากกว่า เกาะกลุ่มกันมากกว่า ในขณะที่ค่าแปรปรวนที่สูงขึ้นก็ทำให้รูปร่างเปลี่ยนแปลงได้มากขึ้น โดยลักษณะของแบบจำลองรูปร่างและค่าของการกระจายตัวของจุดพีเจอร์ที่มากที่สุดที่ยอมรับได้แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองรูปร่าง [20]

2.4.1.2 แบบจำลองภาพถ่าย

แบบจำลองภาพถ่ายเป็นแบบจำลองแสดงค่าของภาพถ่ายระดับเทาที่ขอบของแบบจำลองรูปร่างทั้งหมดเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างและลักษณะในภาพที่สอดคล้องกัน โดยงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองภาพถ่ายแบบสองมิติ โดยลักษณะของแบบจำลองภาพถ่ายแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองภาพถ่ายระดับเทา [20]

แบบจำลองภาพถ่ายมีกลไกใกล้เคียงกับแบบจำลองรูปร่าง กล่าวคือ แบบจำลองภาพถ่ายที่บันทึกสำหรับแต่ละขอบของรูปร่างจะเป็นแบบจำลองภาพถ่ายเฉลี่ย (Mean Profile Model) และค่าของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของภาพถ่ายระดับเทา ณ ขอบหนึ่ง ๆ ขอบแบบจำลองรูปร่าง

2.4.1.3 ข้อแตกต่างระหว่างแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์และแบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้อ้างอิงในหัวข้อก่อนหน้านั้น Fengsong และคณะเลือกใช้แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ ในขณะที่ Milborrow เลือกใช้แบบจำลองรูปร่างกัม

มันต์ ซึ่งในปี ค.ศ. 1999 T.Cootes (ผู้คิดค้นแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ และ แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์) ได้อธิบายข้อแตกต่างระหว่างแบบจำลองทั้งสองนี้ไว้ดังนี้ [19]

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างระหว่างแบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์ (AAM) และรูปร่างกัมมันต์ (ASM)

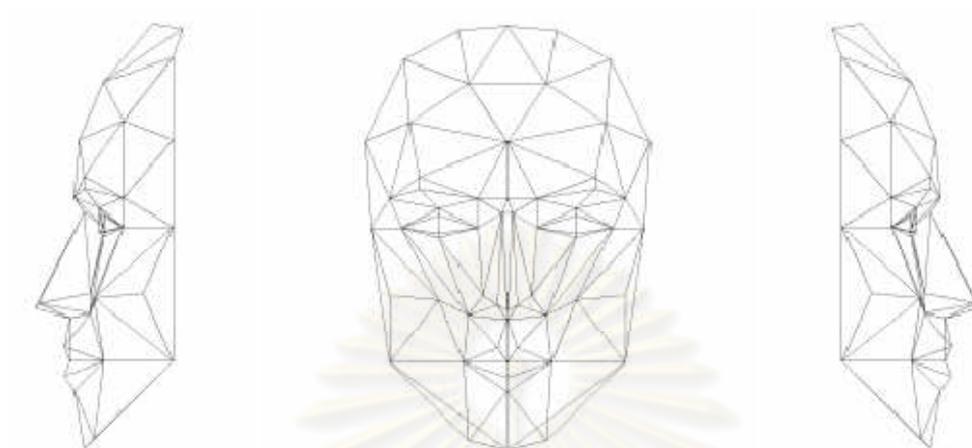
ประเด็น	AAM	ASM
1. การใช้คุณสมบัติสำหรับแทนตำแหน่งจุด	ใช้ทั้งพื้นผิวของบริเวณรอบจุดภายใน Convex Hull	วิเคราะห์ที่พื้นผิว ณ จุดที่สนใจ
2. การปรับเหมาะภาพ	เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่สังเคราะห์กับภาพต้นฉบับ	หาค่าต่ำสุดของระยะระหว่างจุดภาพจริงและแบบจำลอง
3. การค้นหาตำแหน่งจุด	สุ่มตัวอย่างจากบริเวณรอบจุดสนใจ	รอบจุดสนใจตั้งฉากกับเส้นขอบ
4. แบบจำลองย่อย	แบบจำลองสภาพปรากฏ + แบบจำลองพื้นผิว	แบบจำลองโปรไฟล์ + แบบจำลองรูปร่าง

จาก [19] T.Cootes ยังได้เสนอแนะเพิ่มเติมว่าแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ให้ความเร็วของการประมวลผลที่สูงกว่าเนื่องจากไม่ได้วิเคราะห์รายละเอียดของพื้นผิวแต่จะวิเคราะห์เพียงลักษณะระดับสีของเส้นทางระหว่างจุดคู่หนึ่ง ๆ ในแบบจำลองเท่านั้น ในขณะที่แบบจำลองสภาพปรากฏกัมมันต์จะเปรียบเทียบและส่งผ่านพื้นผิวได้ดีกว่าเนื่องจากถูกออกแบบมาเพื่อการนี้โดยเฉพาะ

2.4.2 แบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE

แบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อว่า CANDIDE [11] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ควบคุมการแสดงท่าทางในสามมิติด้วยพารามิเตอร์ที่ประกอบด้วย ตัวแปรควบคุมการหมุนในปริภูมิสามมิติ ตัวแปรควบคุมการเลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติ ตัวแปรควบคุมการขยายขนาดในปริภูมิสามมิติ เรียกตัวแปรทั้งสามรวมกันว่า หน่วยกระทำรวม (Global Action Units) และมีหน่วยกระทำเฉพาะจุด (Local Action Units) สำหรับควบคุมการรูปร่างของแบบจำลองซึ่งเป็นการแสดงรายละเอียดปลีกย่อยในส่วนต่าง ๆ

แบบจำลองใบหน้า CANDIDE มีลักษณะในมุมมองหน้าตรง และด้านข้างทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองใบหน้า CANDIDE ในมุมมองหน้าตรงและด้านข้าง

การควบคุมแบบจำลอง CANDIDE ด้วยตัวแปรท่าทางและหน่วยกระทำเป็นดังสมการ (2.16)

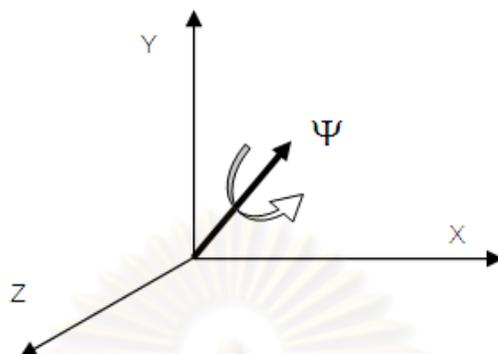
$$p = SR(\check{p} + \alpha A) + T \quad (2.16)$$

เมื่อ	p	แทน เวกเตอร์ของจุดพิกัดสามมิติในแบบจำลองผลลัพธ์
	\check{p}	แทน เวกเตอร์ของจุดพิกัดสามมิติในแบบจำลองตั้งต้น
	S	แทน เมทริกซ์การขยายขนาดในสามมิติ
	T	แทน เมทริกซ์การเลื่อนที่ในสามมิติ
	R	แทน เมทริกซ์การหมุนในสามมิติรอบแกนที่กำหนดแกนหนึ่ง ๆ
	A	แทน เวกเตอร์หน่วยกระทำต่อรูปร่าง
	α	แทน ขนาดของแรงกระทำต่อรูปร่าง

พิกัดในระบบ CANDIDE จะมีจุดกำเนิด $(0, 0, 0)$ ที่กึ่งกลางจมูกของแบบจำลอง แกนฉากของระบบพิกัดเป็น (x, y, z) ตามกฎมือขวา ในขณะที่เมทริกซ์การขยายขนาดในสามมิติมีโครงสร้างดังสมการ (2.17)

$$S = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

และเมทริกซ์การหมุนในสามมิติรอบแกน $\psi = [u \ v \ w]^T$ ขนาดหนึ่งหน่วย (ทิศการหมุนเป็นไปตามตามกฎมือขวา) ด้วยมุมขนาด δ ที่กำหนดมีรูปแบบดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แกนหมุนในปริภูมิสามมิติของแบบจำลองใบหน้า

โดยที่สามารถเขียนเมทริกซ์การหมุนได้เป็นดังสมการ (2.18)

$$R = [R_1 \ R_2 \ R_3] \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 + (1 - \cos\delta)(u^2 - 1) \\ w\sin\delta + (1 - \cos\delta)uv \\ -v\sin\delta + (1 - \cos\delta)uw \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} -w\sin\delta + (1 - \cos\delta)uv \\ 1 + (1 - \cos\delta)(v^2 - 1) \\ u\sin\delta + (1 - \cos\delta)vw \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} v\sin\delta + (1 - \cos\delta)uw \\ -u\sin\delta + (1 - \cos\delta)vw \\ 1 + (1 - \cos\delta)(w^2 - 1) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

เมื่อแทนแกนหมุนด้วยเวกเตอร์ในปริภูมิทรงกลมที่มีขนาดรัศมีเป็นหนึ่งหน่วยแล้ว จะเขียนได้ดังสมการ (2.22)

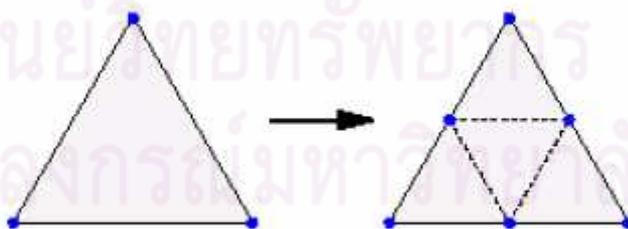
$$\psi = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \cos\phi \sin\theta \\ \sin\phi \sin\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

นั่นคือตัวแปรควบคุมการหมุนจะมี 3 ตัวได้แก่ ϕ, θ, δ ซึ่งเมื่อแทนค่าแกนหมุนลงในสมการข้างต้นจะทำให้การนำไปใช้คำนวณการปรับตัวแปรที่ละเอียดน้อยสำหรับการปรับเหมาะแบบจำลองในภายหลังทำได้สะดวกขึ้น โดยผลกระทบของหน่วยกระทำแต่ละลำดับต่อบริเวณต่างๆ บนแบบจำลองใบหน้าแตกต่างกันออกไป

2.4.3 การซับดิวิชันแบบจำลองใบหน้าสามมิติ

เนื่องจากแบบจำลอง CANDIDE แบบดั้งเดิมมีความละเอียดไม่เพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองใบหน้าบุคคล กล่าวคือ ยังไม่สามารถแสดงรายละเอียดของโครงสร้างใบหน้าได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความละเอียดของแบบจำลองด้วยการซับดิวิชัน (Subdivision) เพื่อให้แบบจำลองสามมิติมีความโค้งเข้ากับใบหน้ายิ่งขึ้น เนื่องจากแบบจำลองสามมิติประกอบด้วยสามเหลี่ยมย่อย ๆ แต่ละด้านของสามเหลี่ยมเป็นเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดมุม ดังนั้นการซับดิวิชันเพื่อเพิ่มจำนวนจุดมุมและทำให้มีสามเหลี่ยมเพิ่มมากขึ้นทำให้ความเหลี่ยมของแบบจำลองที่ได้ลดลง นั่นคือตำแหน่งของจุดใหม่ที่เพิ่มเข้าไปบนแบบจำลองจะวางในตำแหน่งที่ทำให้เกิดความโค้งมากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้การซับดิวิชันด้วยวิธี Triangular Subdivision [31]

เนื่องจากแบบจำลองใบหน้าสามมิติประกอบขึ้นจากโครงข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh) ดังนั้นวิธีการหนึ่งสำหรับการซับดิวิชันแบบจำลองชนิดนี้คือการ Triangular Subdivision ซึ่งเป็นวิธีแบ่งแผ่นสามเหลี่ยมหนึ่งชิ้นออกเป็นสี่ชิ้น ได้จุดมุมเพิ่มขึ้นมา 3 จุด แต่ละจุดวางอยู่ในแนวของด้านสามเหลี่ยมชิ้นเดิม แต่จะเคลื่อนตำแหน่งของจุดใหม่เหล่านี้เพื่อให้อัปกับความโค้งของแบบจำลอง ลักษณะของการแบ่งสามเหลี่ยมเป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สามเหลี่ยมที่ผ่านการซับดิวิชันด้วยวิธี Triangular Subdivision

กระบวนการแบ่งสามเหลี่ยมจะกระทำต่อหน้าสามเหลี่ยมทุกชิ้นบนแบบจำลองสามมิติ แต่ละชิ้นจะแบ่งออกเป็นสามเหลี่ยมย่อย 3 ชิ้นขนาดเท่ากันดังรูป ผลลัพธ์จากกระบวนการเพิ่มจุดใหม่จะทำให้ทุก ๆ จุดมุมใหม่ที่เพิ่มเข้ามาในแบบจำลองจะมีจุดบริวารล้อมรอบตัวมันเอง 6

จุดในเกือบทุก ๆ ตำแหน่งของแบบจำลอง แต่บริเวณขอบของแบบจำลอง CANDIDE จะได้จุดบริวาร 4 จุด

แต่ละจุดมุมใหม่ที่เพิ่มเข้ามาจะถูกเคลื่อนย้ายตำแหน่งเพื่อให้แบบจำลองใบหน้ามีความโค้งของผิวหนังมากขึ้นโดยการเฉลี่ยกับจุดบริวาร (Vellence) รอบ ๆ ตัวเอง โดยมีนิยามตำแหน่งใหม่ของจุดมุมจากการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักดังสมการ (2.23)

$$v = 0.4 \times \left(\sum \frac{3}{8} v_i + \frac{1}{4} v \right) \quad (2.23)$$

เมื่อ	v	แทน ตำแหน่งจุดมุมที่เพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง
	v_i	แทน ตำแหน่งจุดบริวารรอบ ๆ จุดมุม v
	v	แทน ตำแหน่งจุดมุม v หลังการเคลื่อนย้าย

โดยในทางปฏิบัติ แบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE เดิมจะมีลำดับของจุดมุมสามมิติ และ ลำดับของหน้าสามเหลี่ยมที่กำหนดไว้แล้ว ดังนั้นการซัปดิวิชันแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE จะดำเนินการเริ่มต้นจากสามเหลี่ยมหน้าลำดับที่ 0 ตามลำดับไปจนถึงหน้าสามเหลี่ยมลำดับสุดท้ายของแบบจำลอง โดยจุดมุมที่เพิ่มขึ้นมาใหม่สำหรับแต่ละหน้าสามเหลี่ยมจะนับต่อจากลำดับจุดมุมสามมิติในแบบจำลองที่มีอยู่ตามลำดับ

ตัวอย่างเช่น สำหรับหน้าสามเหลี่ยมลำดับที่ k ของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE ซึ่งประกอบด้วยจุดมุมเดิมตามลำดับได้แก่ $k1, k2, k3$ ตามลำดับแล้ว การซัปดิวิชันโดยแบ่งด้านจะเริ่มจากด้าน $k1:k2$ ได้จุดมุมใหม่เป็น $n1$ จากนั้นแบ่งด้าน $k2:k3$ ได้จุดมุมใหม่เป็น $n2$ และแบ่งด้าน $k3:k1$ ได้จุดมุมใหม่เป็น $n3$ ตามลำดับ และแต่ละจุดที่เพิ่มขึ้นมาใหม่นั้นจะนับต่อจากลำดับจุดมุมที่มีอยู่เดิม หากเดิมมีจุดมุมอยู่ N จุด จะได้ว่าลำดับของจุด $n1 = N + 1$ ลำดับของจุด $n2 = N + 2$ และลำดับของจุด $n3 = N + 3$ เช่นเดียวกับหน้าสามเหลี่ยมอื่น ๆ ที่ถูกแบ่งตามลำดับ

2.5 การปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติ

การปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติเป็นกระบวนการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้แบบจำลองสามมิติมีรูปร่างและท่าทางใกล้เคียงกับข้อมูลรูปร่างที่สกัดได้จากภาพมากที่สุด กล่าวคือ มีค่าความผิดพลาดระหว่างจุดมุมของแบบจำลองใบหน้าสามมิติและชุดจุดพีเจอร์ต่ำที่สุด โดยค่าความผิดพลาดนิยามดังสมการ (2.24)

$$E(P, P_0) = \frac{1}{\sum w_i} \times \sum w_i \mathcal{E}(\vec{p}_i, \vec{p}_{0i}) \quad (2.24)$$

เมื่อ P แทน เมทริกซ์ที่แต่ละสดมภ์แทนเวกเตอร์พิกัดของจุดมุมของแบบจำลอง CANDIDE ดังรูปแบบ $P = [\vec{p}_0 \ \vec{p}_1 \ \dots \ \vec{p}_{K-1}]$
 P_0 แทน เมทริกซ์ที่แต่ละสดมภ์แทนเวกเตอร์พิกัดของจุดพีเจอร์ ดังรูปแบบ $P_0 = [\vec{p}_{00} \ \vec{p}_{01} \ \dots \ \vec{p}_{0(K-1)}]$
 w_i แทน ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับจุดลำดับที่ i
 $\mathcal{E}(\vec{a}, \vec{b})$ แทน ฟังก์ชันระยะทางแบบยูคลิเดียนระหว่างเวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b}
 \vec{p}_i แทน เวกเตอร์พิกัดของจุดมุมของแบบจำลอง CANDIDE ลำดับที่ i ดังรูปแบบ $\vec{p}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$
 \vec{p}_{0i} แทน เวกเตอร์พิกัดของจุดพีเจอร์บนใบหน้าลำดับที่ i ดังรูปแบบ $\vec{p}_{0i} = [x_{0i} \ y_{0i} \ z_{0i}]^T$

โดยมีฟังก์ชันระยะทางระหว่างจุดสองจุดแบบยูคลิเดียน นิยามดังสมการ (2.25)

$$\mathcal{E}(\vec{p}_A, \vec{p}_B) = \sqrt{(\vec{p}_A - \vec{p}_B)^T (\vec{p}_A - \vec{p}_B)} \quad (2.25)$$

โดยขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

2.5.1 ขั้นตอนวิธีปีนเขา

ขั้นตอนวิธีปีนเขา (Hill Climbing) [32] เป็นขั้นตอนวิธีปรับตัวแปรต่าง ๆ ซ้ำเป็นรอบจนกว่าจะค้นพบเป้าหมายตามต้องการ โดยจะใช้ฟังก์ชันฮิวริสติกแทนการประเมินความสัมฤทธิ์ผลของการค้นหาค่าตอบเสมือนกับการปีนเขาที่ต้องการระดับความสูงที่ปีนในแต่ละรอบสูงขึ้นอย่างเป็นลำดับขั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ตรงกับส่วนกลับของฟังก์ชันความผิดพลาดแทนด้วย $h = 1/E$ กล่าวคือต้องการค้นหาตัวแปรที่ปรับแบบจำลอง CANDIDE ที่ทำให้ได้จุดต่ำสุดของฟังก์ชันความผิดพลาดดังกล่าวนั่นเอง

โดยในแต่ละรอบจะทดลองปรับค่าตัวแปรของระบบ (แบบจำลอง CANDIDE) แล้วคำนวณค่าฟังก์ชันฮิวริสติก h สำหรับค่าตัวแปรแต่ละตัวนำมาเทียบกัน และในรอบนั้นจะเลือกใช้ตัวแปรที่ปรับแล้วให้ค่าฟังก์ชันลดลงมากที่สุด โดยรอบถัดไปก็ดำเนินการซ้ำ เลือกตัวแปรที่ปรับ

แล้วให้ค่าฟังก์ชัน h ลดลงมากที่สุด และหยุดประมวลผลหากค่าของฟังก์ชันไม่ลดลงอีกแล้ว หรือดำเนินการครบจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนด เป็นอันสรุปว่าค่าตัวแปรที่ป้อนแก่ระบบที่ทำให้ฟังก์ชันฮิวริสติกมีค่าต่ำสุดเป็นผลลัพธ์ตามต้องการ

2.5.2 ขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด

ขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด (Steepest Descent) [33] เป็นขั้นตอนวิธีปรับตัวแปรต่าง ๆ ซ้ำเป็นรอบจนกว่าจะได้แบบจำลองที่มีค่าผลรวมระยะทางผิดพลาดระหว่างจุดมุมและจุดพีเจอร์ E ต่ำที่สุดคล้ายกับขั้นตอนวิธีปีนเขา โดยแต่ละรอบจะปรับตัวแปรไปตามทิศทางการลดลงของค่าฟังก์ชัน E และปรับซ้ำรอบจนกว่าจะได้จุดที่ค่าฟังก์ชันความผิดพลาดไม่ลดลงอีกแล้ว หรือครบตามจำนวนรอบสูงสุดที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนด

สำหรับฟังก์ชัน $f(\vec{x})$ หนึ่ง ๆ จะสามารถหาทิศทางการเพิ่มขึ้นได้จากเวกเตอร์เกรเดียนท์ (Gradient Vector) ของฟังก์ชันนั้น ๆ นิยามได้ดังสมการ (2.26)

$$\nabla f(\vec{x}) = \left[\frac{\partial f}{\partial x_0} \quad \frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x_{N-1}} \right] \quad (2.26)$$

ทิศทางของเกรเดียนท์จะแสดงถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงตัวแปร \vec{x} ที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน $f(\vec{x})$ มีค่าสูงขึ้น แต่จุดประสงค์ของขั้นตอนวิธีนี้คือการปรับตัวแปรเพื่อลดค่าฟังก์ชันลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นทิศทางการค้นหาจุดต่ำสุดจึงตรงข้ามกับทิศทางเกรเดียนท์ นิยามได้ดังสมการ (2.27)

$$\vec{d} = -\nabla f(\vec{x}) = - \left[\frac{\partial f}{\partial x_0} \quad \frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x_{N-1}} \right] \quad (2.27)$$

ทิศทางการค้นหา \vec{d} จะแทนทิศทางการปรับตัวแปร \vec{x} ในแต่ละรอบการทำงานเพื่อลดค่าฟังก์ชัน $f(\vec{x})$ ลงโดยในมีขั้นตอนการค้นหาจุดต่ำสุดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ทิศทางการปรับตัวแปรในแต่ละรอบด้วยขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด

รอบการทำงาน	ค่าของฟังก์ชัน	ทิศทางการปรับตัวแปร
0 (เริ่มต้น)	$f(\vec{x})$	$\vec{d}_0 = -\nabla f(\vec{x})$
1	$f(\vec{x} + \vec{d}_0)$	$\vec{d}_1 = -\nabla f(\vec{x} + \vec{d}_0)$
2	$f(\vec{x} + \vec{d}_0 + \vec{d}_1)$	$\vec{d}_2 = -\nabla f(\vec{x} + \vec{d}_0 + \vec{d}_1)$

3	$f(\vec{x} + \vec{d}_0 + \vec{d}_1 + \vec{d}_2)$	$\vec{d}_3 = -\nabla f(\vec{x} + \vec{d}_0 + \vec{d}_1 + \vec{d}_2)$
$K - 1$	$f(\vec{x} + \vec{d}_0 + \vec{d}_1 + \dots + \vec{d}_{K-1})$	$\vec{d}_K = -\nabla f(\vec{x} + \vec{d}_0 + \vec{d}_1 + \dots + \vec{d}_{K-1})$

โดยแต่ละรอบการทำงาน ค่าของฟังก์ชันที่ทำการปรับค่าตัวแปรจะลดค่าลงจากรอบก่อนหน้าเสมอ และไม่ลดลงอีกเมื่อถึงตำแหน่งจุดต่ำสุดซึ่งถือเป็นการสิ้นสุดการค้นหา

2.5.3 ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) [34] เป็นขั้นตอนวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากกลไกการคัดเลือกโดยธรรมชาติ (Natural Selection) ในทางชีววิทยา โดยพิจารณากลไกการผลิตประชากรในแต่ละรุ่น การอยู่รอดต่อไปของประชากร (ยีน) แต่ละตัว โดยมีจุดประสงค์คือให้ประชากรที่แข็งแรงกว่าเท่านั้นที่อยู่รอด หากดัดแปลงกลไกดังกล่าวกับขั้นตอนการคัดเลือกชุดพารามิเตอร์สำหรับปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติ จะสามารถพิจารณาได้ว่าพารามิเตอร์แต่ละชุดทำหน้าที่เป็นประชากรในระบบ สามารถผลิตประชากร (พารามิเตอร์ชุดอื่น) ได้ โอกาสอยู่รอดของประชากรแต่ละตัวขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสม (Fitness) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าความเหมาะสมเป็นส่วนกลับของค่าความผิดพลาดจากการปรับเหมาะแบบจำลอง กล่าวคือ ชุดพารามิเตอร์ที่ทำให้แบบจำลองมีความผิดพลาดจากการปรับเหมาะต่ำกว่าจะมีค่าความเหมาะสมสูงกว่า และทำให้มีโอกาสอยู่รอดต่อไปในระบบสูงกว่า โดยลำดับกระบวนการของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมเป็นดังนี้

1. กำหนดชุดประชากร (ชุดพารามิเตอร์) $P = \{p_0, p_1, \dots, p_{K-1}\}$ เริ่มต้น
2. คำนวณค่าความเหมาะสม $f_i = \text{fitness}(p_i) = 1/E(p_i)$ ของประชากรทุกตัว
3. คำนวณโอกาสที่ประชากรจะอยู่รอด S_i ของประชากรแต่ละตัว โดยเรียงลำดับตามค่าความเหมาะสม ประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงสุดจะมีโอกาสรอด 100% และลดลงสำหรับประชากรที่มีค่าความเหมาะสมต่ำลง และมีโอกาสรอดเป็น 0% สำหรับประชากรที่มีค่าความเหมาะสมต่ำที่สุด
4. สุ่มเลือกค่า K ระหว่าง 0 และ 1 โดยประชากรที่มีโอกาสอยู่รอดต่ำกว่า K จะถูกลบออกจากรายการ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าสุ่มที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยที่ 0.5 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.25 เพื่อป้องกันไม่ให้ประชากรกลุ่มที่มีค่าความเหมาะสมสูงถูกลบออกไปมากเกินไป
5. จากชุดประชากรที่เหลืออยู่ในรายการจะนำมาผลิตประชากรชุดใหม่ (Reproduction) โดยให้โอกาสผลิตรุ่นลูกแก่ประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงมากกว่าประชากรที่มีค่าความเหมาะสมต่ำ โดยใช้วิธี

- i. การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ค่าใดค่าหนึ่งหรือมากกว่า
 - ii. การไขว้ข้าม (Cross-over) เป็นการจับคู่ยีน (พารามิเตอร์) เพื่อสลับค่าพารามิเตอร์โดยเลือกจุดไขว้แบบสุ่ม
6. ย้อนกลับไปดำเนินการขั้นตอนที่ (2) จนกว่าจะได้ประชากรที่ดีที่สุด คือ มีค่าความผิดพลาดต่ำที่สุดที่ระบบยอมรับ หรือ จำนวนรุ่นของประชากรถึงค่าที่กำหนดไว้ก่อนหน้า

โดยทั่วไปขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมมีลักษณะการทำงานคล้ายกับการค้นหาในปริภูมิพารามิเตอร์แบบบางส่วน เพื่อหาตัวแปรที่มีความเหมาะสมสูง (มีค่าความผิดพลาดจากการปรับเหมาะต่ำที่สุด) ในทางทฤษฎีกลุ่มประชากรจะมีความเหมาะสมที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ภูเขาค่าที่ดีที่สุดเมื่อกระบวนการดำเนินไป จึงเหมาะกับการใช้ค้นหาค่าตัวแปรที่ต้องการโดยเฉพาะในปริภูมิที่ไม่ทราบลักษณะการกระจายตัวของค่าที่เหมาะสมที่ต้องการ

2.6 การส่งผ่านพื้นผิว

การส่งผ่านพื้นผิว (Texture Mapping) [38] คือขั้นตอนการแปะค่าสีให้แก่แต่ละจุดบนพื้นผิวของแบบจำลองสามมิติที่เตรียมไว้เพื่อให้ชิ้นงานสามมิติมีลักษณะที่มองเห็นได้เหมือนจริงและมีความสมบูรณ์ เนื่องจากแบบจำลองเดิมจะแสดงเพียงรูปร่างเท่านั้น มิได้รวมเอาข้อมูลของค่าสีบนผิวหน้าเอาไว้ด้วย โดยตำแหน่งพิกัดของพื้นผิวและรูปทรงของแบบสามมิติต้องมีความสอดคล้องกันเพื่อให้การส่งผ่านพื้นผิวไม่เกิดความคลาดเคลื่อนซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความผิดพลาดไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เช่น พื้นผิวบริเวณดวงตาจะต้องแปะลงบนตำแหน่งรูปร่างดวงตาของแบบจำลองอย่างถูกต้อง

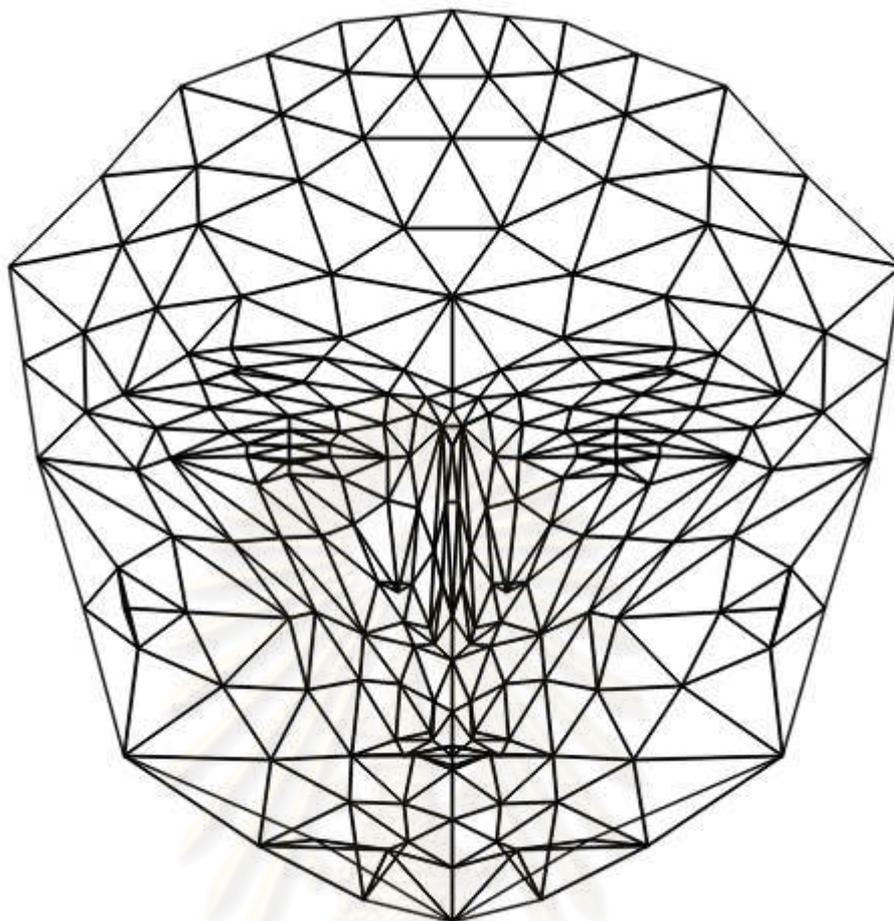
โดยพื้นฐานแล้วพื้นผิวคือภาพสองมิติแบนราบที่เก็บรายละเอียดบนพื้นผิวหน้าของแบบจำลองเอาไว้โดยครบถ้วน กล่าวคือ มีข้อมูลของระดับสีสันทันของบริเวณต่าง ๆ บนแบบจำลองทั่วทุกบริเวณผิวหน้าของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ โดยการอ้างอิงพิกัดของภาพพื้นผิวจะใช้แกนสองมิติ (u,v) มีจุดกำเนิดที่มุมซ้ายบน มีพิกัดมุมขวาล่างเป็น (1,1) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 พิกัดพื้นผิวในระบบ U-V

สำหรับงานวิจัยนี้ พื้นผิวที่ใช้จะอ้างอิงตำแหน่งจากจุดมุมของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE โดยนำแบบจำลองมาคลี่ออกบนระนาบสองมิติ เพื่อใช้สำหรับอ้างอิงตำแหน่งของพื้นผิวบนแบบจำลองกับพิกัดในระบบ U-V สำหรับการส่งผ่านพื้นผิว โดยแผนผังของพิกัดพื้นผิวสำหรับแบบจำลองใบหน้ามีลักษณะดังรูปที่ 2.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 พิกัดพื้นผิวของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ

จากรูปแสดงพิกัดพื้นผิวของแบบจำลอง CANDIDE ที่คลี่ออกบนระนาบสองมิติจะเห็นได้ว่าพื้นที่สำหรับเก็บพื้นผิวสำหรับแบบจำลองจะใช้เพียงบางส่วนของภาพพื้นผิวเท่านั้น โดยบริเวณพื้นที่ว่างภายนอกขอบเขตของแบบจำลองจะไม่ได้ใช้งาน โดยกระบวนการเก็บบันทึกค่าระดับสีของพื้นผิวในแต่ละบริเวณจะอธิบายในบทที่ 3 ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 การจำลองใบหน้าบุคคลแบบสามมิติ

บทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการจำลองใบหน้าบุคคลแบบสามมิติโดยละเอียด ซึ่งจากบทที่ 2 นั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติทำได้หลายวิธี ทั้งจากภาพเดี่ยว ภาพสองภาพที่ถ่ายพร้อมกันเลียนแบบการมองเห็นของดวงตามนุษย์ และจากภาพหลายภาพที่บันทึกต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการจำลองใบหน้าบุคคลจากภาพหลายภาพที่บันทึกต่อเนื่องด้วยกล้องเว็บแคมที่อยู่หนึ่งตลอดกระบวนการ ภายใต้สภาวะแสงคงที่ โดยบุคคลมีการหันใบหน้าเมื่อเลียนแบบลักษณะการถ่ายภาพใบหน้าบุคคลจากหลายมุมมอง นอกจากนี้วิธีการจำลองใบหน้าที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการปรับแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE ที่ดัดแปลงเพื่อให้เหมาะต่อการจำลองใบหน้าทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องพึ่งพากระบวนการหาระยะความลึกของใบหน้าจากภาพโดยตรงดังเช่นวิธีการในงานวิจัยอื่น

ชุดคำสั่งในงานวิจัยนี้เขียนขึ้นด้วยภาษา C++ ด้วยชุดเครื่องมือ Microsoft® Visual Studio 2005 โดยเพิ่มเติมชุดคำสั่ง OpenCV [40] สำหรับประมวลผลภาพและวิดิทัศน์ด้วยคำสั่งพื้นฐานซึ่งเป็นชุดรหัสโปรแกรมประเภทเปิด (Open source) ซึ่งแต่เดิมพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Intel โดยปัจจุบันเป็นรุ่น 2.00 แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดคำสั่งรุ่น 1.00 เท่านั้น เนื่องจากมีเสถียรภาพและความเร็วในการประมวลผลของคำสั่งที่จำเป็นค่อนข้างสูงกว่ารุ่นปัจจุบัน

นอกจากนี้ชุดคำสั่งอีกชุดที่ใช้สำหรับการติดต่อกับกล้องเว็บแคมและการขึ้นรูปสามมิติคือ Microsoft® DirectX [36] รุ่น 10.0 โดยเป็นชุดคำสั่งที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ได้โดยตรงและมีความเร็วสูง ทำให้การประมวลผลสามมิติสำหรับแสดงผลและการรับข้อมูลมีประสิทธิภาพสูงด้วย ปัจจุบันชุดคำสั่งนี้ยังมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานพัฒนาโปรแกรมด้านการประมวลผลสามมิติ เนื่องจากรหัสโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยชุดคำสั่งนี้สามารถทำงานกับอุปกรณ์ GPU (Graphic Processing Unit) และอุปกรณ์รับภาพได้ทุกประเภท

ขั้นตอนการดำเนินการในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่

1. ขั้นตอนการเก็บชุดภาพภาพใบหน้าบุคคล
2. ขั้นตอนการฝึกสอน (Training) และเตรียมข้อมูล
3. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเป็นกระบวนการอัตโนมัติ
4. ขั้นตอนการทดสอบ (Validation)

โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การเก็บชุดภาพใบหน้าบุคคล

ชุดภาพใบหน้าบุคคลที่ใช้เป็นข้อมูลรับเข้าในงานวิจัยนี้เป็นชุดภาพสี่ประเภท JPEG ขนาด 640×480 จุดภาพ ความลึกสี 8 บิต เป็นภาพต่อเนื่องในทางเวลาจำนวน 100-150 ภาพต่อหนึ่งบุคคล ซึ่งได้จากกล้องเว็บแคม (Web Camera) ที่ติดตั้งอยู่หนึ่งตลอดกระบวนการบันทึกภาพ ไม่มีการใช้งานปรับสภาพแสงขาวโดยอัตโนมัติ (White Balance) ภายใต้สภาวะแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่เหนือศีรษะของบุคคลที่นั่งอยู่หน้ากล้องรับภาพ โดยที่ข้อกำหนดของการบันทึกภาพบุคคลสำหรับใช้ในการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

1. ให้บุคคลนั่งนิ่งใบหน้ามองตรงให้สายตาคู่ในระดับใกล้เคียงกับรูรับภาพของกล้องเว็บแคมที่อยู่หนึ่ง รักษาระยะระหว่างใบหน้าและกล้องประมาณ 30 เซนติเมตร
2. ไม่มีการแสดงอารมณ์ และ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการแสดงอารมณ์บนใบหน้า
3. บุคคลหันหน้ารอบแกนตั้ง (ลำคอ) ระหว่างมุมไม่เกิน -45 ถึง +45 องศา
4. ตลอดกระบวนการไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแสงและสภาวะแวดล้อม
5. ไม่มีการเคลื่อนไหวของใบหน้าโดยฉับพลัน
6. กล้องเว็บแคมไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติใด ๆ ระหว่างกระบวนการบันทึกภาพ เช่น ตำแหน่ง มุมมอง ระยะโฟกัส เป็นต้น
7. ไม่มีวัตถุใด ๆ ปกปิดส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของใบหน้า
8. แสงจากหลอดไฟหรือสภาวะแวดล้อมเป็นสีขาวและไม่สว่างหรือมืดเกินไป จนทำให้ภาพที่บันทึกได้ไม่สามารถมองเห็นใบหน้าบุคคลได้อย่างชัดเจน
9. ในแต่ละภาพมีเพียงบุคคลเดียวปรากฏอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ข้างต้นเท่านั้น
10. ฉากหลังของบุคคลเป็นฉากสีเดียวที่ไม่มีลวดลายซับซ้อน ไม่เป็นกระจกสะท้อน ไม่มีแหล่งกำเนิดแสงภายในฉากหลัง และไม่มีเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บภาพข้อมูล

โดยภาพตัวอย่างจากชุดภาพใบหน้าที่บ้านที่ไว้สำหรับการทดลองเป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลำดับชุดภาพตัวอย่างจากฐานข้อมูลภาพใบหน้าบุคคล

นอกเหนือจากชุดภาพที่บันทึกเอง งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ชุดภาพใบหน้าจากฐานข้อมูล MIT-CBCL [39] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลใบหน้าที่บันทึกภายใต้สภาวะแสงที่ควบคุมให้คงที่โดยประกอบด้วยภาพที่บันทึกจากมุมมองระหว่าง -45 และ $+45$ องศา รวมทั้งใบหน้าตรงจากบุคคลจำนวน 10 คน ผลิตโดย Massachusetts Institute of Technology โดยมีภาพตัวอย่างจากฐานข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยจะรวมชุดภาพจากฐานข้อมูล MIT-CBCL ในชุดอนุกรมภาพสำหรับทดลองในงานวิจัยนี้ด้วย



รูปที่ 3.2 ภาพตัวอย่างจากฐานข้อมูลใบหน้า MIT-CBCL [39]

3.2 การฝึกสอนและเตรียมข้อมูล

ขั้นตอนการฝึกสอนและเตรียมข้อมูลเป็นกระบวนการที่กระทำให้เสร็จสิ้นก่อนขั้นตอนการสร้างใบหน้าสามมิติจริง ซึ่งประกอบไปด้วยการสอนแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่สำหรับใช้ตรวจหาบริเวณใบหน้าจากภาพ การสอนแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์สำหรับแทนจุดพีเจอร์บนใบหน้า และการเตรียมแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE โดยการเตรียมการทั้งหมดกระทำเพียงครั้งเดียวก่อนการนำไปใช้งานจริง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 การสอนแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่สำหรับตรวจหาบริเวณใบหน้า

แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ [37] สำหรับตรวจหาบริเวณใบหน้าในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นจากปริภูมิสี TSL ซึ่งสร้างจากชุดภาพใบหน้าสำหรับสอนจำนวน 200 ภาพ โดยสุ่มเลือกบริเวณสีผิวขนาด 5×5 จำนวนประมาณ 3-4 บริเวณจากแต่ละภาพ เพื่อนำไปสอนแบบจำลองโดยมีกระบวนการตามลำดับดังนี้

1. คำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบสี T และ S ของพื้นที่ขนาด 5×5 แต่ละชั้น
2. นำค่าเฉลี่ยไปพล็อตลงบนปริภูมิ T-S ขนาด 500×500 โดยแกนนอนแทนองค์ประกอบ S และแกนตั้งแทนองค์ประกอบ T
3. ถ้าที่พิกัด (T,S) บนปริภูมิเคยพล็อตค่าสีลงไปแล้ว จะเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่บันทึกไว้ที่ตำแหน่งดังกล่าว หากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่ที่กำลังใช้สอนแบบจำลองมีค่าสูงกว่าที่เคยบันทึกไว้ ก็จะบันทึกค่านั้นแทนที่ค่าที่เคยบันทึกเอาไว้

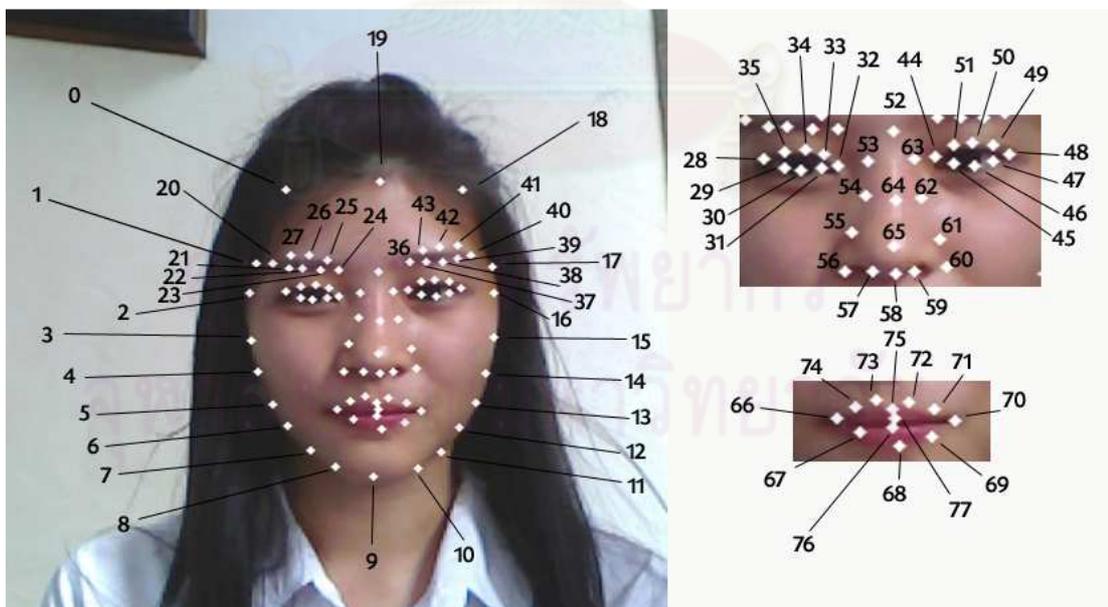
เมื่อกระบวนการสอนสิ้นสุดลงจะได้แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่สำหรับขนาด 5×5 โดยก่อนนำไปใช้งานจะขัดเกลาแบบจำลองเสียก่อน โดยลบจุดที่บันทึกบนแบบจำลองหากจุดนั้นมีการบันทึกไปเพียงครั้งเดียว เนื่องจากอาจเกิดจากสภาพรบกวนในภาพซึ่งในการนำไปใช้จริงอาจส่งผลเสียได้ ดังนั้นจุดพิกัดที่บันทึกไว้ในแบบจำลองจะเป็นจุดที่ได้รับการพล็อตซ้ำมากกว่าหนึ่งครั้งขึ้นไป โดยลักษณะของแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่แสดงดังรูปที่ 3.3 (บริเวณสีผิวที่เกาะกลุ่มกันอยู่กลางภาพแทนบริเวณสีผิวจากขั้นตอนการสอน)



รูปที่ 3.3 แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่

3.2.2 การสอนแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์สำหรับพีเจอร์บนใบหน้า

งานวิจัยนี้พยายามให้จุดพีเจอร์บนใบหน้ามีลำดับและตำแหน่งต่าง ๆ บนใบหน้าดังรูปที่ 3.4 และมีรายละเอียดของแต่ละจุดดังตารางที่ 3.1 โดยมีจำนวนจุดทั้งสิ้น 78 จุด ลำดับและตำแหน่งของจุดพีเจอร์กำหนดเอาไว้ตายตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ขึ้นกับลักษณะของใบหน้า เพื่อให้สามารถใช้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์เรียนรู้ตำแหน่งและโครงสร้างของชุดของจุดพีเจอร์ดังกล่าวจากภาพได้



รูปที่ 3.4 ลำดับและตำแหน่งจุดพีเจอร์สองมิติบนใบหน้า

ตารางที่ 3.1 ลำดับและตำแหน่งของจุดพีเจอรส์สองมิติบนใบหน้า

อันดับ	ตำแหน่งและรายละเอียด	อันดับ	ตำแหน่งและรายละเอียด
0	จุดมุมบนขวาสุดของขอบเขตใบหน้าติดกับไรผม	37,38,39	จุดแบ่งขอบคิ้วล่างออกเป็น 4 ส่วน
1	ขอบขวาของใบหน้าระดับเดียวกับคิ้วขวา	40	หางคิ้วซ้าย
2	ขอบขวาของใบหน้าระดับเดียวกับหางตาขวา	41,42,43	จุดแบ่งขอบคิ้วบนออกเป็น 4 ส่วน
3	ขอบขวาของใบหน้าระดับโหนกแก้ม	44	หัวตาซ้าย
4	ขอบขวาของใบหน้าระดับเดียวกับปลายจมูก	45,46,47	จุดแบ่งขอบตาซ้ายล่างออกเป็น 4 ส่วน
5	ขอบขวาของใบหน้าที่กึ่งกลางจุด 4,6	48	หางตาซ้าย
6	ขอบขวาของใบหน้าระดับเดียวกับมุมปาก	49,50,51	จุดแบ่งตาขอบซ้ายบนออกเป็น 4 ส่วน
7	ขอบขวาคางระหว่างจุด 6,8	52	จุดกึ่งกลางระหว่างคิ้วทั้งสอง
8	ขอบมุมขวาของคาง	53,63	จุดบนสุดสันจมูกขวาและซ้าย
9	ปลายคาง	54,62	จุดบนขอบจมูกสองข้าง
10	ขอบมุมซ้ายของคาง	55,61	มุมบนปีกจมูกทั้งสองข้าง
11	ขอบซ้ายของคางระหว่างจุด 10,12	56,60	มุมล่างปีกจมูก
12	ขอบซ้ายของใบหน้าระดับเดียวกับมุมปาก	57,59	กึ่งกลางรูจมูกด้านล่างทั้งสองข้าง
13	ขอบซ้ายของใบหน้าที่ระหว่างจุด 12,14	58	กึ่งกลางฐานจมูก
14	ขอบซ้ายของใบหน้าที่ระดับเดียวกับปลายจมูก	64	จุดบนสันจมูกระหว่างจุด 54,62
15	ขอบซ้ายของใบหน้าที่ระดับโหนกแก้ม	65	จุดปลายจมูก
16	ขอบซ้ายของใบหน้าที่ระดับเดียวกับหางตาซ้าย	66	มุมปากขวา
17	ขอบซ้ายของใบหน้าที่ระดับเดียวกับคิ้วซ้าย	67	กึ่งกลางริมฝีปากล่างซ้ายขวา

18	จุดมุมบนซ้ายสุดของขอบเขตใบหน้าติดกับไรม	68	กึ่งกลางริมฝีปากล่าง
19	จุดกึ่งกลางหน้าผาก	69	กึ่งกลางริมฝีปากล่างซีกซ้าย
20	ปลายคิ้วขวา	70	มุมปากซ้าย
21,22,23	จุดแบ่งคิ้วขวาด้านล่างออกเป็น 4 ส่วน	71	กึ่งกลางริมฝีปากบนซีกซ้าย
24	หัวคิ้วขวา	72	มุมริมฝีปากบนซ้าย
25,26,27	จุดแบ่งคิ้วขวาด้านบนออกเป็น 4 ส่วน	73	กึ่งกลางริมฝีปากบน
28	หางตาขวา	74	มุมริมฝีปากบนขวา
29,30,31	จุดแบ่งขอบตาขวาล่างออกเป็น 4 ส่วน	75	กึ่งกลางริมฝีปากบนซีกขวา
32	หัวตาขวา	76	กึ่งกลางริมฝีปากบน (ด้านติดกับริมฝีปากล่าง)
33,34,35	จุดแบ่งขอบตาขวาด้านบนออกเป็น 4 ส่วน	77	กึ่งกลางริมฝีปากล่าง (ด้านติดกับริมฝีปากบน)
36	หัวคิ้วซ้าย	--	--

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ (Active Shape Model) ซึ่งเสนอโดย Tim Cootes และคณะ ดังรายละเอียดในบท 2.4.1 เพื่อเรียนรู้ลักษณะของรูปร่าง (Shape) ของใบหน้าซึ่งประกอบด้วยชุดของจุดพีเจอร์บนใบหน้าตามลำดับและนิยามในตารางที่ 3.1 โดยชุดข้อมูลสอนประกอบด้วยภาพใบหน้าบุคคลจำนวน 40 รูปซึ่งประกอบด้วยใบหน้าตรง ใบหน้าหันรอบแกนตั้ง (ลำคอ) ไม่เกิน ± 45 องศา ที่ได้รับการกำหนดตำแหน่งของจุดพีเจอร์ด้วยมือก่อนแล้วดังรูปที่ 3.4 โดยใช้รหัสโปรแกรมสอนแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ของ Stephen Milborrow และคณะ [20]

กระบวนการเรียนรู้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์จากชุดข้อมูลสอนจะได้องค์ประกอบของแบบจำลอง 2 ส่วน ดังนี้

1. แบบจำลองรูปร่าง (Shape Model) และค่าความแปรปรวน
2. แบบจำลองภาพฉาย (Profile Model) สำหรับแต่ละจุดพีเจอร์

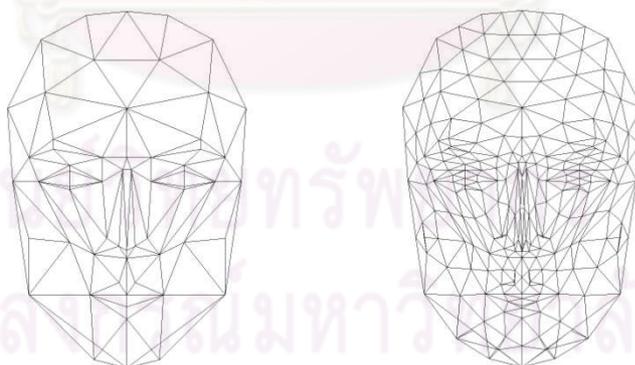
แบบจำลองรูปร่างเฉลี่ยจะแสดงถึงค่ากลางของพิกัดจุดพีเจอร์ตามนิยามจากชุดข้อมูลสอนโดยมีค่าความแปรปรวนแทนขีดจำกัดของการกระจัดที่ยอมรับได้สำหรับแต่ละจุดพีเจอร์ หากจุดพีเจอร์มีการกระจัดมากกว่าค่าที่กำหนดจะถือว่าไม่เป็นรูปร่างใบหน้าตามนิยาม กล่าวคือ

การเรียงตัวและการวางตำแหน่งของจุดพีเจอรที่ถือว่าเป็นใบหน้าจากภาพจะได้รับการเรียนรู้โดยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์

แบบจำลองภายใต้ฉายระดับเทาจะแทนลักษณะของขอบภาพที่ตำแหน่งจุดพีเจอรหนึ่ง ๆ วางอยู่บนภาพ ซึ่งแบบจำลองภายใต้ฉายเทาด้วยเวกเตอร์ของระดับภายใต้เทาในแกนตั้งฉากกับขอบของแบบจำลอง (เส้นด้านระหว่างจุดพีเจอรสองจุดใด ๆ) เป็นค่าเฉพาะสำหรับแต่ละจุดพีเจอร

3.2.3 การเตรียมแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE

แบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบจำลอง CANDIDE ดังรายละเอียดในบท 1.2.2.2 โดยนำมาผ่านกระบวนการซับดิวิชันแบบสามเหลี่ยม (Triangular Subdivision) เพื่อเพิ่มจำนวนจุดมุมและความโค้งมนของแบบจำลองให้มากขึ้น เนื่องจากแบบจำลองใบหน้าที่ดั้งเดิมมีจำนวนจุดมุมที่บริเวณขอบใบหน้าน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับจำนวนจุดพีเจอรสองมิติที่ได้นิยามไว้สำหรับเทียบคู่ตำแหน่งกัน ซึ่งผลลัพธ์จากการซับดิวิชันจะได้แบบจำลองใบหน้าสามมิติ หลังเสร็จสิ้นกระบวนการเพิ่มและย้ายตำแหน่งจุดมุมใหม่จะได้แบบจำลองสามมิติผลลัพธ์ที่มีความละเอียดและความโค้งมนมากขึ้น โดยจะมีจำนวนหน้าสามเหลี่ยมเพิ่มขึ้น 3 เท่า โดยแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE ที่ผ่านกระบวนการซับดิวิชันด้วยวิธี Triangular Subdivision จะมีความละเอียดสูงขึ้นเทียบกับแบบจำลองที่ไม่ได้ซับดิวิชันดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบแบบจำลอง CANDIDE ที่ซับดิวิชันกับต้นฉบับ

แบบจำลองผลลัพธ์จากการซับดิวิชันมีจุดมุมสามมิติทั้งสิ้น 249 จุด แต่คู่จุดเทียบกับจุดพีเจอรสองมิติที่ได้นิยามไว้จะมีทั้งสิ้น 78 คู่ รายละเอียดของแต่ละคู่จุดมุมสามมิติและจุดพีเจอรสองมิติแสดงในภาคผนวก ซึ่งแต่ละคู่จุดเลือกจากจุดมุมของแบบจำลองที่ฉายลงบนภาพแล้ว

ปรากฏอยู่บนขอบของภาพใบหน้าที่ชัดเจนเพียงพอต่อการค้นหา ทำให้จุดจำนวนมากที่อยู่ในบริเวณแก้ม หน้าผาก และส่วนอื่น ๆ บนใบหน้าที่ยากต่อการค้นหาจุดพีเจอร์ที่ตรงกันจึงไม่นำมาใช้พิจารณา

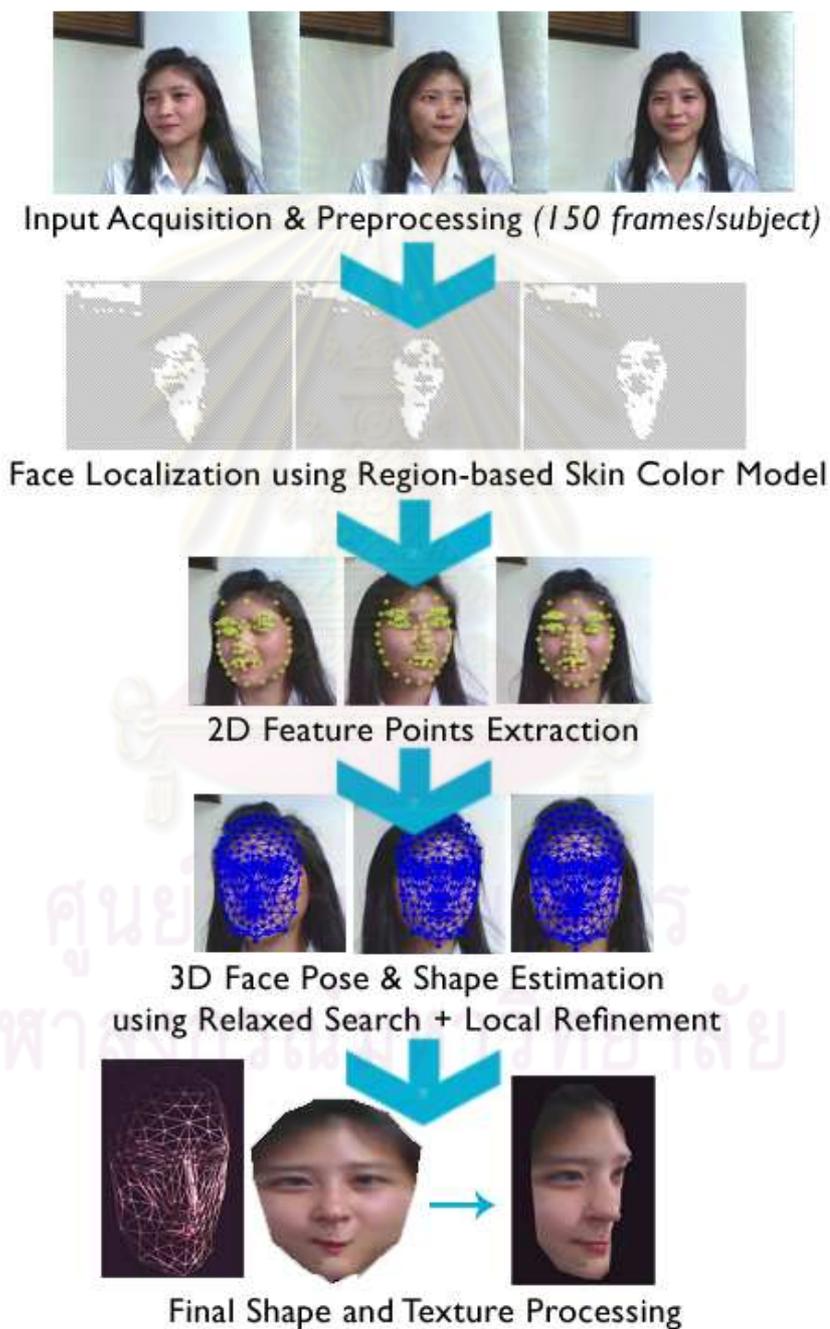
นอกจากนี้แบบจำลอง CANDIDE ที่ผ่านการซบติวิชันแล้วจะต้องเพิ่มหน่วยกระทำเข้าไปอีกเพื่อให้การควบคุมลักษณะของรูปร่างใบหน้ามีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากหน่วยกระทำที่มีอยู่แต่เดิมใช้สำหรับการแสดงท่าทางบนใบหน้า เช่น เปิดปิดดวงตา อ้าปาก เป็นต้น แต่ยังไม่มียูนิทกระทำสำหรับปรับปรุงรูปร่างเฉพาะ งานวิจัยนี้จึงแก้ไขและเพิ่มเติมหน่วยกระทำต่อแบบจำลองเป็นดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 หน่วยกระทำเฉพาะจุดของแบบจำลอง CANDIDE ที่แก้ไขและเพิ่มสำหรับงานวิจัยนี้

ลำดับ	หน่วยกระทำ	หมายเหตุ
0	ความสูงของศีรษะ	ไม่ส่งผลต่อตา จมูก และปาก
1	คิ้ว (ตำแหน่งในแนวตั้ง)	
2	ดวงตา (ตำแหน่งในแนวตั้ง)	
3	ดวงตา (ความกว้าง)	
4	ดวงตา (ความสูง)	
5	ระยะระหว่างดวงตา	
6	แก้ม (ตำแหน่งในแกน z)	ส่วนต่อขยายในแนวแกน z ของกระดูกแก้ม
7	จมูก (ส่วนต่อขยายในแกน z)	ส่วนต่อขยายในแนวแกน z ของจมูก
8	จมูก (ตำแหน่งในแนวตั้ง)	
9	จมูก (การเขยิบขึ้น)	ตำแหน่งในแนวแกนตั้งของสันจมูก
10	ปาก (ตำแหน่งในแนวตั้ง)	
11	ปาก (ความกว้าง)	
12	ความยาวคาง	
13	ความกว้างใบหน้า	ไม่ส่งผลต่อดวงตา จมูก และปาก
14	ความโค้งสันแก้ม	
15	ความสูงจมูก	
16	ความโค้งของคาง	

3.3 กระบวนการจำลองใบหน้าสามมิติบุคคล

กระบวนการจำลองใบหน้าบุคคลแบบสามมิติทั้งกระบวนการเป็นแบบอัตโนมัติโดยตลอดตั้งแต่ขั้นตอนการอ่านชุดภาพของบุคคล การคัดเลือกบริเวณใบหน้าและสกัดข้อมูลทางรูปร่างและพื้นผิวใบหน้าจากแต่ละภาพ จนถึงขั้นสุดท้ายที่กระบวนการรวมข้อมูลและประกอบขึ้นเป็นแบบจำลองสุดท้ายสำหรับนำไปแสดงผล โดยมีลำดับขั้นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติ

กระบวนการเริ่มจากบันทึกชุดภาพใบหน้าบุคคลหน้ากล้องเดียวที่อยู่นิ่งจำนวนประมาณ 150 ภาพ โดยแต่ละภาพจะได้รับการแก้ไขความผิดเพี้ยนจากคุณสมบัติกล้องในทันที ก่อนเก็บไว้ประมวลผล จากนั้นแต่ละภาพที่บันทึกจะนำมาเลือกบริเวณใบหน้าโดยใช้แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ จากนั้นแต่ละพื้นที่ใบหน้าทีเลือกในแต่ละภาพจะนำมาค้นหาจุดพีเจอร์สองมิติโดยใช้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ที่ได้ฝึกสอนเอาไว้แล้ว ก่อนจะปรับเหมาะด้วยแบบจำลองใบหน้าสามมิติ เมื่อประมวลผลครบทุกภาพแล้วจะนำข้อมูลที่ได้มาประกอบรวมเป็นแบบจำลองเดียวสำหรับบุคคลนั้น ๆ โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนเป็นดังต่อไปนี้

3.3.1 การเลือกบริเวณใบหน้า

ก่อนการประมวลผลจะมีการปรับสภาพของภาพรับเข้าให้เหมาะสมกับการประมวลผลต่อไปเสียก่อน โดยเริ่มจากการชดเชยความผิดพลาดของมิติภาพอันเนื่องจากคุณสมบัติของตัวกล้องรับภาพ เพื่อให้การสกัดข้อมูลทางรูปร่างของใบหน้ามีความถูกต้องยิ่งขึ้น

จากนั้นภาพที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจะนำมาคัดเลือกบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ [37] ซึ่งสร้างจากปริภูมิสี TSL โดยแต่ละจุด p บนปริภูมิสีผิวแทนค่าเฉลี่ยของบริเวณเฉพาะ และเก็บค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดที่ยอมรับได้ว่าจะยังทำให้ค่าสีเฉลี่ยดังกล่าวเป็นสีผิวนิยามดังสมการ (3.1)

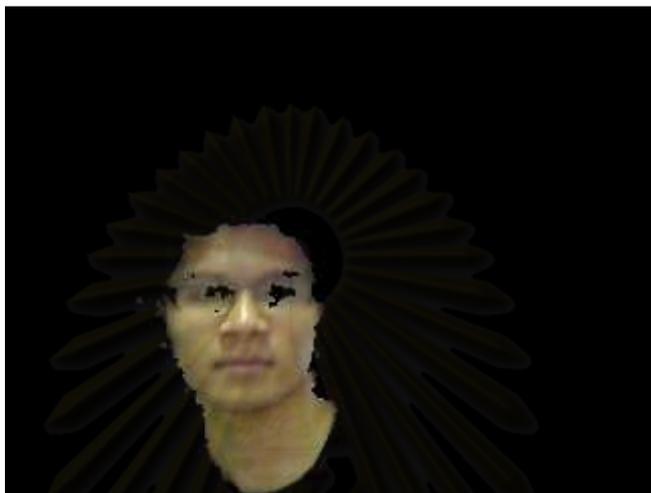
$$\vec{p}(\bar{t}, \bar{s}) \equiv \{\bar{t}, \bar{s}, \sigma_T, \sigma_S\} \quad (3.1)$$

เมื่อ	\bar{t}	แทน ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบสี T ของบริเวณเฉพาะ
	\bar{s}	แทน ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบสี S ของบริเวณเฉพาะ
	σ_T	แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดขององค์ประกอบสี T ของบริเวณเฉพาะ
	σ_S	แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดขององค์ประกอบสี S ของบริเวณเฉพาะ

การกรองบริเวณที่ไม่ใช่สีผิวออกจากภาพรับเข้าทำได้โดยตรวจสอบบริเวณเฉพาะทั่วทั้งภาพ โดยคำนวณค่าเฉลี่ย \bar{t} , \bar{s} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสีเฉลี่ย แล้วนำไปตรวจสอบกับแบบจำลองสีผิว หากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้สูงกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากแบบจำลองที่ตำแหน่งค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะถือว่าบริเวณเฉพาะนั้นไม่ใช่สีผิวและถูกกรองออกจากภาพ ฟังก์ชันการตัดสินใจสีผิวนิยามดังสมการ (3.2)

$$IsSkin(\bar{t}, \bar{s}, \sigma_T, \sigma_S) = \begin{cases} \text{TRUE}, & (\sigma_T \leq \sigma_T^{max}) \wedge (\sigma_S \leq \sigma_S^{max}) \\ \text{FALSE}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

- เมื่อ (\bar{t}, \bar{s}) แทน ค่าเฉลี่ยสีในองค์ประกอบ T และ S ของบริเวณเฉพาะที่สนใจ
 (σ_T, σ_S) แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบสี T และ S ของบริเวณที่สนใจ
 $\sigma_T(t, s)$ แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของ T ของแบบจำลองสีผิวที่พิกัด (t, s)
 $\sigma_S(t, s)$ แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของ S ของแบบจำลองสีผิวที่พิกัด (t, s)



รูปที่ 3.7 ภาพที่ผ่านกระบวนการกรองบริเวณที่ไม่ใช่สีผิวออก

ผลลัพธ์จากการกรองบริเวณที่ไม่ใช่สีผิวออกไปทั้งหมดจะเหลือกลุ่มของพื้นที่สีผิวในภาพจำนวนหนึ่งดังรูปที่ 3.7 ขึ้นอยู่กับข้อมูลในภาพรับเข้า โดยกลุ่มสีผิวเพียงกลุ่มเดียวเท่านั้นจะได้รับการคัดเลือกให้เป็นบริเวณใบหน้าสำหรับประมวลผลต่อไป โดยแต่ละกลุ่มสีผิวที่มีขนาดไม่เล็กหรือใหญ่เกินไปจะได้รับการประมาณรูปร่างขอบด้วยวงรี (Ellipse Fitting) แล้ววัดค่าความผิดพลาดจากการประมาณวงรี (Fitting Error) บริเวณสีผิวที่มีค่าความผิดพลาดจากการประมาณต่ำที่สุดจะได้รับการคัดเลือกให้เป็นบริเวณใบหน้าสำหรับกระบวนการสกัดข้อมูลรูปร่างต่อไป

3.3.2 การสกัดจุดพีเจอร์บนใบหน้าด้วยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์

แบบจำลองที่ใช้เริ่มต้นการค้นหาจุดพีเจอร์จะเป็นแบบจำลองรูปร่างเฉลี่ยและแบบจำลองภาพฉายระดับเทาเฉลี่ยที่ได้จากขั้นตอนการสอนมาก่อนหน้าแล้ว โดยปรับรูปร่างของแบบจำลองให้มีค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับจุดพีเจอร์จากภาพต่ำที่สุด โดยนิยามฟังก์ชันวัดค่าความผิดพลาดเป็นดังสมการ (3.3)

$$distance(x, T(\bar{x} + \Phi b)) \quad (3.3)$$

เมื่อ x แทน รูปร่างใบหน้าในภาพ

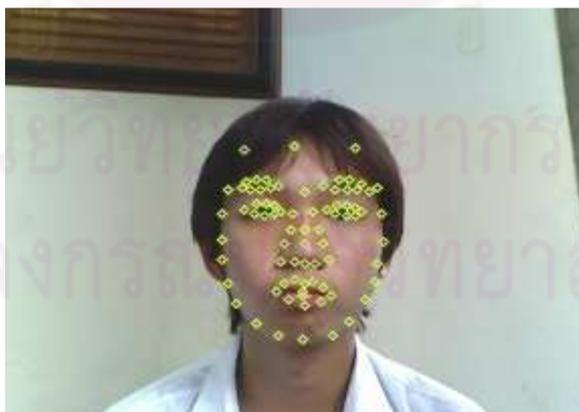
\bar{x} แทน รูปร่างใบหน้าเฉลี่ยที่ได้จากการสอน
 T แทน การแปลงรูปร่างของแบบจำลองรูปร่าง

ตำแหน่งของจุดพีเจอรที่ประกอบกันเป็นแบบจำลองรูปร่างได้มาจากการค้นหาด้วยแบบจำลองภาพฉายโดยการเปรียบเทียบค่าภาพฉายระดับเทาที่บริเวณขอบของแบบจำลองที่วางทับลงบนภาพกับค่าภาพฉายระดับเทาเฉลี่ย โดยฟังก์ชันวัดค่าความเหมือนของภาพฉายใช้ค่าระยะทางมาฮาโลโนบิส (Mahalanobis Distance) นิยามดังสมการ (3.4)

$$Distance = (g - \bar{g})^T S_g^{-1} (g - \bar{g}) \quad (3.4)$$

เมื่อ g แทน ภาพฉายระดับเทาที่ได้จากภาพ
 \bar{g} แทน ภาพฉายระดับเทาเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการสอน
 S_g แทน เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมซึ่งได้จากกระบวนการสอน

จุดพีเจอรจะถูกปรับตำแหน่งเพื่อให้ค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสม กล่าวคือ มีค่าของภาพฉายระดับเทาใกล้เคียงกับภาพฉายระดับเทาเฉลี่ยจากแบบจำลองภาพฉายที่สุด และมีระยะการกระจัดของจุดพีเจอรเทียบกับแบบจำลองรูปร่างเฉลี่ยไม่เกินค่าสูงสุดที่กำหนดด้วย โดยการปรับซ้ำรอบจนกว่าจะได้ตำแหน่งของจุดพีเจอรที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ได้ตำแหน่งของจุดพีเจอรครบทั้งหมด จุดพีเจอรที่ค้นหาได้จากภาพใบหน้าแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลการสกัดจุดพีเจอรด้วยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์

3.3.3 การปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติ

การปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติเป็นกระบวนการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE เพื่อให้มีรูปร่างเหมาะสมกับกลุ่มจุดพีเจอร์สองมิติที่สกัดมาได้ด้วยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ในขั้นตอนก่อนหน้า โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ของพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักระหว่างชุดของจุดพีเจอร์และจุดมุมของแบบจำลองใบหน้ามีค่าต่ำที่สุด นิยามฟังก์ชันความผิดพลาดเป็นไปตามสมการ (2.24) โดยมีการถ่วงน้ำหนักแต่ละจุดไม่เท่ากัน ขนาดของค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าระหว่าง 0 ถึง 15 ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของการย้ายตำแหน่งของจุดมุมนั้น ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยรวมของแบบจำลองสามมิติ ดังนั้นจุดมุมสามมิติบริเวณขอบใบหน้าจึงมีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าสูงสุดในขณะที่จุดมุมในบริเวณรายละเอียดปลีกย่อย เช่น ดวงตา คิ้ว จะมีค่าถ่วงน้ำหนักที่มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองน้อยกว่าเมื่อมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของจุดมุม

ในแต่ละจุดมุมของแบบจำลอง CANDIDE จะมีคู่จุดพีเจอร์สองมิติที่อยู่ในตำแหน่งตรงกัน กล่าวคือจุดพีเจอร์สองมิติที่สกัดได้จากภาพเปรียบเสมือนภาพถ่ายเงาของจุดมุมจากแบบจำลอง CANDIDE ลงบนระนาบของภาพนั่นเอง ในทางอุดมคติแบบจำลองที่แทนข้อมูลรูปร่างที่เหมาะสมกับชุดของจุดพีเจอร์สองมิติมากที่สุดคือแต่ละคู่จุดจะวางทับกันพอดี กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยระหว่างคู่จุดต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

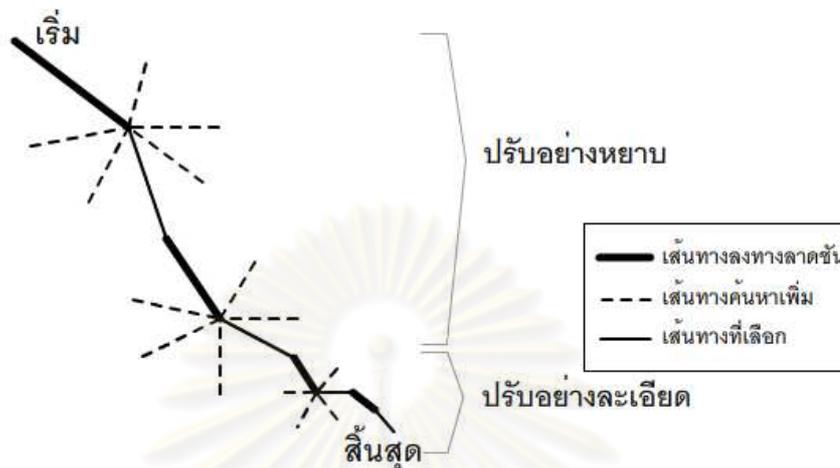
ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนวิธีสำหรับปรับเหมาะแบบจำลองโดยมีจุดประสงค์คือค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างคู่จุดที่ตรงกันที่เป็นไปได้ ได้แก่

1. ขั้นตอนวิธีป็นเขา
2. ขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด
3. ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม
4. ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการความแตกต่าง
5. ขั้นตอนวิธีค้นหาแบบผ่อนคลายและปรับปรุงเฉพาะบริเวณ

3.3.3.1 ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบผ่อนคลาย

โดยที่ขั้นตอนวิธีค้นหาแบบผ่อนคลาย (Relaxed Search) เป็นกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ที่พัฒนาเพิ่มเติมจากขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด โดยอาศัยคุณสมบัติการค้นหาตัวแปรแบบพุ่งเข้าหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชันของขั้นตอนวิธีดังกล่าว แต่เนื่องจากฟังก์ชันความผิดพลาดระหว่างคู่จุดอาจมีจุดต่ำสุดเฉพาะที่จำนวนมาก ทำให้การค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีดังกล่าวหยุดการค้นหาก่อนที่จะพบจุดต่ำสุดที่แท้จริงได้ ดังนั้นหลังจากแต่ละรอบของขั้นตอนวิธีลงทางลาดชัน

ทำงานเสร็จ จะมีการค้นหาพารามิเตอร์เพิ่มเติมเพื่อให้แน่ใจว่าพารามิเตอร์ปัจจุบันที่ค้นพบไม่ใช่จุดต่ำสุดเฉพาะที่ โดยเส้นทางการค้นหาตัวแปรแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพเส้นทางการค้นหาแบบผ่อนปรน

จากแผนภาพในรูปที่ 3.9 แต่ละตัวเลือกตัวแปรที่ค้นหาเพิ่มเติม (เส้นประ) จะนำมาวัดความผิดพลาด หากมีค่าต่ำกว่าค่าความผิดพลาดจากตัวแปรปัจจุบันที่ค้นหาได้จากรอบการทำงานของขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด ตัวเลือกนั้นจะนำมาแทนที่ตัวแปรปัจจุบันและใช้ต่อในรอบการทำงานถัดไปทันที ซึ่งหมายความว่าขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุดค้นพบตัวแปรที่เข้าใกล้จุดต่ำสุดเฉพาะที่ จึงสามารถค้นหาชุดตัวแปรข้างเคียงที่ให้ค่าต่ำกว่าจุดดังกล่าวได้ ทำให้ขั้นตอนวิธีค้นหาแบบผ่อนปรน ค้นหาตัวแปรที่เหมาะสมได้มากขึ้นโดยไม่ติดอยู่ในบริเวณจุดต่ำสุดเฉพาะที่ซึ่งพบได้บ่อยในขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด

เมื่อพิจารณาส่วนการค้นหาตามทิศทางลงทางลาดชันที่สุด จะสามารถเขียนทิศทาง การปรับปรุงพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อให้ค่าฟังก์ชันความผิดพลาดมีค่าลดลงได้เป็นดังสมการ (3.5)

$$d_k = -\nabla E(P, P_0) \quad (3.5)$$

เมื่อ	d_k	แทน ทิศทางการปรับปรุงตัวแปรในรอบการทำงานที่ k
	E	แทน ฟังก์ชันความผิดพลาดระหว่างชุดของจุดพีเจอร์และจุดมุมของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ นิยามดังสมการ (2.24)
	∇	แทน ตัวกระทำเกรเดียนต์ต่อฟังก์ชัน มีผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์

โดยในแต่ละรอบจะปรับปรุงพารามิเตอร์ตามทิศทางลงทางลาดชันที่สุดดังสมการ (3.6)

$$\Phi_{k+1} = \Phi_k + d_k \quad (3.6)$$

เมื่อ Φ_k แทน เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ในรอบการทำงานที่ k

โดยสามารถเขียนสมการทิศทางการปรับปรุงตัวแปรในพจน์ของคู่จุดมุมของแบบจำลองและจุดพีเจอร์สองมิติได้ดังสมการ (3.7)

$$d_k = -\frac{1}{\sum w_i} \times \sum w_i \nabla \sqrt{(p - p_0)_i^T (p - p_0)_i} \quad (3.7)$$

เมื่อ w_i แทน ค่าถ่วงน้ำหนักของคู่จุดที่ i

p แทน จุดมุมของแบบจำลองสามมิติที่ฉายลงบนระนาบสองมิติ

p_0 แทน จุดพีเจอร์สองมิติ

โดยที่จากสมการ (2.16) จุดมุมของแบบจำลองสามมิติแต่ละจุดสามารถเขียนในรูปฟังก์ชันของพารามิเตอร์ได้ ดังนั้นจะสามารถเขียนทิศทางการปรับปรุงตัวแปรในพจน์ของพารามิเตอร์ได้ดังสมการ (3.8)

$$d_k = -\frac{1}{\sum w_i} \sum w_i \nabla \sqrt{(SR(\check{p} + a) - T - p_0)_i^T (SR(\check{p} + a) - T - p_0)_i} \quad (3.8)$$

กล่าวคือในการคำนวณทิศทางการปรับปรุงตัวแปรสามารถทำได้โดยใช้พารามิเตอร์ของแบบจำลองในขณะนั้น และ ชุดของจุดพีเจอร์สองมิติ เป็นตัวแปรต้นได้ทันที ทั้งนี้เพราะตำแหน่งของจุดมุมดั้งเดิมของแบบจำลองถือเป็นค่าคงที่ได้เพราะไม่ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรอื่นเลย และใช้ค่าเดิมคำนวณทุกครั้งแม้ว่าชุดของจุดพีเจอร์และพารามิเตอร์ของแบบจำลองจะมีค่าเป็นอะไรก็ตาม ทำให้สามารถเตรียมรูปแบบของฟังก์ชันค่าเกรเดียนท์ในพจน์ของพารามิเตอร์แต่ละตัวได้แก่ การขยายขนาด การหมุน เป็นต้น เอาไว้ก่อนเพื่อแทนค่าตัวแปรดังกล่าวในสมการได้ทันที เพื่อเพิ่มความสะดวกและลดเวลาในการคำนวณ

สรุปลำดับขั้นตอนการปรับปรุงตัวแปรในแต่ละรอบการทำงานด้วยขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรนได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลำดับการปรับปรุงพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรน

รอบการทำงาน	ทิศทางการปรับปรุงพารามิเตอร์
0	$\Phi_1 = \Phi_0 + d_0$
1	$\Phi_2 =$ พารามิเตอร์ข้างเคียง Φ_1 ที่ให้ค่าความผิดพลาดต่ำกว่า
2	$\Phi_3 = \Phi_2 + d_2$
3	$\Phi_4 =$ พารามิเตอร์ข้างเคียง Φ_3 ที่ให้ค่าความผิดพลาดต่ำกว่า
4	$\Phi_5 = \Phi_4 + d_4$

3.3.3.2 ขั้นตอนวิธีปรับปรุงเฉพาะบริเวณ

นอกจากนี้ขั้นตอนวิธีค้นหาพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้จะเพิ่มการปรับรูปร่างเฉพาะจุดด้วยเพื่อให้รูปร่างของแบบจำลองมีความกลมกลืนกับชุดของจุดพีเจอร์มากขึ้น โดยอาศัยข้อดีของแบบจำลอง CANDIDE ที่มีหน่วยกระทำเฉพาะจุด (Local Action Unit) ซึ่งแต่ละหน่วยกระทำจะรับผิดชอบกลุ่มของจุดมุมสามมิติในแบบจำลองที่แตกต่างกัน ดังนั้นการปรับปรุงรูปร่างแบบจำลองเฉพาะบริเวณเพื่อกระชับเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์ให้มากขึ้นจะเลือกปรับตามหน่วยกระทำที่มีค่าความผิดพลาดเฉพาะหน่วยสูงสุดก่อน โดยนิยามให้แต่ละหน่วยกระทำมีค่าความผิดพลาดเฉพาะหน่วยดังสมการ (3.9)

$$E_{Ai}(P, P_0) = E(P, P_0), P \in A_i \quad (3.9)$$

เมื่อ A_i แทน หน่วยกระทำเฉพาะที่ลำดับที่ i

ในแต่ละรอบของการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีปรับปรุงเฉพาะบริเวณจะมีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

1. คำนวณค่าความผิดพลาดเฉพาะหน่วยกระทำ E_{Ai} ของแต่ละหน่วยกระทำ
2. เลือกหน่วยกระทำ A_i ที่มีค่า E_{Ai} สูงที่สุด
3. ปรับปรุงค่าหน่วยกระทำ A_i แบบซ้ำรอบเพื่อให้ค่า E_{Ai} ลดลงจนกว่าจะไม่ลดลงอีกแล้ว
4. ถอนหน่วยกระทำ A_i ออกจากชุดหน่วยกระทำที่มีสิทธิ์ปรับในกระบวนการ
5. กลับไปทำขั้นตอน 1 ซ้ำจนกว่าจะไม่เหลือหน่วยกระทำที่มีสิทธิ์ปรับในกระบวนการอีกต่อไป

3.3.4 การประกอบข้อมูลแบบจำลองใบหน้าสามมิติ

ขั้นตอนถัดจากกระบวนการเก็บข้อมูลเชิงรูปร่างของใบหน้าจากภาพใบหน้าบุคคลแต่ละภาพจนครบถ้วนคือการนำชุดข้อมูลดังกล่าวมาประกอบกันเป็นข้อมูลแบบจำลองใบหน้าสามมิติของใบหน้าบุคคลดังกล่าวเพียงชุดเดียว ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะแทนลักษณะทั้งรูปร่างและพื้นผิวของใบหน้าบุคคลจากชุดข้อมูลภาพรับเข้านั้น ๆ ได้แก่ 2 ส่วนย่อย ได้แก่

1. รูปร่างใบหน้าสามมิติ (Shape)
2. พื้นผิวใบหน้า (Texture)

ในแต่ละภาพมีข้อมูลแทนรูปร่างใบหน้าสามมิติประจำตัวอยู่และมีความผิดพลาดไปจากความเป็นจริงแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ท่าทางของใบหน้า ความแม่นยำของจุดพีเจอร์ที่สกัดได้ ความแม่นยำของการประมาณรูปร่างสามมิติจากชุดจุดพีเจอร์รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเชิงรูปร่างในแต่ละภาพได้ ดังนั้นการเลือกข้อมูลจากภาพเพียงภาพเดียวย่อมเป็นการเสี่ยงที่จะได้ข้อมูลใบหน้าสามมิติผลลัพธ์ที่ผิดพลาดไปจากความเป็นจริง จึงเป็นที่มาของวิธีการประกอบข้อมูลที่สกัดได้จากแต่ละภาพให้เป็นแบบจำลองใบหน้าสมบูรณ์ โดยมีรายละเอียดของวิธีการดังนี้

3.3.4.1 การรวมข้อมูลรูปร่างสามมิติ

จุดประสงค์ของการรวมข้อมูลรูปร่างสามมิติคือการประกอบข้อมูลรูปร่างของแบบจำลองจากชุดข้อมูลรูปร่างของใบหน้าแต่ละภาพโดยพยายามเลือกส่วนที่มีความแม่นยำสูงมารวมกันเป็นแบบจำลองเพียงแบบจำลองเดียวเพื่อเป็นตัวแทนรูปร่างสามมิติของใบหน้าบุคคลจากชุดภาพรับเข้าดังกล่าว ในที่นี้ให้พารามิเตอร์ของแบบจำลองใบหน้าสามมิติเป็นตัวแทนข้อมูลรูปร่างของแบบจำลองซึ่งประกอบด้วยข้อมูลทั้งด้านลึกและด้านหน้าตรงของใบหน้า ซึ่งข้อมูลรูปร่างด้านลึกจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมดของแบบจำลองที่กระทำต่อตำแหน่งของจุดมุมสามมิติในแกน z ในขณะที่พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่กระทำต่อตำแหน่งของจุดมุมสามมิติบนระนาบ xy จะถือเป็นข้อมูลรูปร่างด้านหน้าตรง โดยนิยามข้อมูลรูปร่างใบหน้าที่ดัดสมการ (3.10)

$$S = S_D + S_F \quad (3.10)$$

เมื่อ	S	แทน ข้อมูลรูปร่างใบหน้าที่รวม
	S_D	แทน ข้อมูลรูปร่างใบหน้าที่ด้านลึก
	S_F	แทน ข้อมูลรูปร่างใบหน้าที่ด้านหน้าตรง

ทั้งนี้ข้อมูลใบหน้าทั้งสองส่วนมาจากการสกัดจากภาพหลายภาพซึ่งแต่ละภาพมีมุมหันของใบหน้าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งทำให้แต่ละภาพมีข้อมูลด้านหน้าตรงและด้านลึกของใบหน้าไม่เท่ากัน นอกจากนี้ค่าความผิดพลาดของการสกัดรูปร่างจากภาพก็แตกต่างกันออกไปในแต่ละภาพด้วยเช่นกัน ดังนั้นการเฉลี่ยรวมข้อมูลทั้งสองส่วนดังกล่าวจึงมีค่าถ่วงน้ำหนักด้วย โดยจะตัดกลุ่มข้อมูลรูปร่างที่มีค่าความผิดพลาดจากการปรับเหมาะเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 ออกไป ดังสมการ (3.11)

$$\hat{S} = \frac{1}{\sum w_{Di}} \sum_i w_{Di} S_{Di} + \frac{1}{\sum w_{Fi}} \sum_i w_{Fi} S_{Fi}, \quad \forall E_i < Q_3 \quad (3.11)$$

เมื่อ	\hat{S}	แทน ข้อมูลรูปร่างของใบหน้าผลลัพธ์
	w_{Di}	แทน ค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลด้านลึกของใบหน้าจากภาพที่ i
	w_{Fi}	แทน ค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลด้านหน้าตรงของใบหน้าจากภาพที่ i
	E_i	แทน ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการปรับเหมาะแบบจำลองในภาพที่ i

ข้อมูลรูปร่างด้านลึก (Depth Information)

ข้อมูลด้านลึกจะมีมากขึ้นเมื่อใบหน้าหันออกจากมุมหน้าตรงมากขึ้น และใบหน้าจากมุมมองหน้าตรงจะไม่สามารถให้ข้อมูลด้านลึกได้เลย ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนักจะสูงขึ้นหากมุมการหันของใบหน้ามีค่ากว้างขึ้น แต่จะถูกลดทอนลงโดยค่าความผิดพลาดจากขั้นตอนการสกัดรูปร่างด้วย ดังนั้นจะได้สมการของค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับข้อมูลรูปร่างด้านลึกเป็นดังสมการ (3.12)

$$w_{Di} = \frac{\delta}{E_i} \quad (3.12)$$

เมื่อ	E_i	แทน ค่าความผิดพลาดของข้อมูลรูปร่างที่สกัดได้จากภาพที่ i
	δ	แทน ค่ามุมการหมุนของใบหน้า

จากสมการ (3.12) หากข้อมูลรูปร่างสกัดได้จากภาพใบหน้าตรงจะทำให้มุมการหมุนของใบหน้า δ มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ข้อมูลรูปร่างดังกล่าวจะไม่มีส่วนร่วมในการคำนวณค่าเฉลี่ยของรูปร่างใบหน้าด้านลึกไปโดยปริยาย และใบหน้าที่มีมุมหันสูงสุดของชุดภาพและมีค่าความผิดพลาดของการสกัดข้อมูลจากภาพต่ำก็จะมีค่าความสำคัญมากกว่า

ข้อมูลรูปร่างด้านกว้างหรือหน้าตรง (Width Information)

ค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลรูปร่างด้านหน้าตรงจะถูกลดทอนความสำคัญจากค่าความผิดพลาดของการสกัดข้อมูลรูปร่างจากภาพเช่นเดียวกับข้อมูลด้านลึก แต่จะให้ความสำคัญต่อมุมไบหน้าตรงมากที่สุด ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนักจึงมีค่าสูงหากมุมการหันของไบหน้าเข้าใกล้ศูนย์ ดังสมการ (3.13)

$$w_{Fi} = \frac{e^{-\delta}}{E_i} \quad (3.13)$$

ดังนั้นข้อมูลรูปร่างไบหน้าตรงจะมีค่าถ่วงน้ำหนักสูงที่สุดเนื่องจากมุมการหมุน δ มีค่าเป็นศูนย์ และไบหน้าที่หันด้วยมุมที่กว้างขึ้นก็จะทำให้ค่าถ่วงน้ำหนักลดลงโดยปริยาย

3.3.4.2 การรวมข้อมูลพื้นผิวสามมิติ

ข้อมูลพื้นผิวสามมิติที่ได้จากภาพสอดคล้องกับข้อมูลรูปร่างโดยตรง ดังนั้นแนวความคิดการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักจึงสามารถนำมาใช้กับการเลือกพื้นผิวสามมิติได้เช่นกัน เนื่องจากการคัดเลือกพื้นผิวมาเป็นบริเวณอาจทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของสภาพพื้นผิวได้ ซึ่งทำให้แบบจำลองไบหน้าที่ได้มีผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้ค่าน้ำหนักของแต่ละพื้นผิวในแต่ละส่วนของไบหน้าจะขึ้นอยู่กับความสำคัญของแต่ละบริเวณรูปร่างโดยปริยาย เช่น พื้นผิวในมุมอับที่ถูกบดบังหรือมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นผิวตำแหน่งเดียวกันจากภาพอื่นจะถูกลดทอนความสำคัญลงโดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่มีขนาดเล็กกว่าพื้นผิวจากบริเวณที่ไม่ถูกบังและมีความแม่นยำที่สูงกว่า ดังนั้นจะได้การเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละบริเวณ (สามเหลี่ยม) เพื่อให้ได้พื้นผิวไบหน้าผลลัพธ์ดังสมการ (3.14)

$$w_i = (3 + \omega_{iA} + \omega_{iB} + \omega_{iC}) \times k^{-E \cdot E}, \quad \forall E_i < Q_3 \quad (3.14)$$

เมื่อ	w_i	แทน ค่าถ่วงน้ำหนักของพื้นผิวจากสามเหลี่ยมลำดับที่ i
	E	แทน ค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง
	k	แทน ค่าคงที่ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 3
	ω_{ij}	แทน ค่าถ่วงน้ำหนักของจุดมุมที่ j ของสามเหลี่ยมลำดับที่ i
	E_i	แทน ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการปรับเหมาะแบบจำลองในภาพที่ i

จากสมการ (3.14) ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสามเหลี่ยมได้จากผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักของจุดมุมทั้งสามจุดอย่างเท่า ๆ กันและแปรผกผันกับค่าความผิดพลาดของสามเหลี่ยมนั้น ๆ ด้วย แต่ถ้าจุดมุมดังกล่าวถูกส่วนอื่นของแบบจำลองบดบังก็จะกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับจุดนั้นเป็นศูนย์ นิยามได้ดังสมการ (3.15)

$$\omega_j = \begin{cases} 0, & v_j \text{ is occluded} \\ \frac{-\delta x_j}{\pi/2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.15)$$

เมื่อ	ω_j	แทน ค่าถ่วงน้ำหนักของจุดมุม v_i
	δ	แทน ค่ามุมการหมุนของแบบจำลอง
	x_j	แทน ตำแหน่งในแกน x ของจุดมุม v_i

3.3.4.3 การเก็บบันทึกข้อมูลพื้นผิว

ข้อมูลพื้นผิวสำหรับใบหน้าสามมิติของแต่ละบุคคลอยู่ในรูปของภาพพิกัดพื้นผิว (ดังรูปที่ 2.9) ซึ่งเป็นภาพพื้นผิวหน้าของแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ถูกคลี่ออกลงบนระนาบสองมิติในระบบ U-V ซึ่งทำให้ได้ความสอดคล้องระหว่างพิกัด U-V จากระนาบพื้นผิวและพิกัดในปริภูมิสามมิติของแบบจำลองใบหน้าด้วย ดังนั้นเพื่อความสะดวกในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พิกัดของสามเหลี่ยมจากแบบจำลองที่สอดคล้องกับตำแหน่งพิกัด U-V บนระนาบพื้นผิวเป็นจุดอ้างอิง เพื่อให้การบันทึกข้อมูลพื้นผิวและการส่งผ่านสู่รูปร่างแบบจำลองสามมิติทำได้ง่ายและแม่นยำ

ข้อมูลพื้นผิวที่ประกอบได้จากวิธีการดังอธิบายใน 3.3.4.2 จะอยู่ในรูปของภาพพื้นผิวใบหน้าชิ้นเล็ก ๆ ที่วางบนสามเหลี่ยมแต่ละชิ้นของแบบจำลอง โดยชิ้นส่วนพื้นผิวเหล่านี้จะนำมาวางบนระนาบพื้นผิวที่เตรียมไว้ตามตำแหน่งสามเหลี่ยมแต่ละชิ้นที่ถูกคลี่ แต่จุดมุมของสามเหลี่ยมจากที่คำนวณได้และพิกัดปลายทางบนพื้นผิวมักจะไม่ตรงกันทำให้ไม่สามารถคัดลอกแบบจุดต่อจุดมาวางปลายทางได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องใช้การแปลง Affine ทีละชิ้น (Piece-wise Affine Transform) เพื่อส่งผ่านพื้นผิวที่ประกอบได้ลงมายังภาพพิกัดพื้นผิวปลายทางจนครบ โดยการแปลง Affine ทีละชิ้น นิยามได้ดังสมการ (3.16)

$$p'_i = f(p_i) \quad \forall i = 1..n \quad (3.16)$$

เมื่อ	p_i	แทน พิกัดของพื้นผิวดั้งเดิม
	p'_i	แทน พิกัดของพื้นผิวปลายทาง

f แทน ฟังก์ชันการแปลงสำหรับส่งผ่านจุดต้นฉบับไปสู่พิกัดปลายทาง

อนึ่ง ในงานวิจัยนี้ใช้การแปลง Affine สำหรับพื้นผิวสามเหลี่ยมแต่ละชิ้น ดังนั้นจุดทุกจุดในสามเหลี่ยมจะถูกเคลื่อนย้ายจากพื้นผิวดั้งเดิมไปสู่ภาพพิกัดพื้นผิวปลายทาง โดยสามารถนิยามความสัมพันธ์ของจุดพิกัดภายในสามเหลี่ยมได้ดังสมการ (3.17)

$$p = p_1 + \beta(p_2 - p_1) + \gamma(p_3 - p_1) \quad (3.17)$$

และจุดพิกัดภายในสามเหลี่ยมปลายทางนิยามได้ดังสมการ (3.18)

$$p' = f(p) = \alpha p'_1 + \beta p'_2 + \gamma p'_3 \quad (3.18)$$

เมื่อ p_i แทน พิกัดจุดมุมสามเหลี่ยมต้นฉบับจุดที่ i
 p แทน พิกัดของจุดภายในสามเหลี่ยมต้นฉบับ
 α, β, γ แทน ค่าคงที่เฉพาะสำหรับคู่สามเหลี่ยมหนึ่ง ๆ
 p'_i แทน พิกัดจุดมุมสามเหลี่ยมปลายทางจุดที่ i

โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ทั้งสามนิยามได้ดังสมการ (3.19)

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (3.19)$$

สำหรับคู่สามเหลี่ยมต้นทางและปลายทางสำหรับส่งผ่านพื้นผิวสู่ภาพพิกัดพื้นผิวจะมีค่าคงที่ α, β, γ เฉพาะตัวขึ้นอยู่กับตำแหน่งพิกัดของจุดมุมสามเหลี่ยมต้นฉบับและจุดภายในของสามเหลี่ยมต้นฉบับ (x, y) ใด ๆ ที่ต้องการแปลง Affine ซึ่งนิยามความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (3.20) ถึง (3.22)

$$\alpha = 1 - \beta - \gamma \quad (3.20)$$

$$\beta = \frac{yx_3 - x_1y - x_3y_1 - y_3x + x_1y_3 + xy_1}{-x_2y_3 + x_2y_1 + x_1y_3 + x_3y_2 - x_3y_1 - x_1y_2} \quad (3.21)$$

$$\gamma = \frac{xy_2 - y_1x - x_1y_2 - x_2y + x_2y_1 + yx_1}{-x_2y_3 + x_2y_1 + x_1y_3 + x_3y_2 - x_3y_1 - x_1y_2} \quad (3.22)$$

ดังนั้นกระบวนการสร้างภาพพิกัดพื้นผิวจากข้อมูลพื้นผิวที่ประกอบไว้ก่อนแล้ว ทำได้โดยแปลง Affine พื้นผิวบนสามเหลี่ยมที่ละชิ้นจากข้อมูลพื้นผิวที่ประกอบขึ้นสู่ระนาบพื้นผิวจนครบทุกชิ้น โดยสามารถเขียนสรุปได้ดังรหัสเทียมในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รหัสเทียมการสร้างภาพพิกัดพื้นผิวจากข้อมูลพื้นผิวที่ประกอบขึ้น

```

For each triangle T
    For each pixel (x, y) in T
        New_pos = Affine( x, y )
        TexturePlane( New_pos ) = TextureOf( T(x, y) )
    End
End

```

3.3.4.4 การประกอบข้อมูลรูปร่างและพื้นผิว

แบบจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติประกอบด้วยข้อมูลรูปร่างสามมิติและข้อมูลพื้นผิวที่สอดคล้องกัน โดยข้อมูลทั้งสองนี้ได้มาจากกระบวนการรวมข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวจากชุดข้อมูลที่สกัดได้จากชุดภาพรับเข้าดังกล่าวในหัวข้อ 3.3.4.1 และ 3.3.4.2 ตามลำดับ เนื่องจากข้อมูลพื้นผิวเก็บบันทึกในรูปของภาพพิกัดพื้นผิวซึ่งระบุตำแหน่งสอดคล้องกับจุดมุมบนรูปร่างสามมิติอยู่แล้วดังแสดงในรูปที่ 3.10 ดังนั้นการประกอบข้อมูลทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันจึงสามารถดำเนินการโดยการฉายภาพพื้นผิวดังกล่าวลงบนพื้นผิวหน้าของรูปร่างสามมิติโดยยึดถือตำแหน่งพิกัดที่สอดคล้องกันระหว่างพื้นผิวและรูปร่างเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งกระบวนการฉายภาพพื้นผิวนี้สามารถกระทำได้โดยใช้การประมวลผลและแสดงผลของ DirectX ซึ่งแบบจำลองผลลัพธ์เป็นไปดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ภาพพิกัดพื้นผิวจากการขั้นตอนประกอบข้อมูลพื้นผิว



รูปที่ 3.11 แบบจำลองใบหน้าผลลัพธ์ที่ได้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

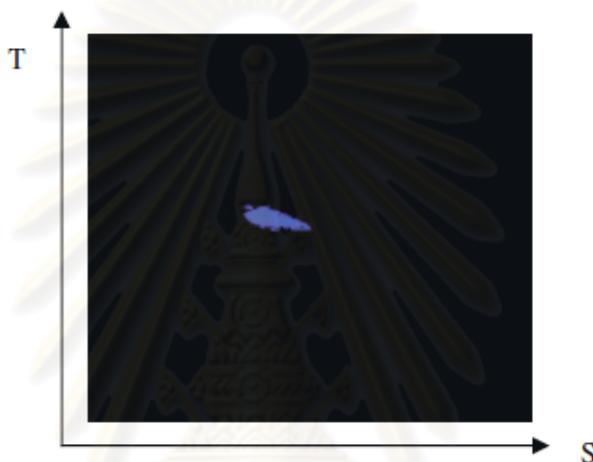
บทนี้อธิบายถึงรายละเอียดของการทดลองและอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การทดลองตรวจหาบริเวณใบหน้า การทดลองปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์สองมิติเพื่อประมาณรูปร่างสามมิติของใบหน้าจากในภาพ การทดลองปรับปรุงรูปร่างแบบจำลองใบหน้าเฉพาะบริเวณ การทดลองวัดความถูกต้องของรูปร่างแบบจำลองใบหน้าสามมิติ และการทดลองวัดความถูกต้องของพื้นผิวแบบจำลองใบหน้าสามมิติตามลำดับ โดยในแต่ละหัวข้อการทดลองประกอบด้วยรายละเอียดการทดลอง ผลการทดลอง การอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งรหัสโปรแกรมทั้งหมดที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองเป็นรหัสภาษาซีพลัสพลัส (C++) โดยใช้โปรแกรม Microsoft® Visual Studio® 2005 โดยเพิ่มเติมส่วนขยาย OpenCV รุ่น 1.0 สำหรับประมวลผลภาพ และเพิ่มเติมส่วนขยาย Microsoft® DirectX® SDK รุ่นเผยแพร่สำหรับนักพัฒนาโปรแกรมประจำเดือนกุมภาพันธ์ (Developer Edition) ค.ศ. 2009 สำหรับการติดต่อกับกล้องรับภาพ ประมวลผลและแสดงผลสามมิติ ดำเนินการทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่ใช้หน่วยประมวลผล Intel® Core™2 Duo รุ่น T8100 ความถี่สัญญาณนาฬิกา 2.10 GHz หน่วยความจำกายภาพขนาด 2GB และใช้ระบบปฏิบัติการ Microsoft® Windows Vista® SP2 โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิว

การทดลองส่วนแรกสุดของงานวิจัยจำลองนี้คือการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจหาบริเวณใบหน้าจากภาพรับเข้าด้วยแบบจำลองสีผิวสองประเภท ได้แก่ แบบจำลองสีผิวแบบจุดสีเดียว ซึ่งนิยมใช้กันโดยทั่วไป และ แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ ซึ่งผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ตีพิมพ์บทความในงานประชุมวิชาการ International Conference Image and Vision Computing New Zealand ครั้งที่ 24 (IVCNZ 2009) [37] ณ ประเทศนิวซีแลนด์ ในปี 2009 โดยแบบจำลองสีผิวแต่ละประเภทแบ่งออกเป็นชนิดสร้างจากปริภูมิสี TSL และปริภูมิสี HSV ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบพื้นที่ 3×3 และ 5×5

แบบจำลองสีผิวทั้งหมดสร้างขึ้นจากชุดข้อมูลสอนชุดเดียวกัน (กลุ่มภาพใบหน้าบุคคลภายใต้สภาวะแวดล้อมหลากหลาย) จำนวน 1,200 รูป โดยสุ่มเลือกบริเวณสีผิวจากใบหน้า

บุคคลในภาพ สำหรับการสอนแบบจำลองสีผิวแบบจุดจะใช้จุดที่เลือกในการสอน ขณะที่แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่จะใช้ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับสีจากบริเวณที่เลือก โดยจุดสีทั้งหมดที่เลือกจากชุดข้อมูลสอนถือว่าเป็นตัวอย่างสอนบวก (Positive Training Set) โดยไม่มีการสอนตัวอย่างลบ (Negative Training Set) เข้าไปด้วยเนื่องจากแบบจำลองสีผิวที่ใช้เน้นเก็บเฉพาะข้อมูลสีผิวเท่านั้น บริเวณสีอื่น ๆ ของแบบจำลองสีผิวที่ไม่เคยได้รับการสอนให้เป็นบริเวณสีผิวจะถือว่ามิใช่สีผิวไปโดยปริยาย โดยลักษณะการกระจายของแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ในปริภูมิสี TSL และ HSV เป็นดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ตามลำดับ

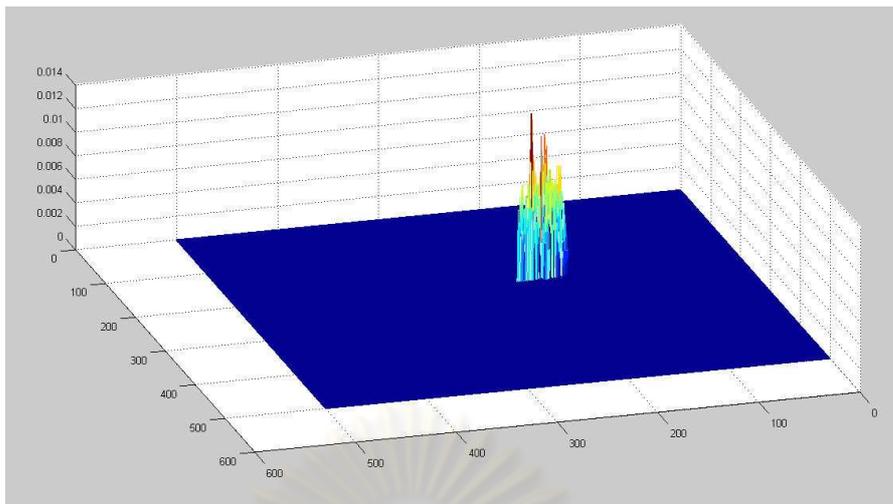


รูปที่ 4.1 แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่แบบ T-S

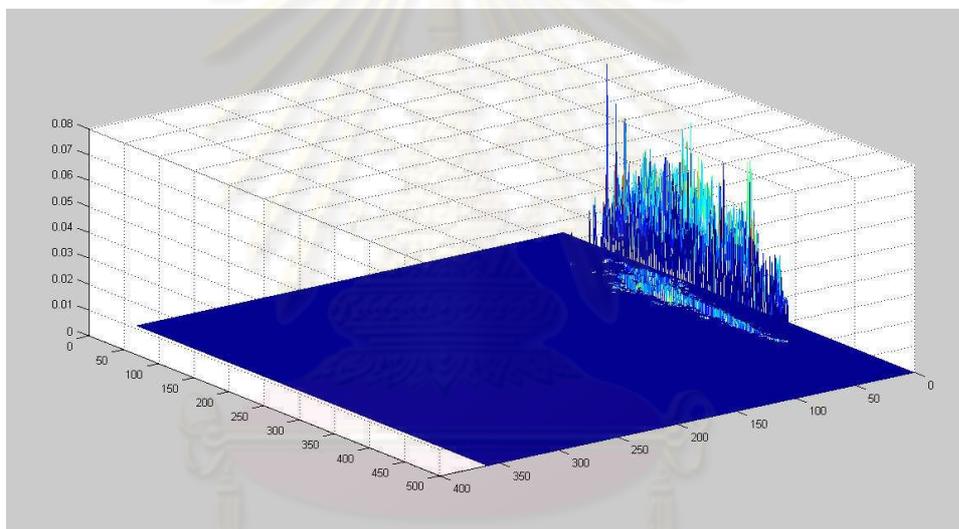


รูปที่ 4.2 แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่แบบ H-S

โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประจำแต่ละตำแหน่งของสีผิวจากแบบจำลองสีผิวข้างต้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ปริภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลองสี่ผิวงเชิงพื้นที่ T-S



รูปที่ 4.4 ปริภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลองสี่ผิวงเชิงพื้นที่ H-S

4.1.1 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองประสิทธิภาพของการตรวจหาบริเวณใบหน้าจะใช้แบบจำลองสี่ผิวงแต่ละประเภทของบริเวณสี่ผิวงจากในภาพรับเข้าชุดเดียวกัน โดยผลจากการกรองสี่ผิวงจะนำไปประมาณหาบริเวณใบหน้าด้วยการใช้การปรับเหมาะรูปร่างในภาพด้วยวงรี (วิธีการดังอธิบายใน 3.3.1) โดยพิจารณาว่าบริเวณของใบหน้าที่ตรวจหาได้จากแบบจำลองสี่ผิวงแต่ละประเภทถูกต้องหรือไม่ พร้อมบันทึกผลเป็นดังนี้

1. ตรวจหาถูกต้อง เมื่อระบบสามารถเลือกบริเวณใบหน้าได้ถูกต้อง
2. ตรวจไม่พบใบหน้า เมื่อระบบไม่สามารถค้นพบใบหน้าจากภาพ

3. ตรวจพบใบหน้าผิด เมื่อระบบตรวจพบบริเวณอื่น ๆ ในภาพเป็นใบหน้า ทั้ง ๆ ที่บริเวณดังกล่าวไม่ใช่ใบหน้า

4.1.2 ผลการทดลอง

ชุดข้อมูลทดลองประกอบด้วยภาพถ่ายใบหน้าบุคคลขนาด 640×480 โดยคัดเลือกมาจากฐานข้อมูลใบหน้าบุคคลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จำนวน 2,130 รูป โดยแต่ละภาพบุคคลหนึ่ง ๆ มีจำนวนไม่เกิน 120 ภาพ ผลความแม่นยำของการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวดูประเภทต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลความแม่นยำของการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวดู

แบบจำลองสี่ผิวดู	อัตราตรวจไม่พบใบหน้า		อัตราตรวจพบใบหน้าผิด	
	T-S	H-S	T-S	H-S
เชิงพื้นที่ 3×3	0.162	0.305	0.092	0.198
เชิงพื้นที่ 5×5	0.128	0.304	0.068	0.104
แบบจุด	0.212	0.208	0.092	0.151

โดยระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวดูประเภทต่าง ๆ เฉลี่ยต่อหนึ่งภาพแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

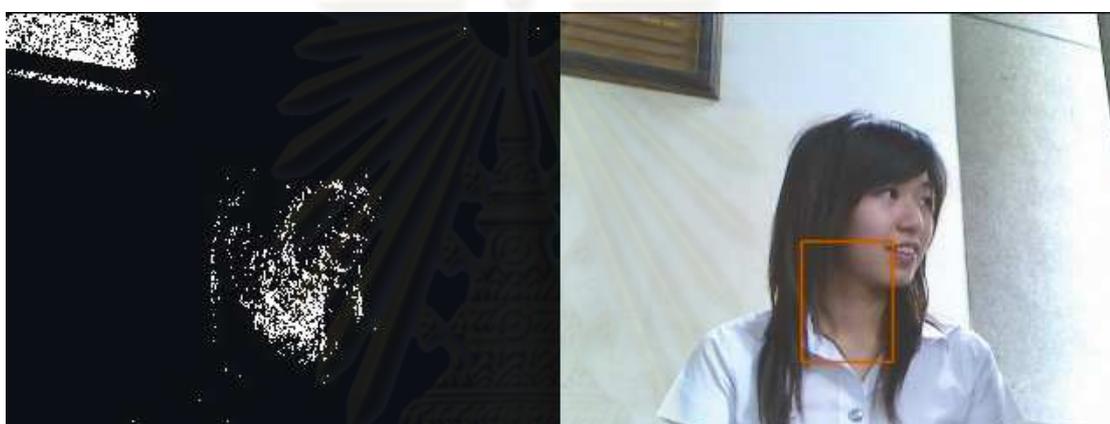
ตารางที่ 4.2 ผลระยะเวลาการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวดู

แบบจำลองสี่ผิวดู	ระยะเวลาเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิวินาที)	
	T-S	H-S
เชิงพื้นที่ 3×3	52.589 ± 4.467	46.468 ± 6.726
เชิงพื้นที่ 5×5	48.612 ± 4.769	53.181 ± 7.871
แบบจุด	55.974 ± 4.934	46.967 ± 5.601

ผลการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวดูแบบจุด T-S และ H-S และ เชิงพื้นที่แบบ T-S ของภาพใบหน้าที่รับเข้าภาพเดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ถึง รูปที่ 4.7 ตามลำดับ โดยบริเวณสีขาวในด้านซ้ายมือของแต่ละภาพแทนบริเวณสี่ผิวดูที่แบบจำลองสี่ผิวดูคัดเลือกจากภาพ และกรอบสีแดงด้านขวามือของแต่ละภาพแทนบริเวณใบหน้าจากระบบเลือก



รูปที่ 4.5 ผลการคัดเลือกบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิวแบบจุด T-S



รูปที่ 4.6 ผลการคัดเลือกบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิวแบบจุด H-S



รูปที่ 4.7 ผลการคัดเลือกบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ T-S

จากชุดภาพตัวอย่างข้างต้น รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 ถือว่าเป็นผลการตรวจหาบริเวณใบหน้าที่ถูกต้อง แต่ใน จะถือว่าเป็นผลการตรวจหาบริเวณใบหน้าที่ผิด และ ตรวจไม่พบ

ใบหน้า เนื่องจากบริเวณที่ตรวจหาได้ไม่ใช่ใบหน้า และยังไม่สามารถตรวจพบบริเวณใบหน้าที่ถูกตัดได้

4.1.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนว่า แบบจำลองสี่ผิวเชิงพื้นที่แบบ T-S ขนาด 5×5 สามารถกรองบริเวณสี่ผิวจากภาพรับเข้าแล้วทำให้ตรวจพบบริเวณใบหน้าได้แม่นยำสูงที่สุด โดยพบว่าอัตราการตรวจไม่พบใบหน้า และ อัตราการตรวจพบใบหน้าผิดน้อยกว่าผลการตรวจของแบบจำลองสี่ผิวประเภทอื่นอย่างชัดเจน นอกจากนี้การใช้แบบจำลองสี่ผิวแต่ละประเภทยังมีระยะเวลาการประมวลผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่ผิวเชิงพื้นที่จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยนี้ในส่วนแรกเนื่องจากมีความแม่นยำของการตรวจหาบริเวณใบหน้าสูงอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในแบบจำลองสี่ผิวแบบจุด

ข้อควรระวังที่สำคัญสำหรับการใช้ขั้นตอนวิธีตรวจหาบริเวณใบหน้าจากภาพด้วยแบบจำลองสี่ผิวเชิงพื้นที่คือองค์ประกอบในภาพ เช่น หากในภาพมีรูปร่างวัตถุอื่นที่มีสีใกล้เคียงกับสี่ผิวและมีรูปร่างเป็นวงรีก็อาจทำให้ขั้นตอนการตรวจหาใบหน้าผิดพลาดได้

4.2 การทดลองปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์

การสกัดข้อมูลรูปร่างสามมิติจากภาพรับเข้าเป็นกระบวนการปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE ให้เข้ากับชุดของจุดพีเจอร์สองมิติที่สกัดได้จากภาพด้วยขั้นตอนวิธีแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ โดยการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองใบหน้าเพื่อเปลี่ยนการหมุน การขยายขนาด การเลื่อนที่ และรูปร่างเพื่อให้จุดมุมแต่ละจุดที่ฉายลงบนระนาบของภาพแล้วมีตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดพีเจอร์สองมิติที่สอดคล้องกันมากที่สุด กล่าวคือ ปรับแบบจำลองให้มีค่าระยะทางเฉลี่ยระหว่างชุดของจุดมุมที่ฉายลงบนระนาบและชุดของจุดพีเจอร์ต่ำที่สุด โดยการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้งด้านความแม่นยำของการปรับเหมาะและระยะเวลาที่ใช้ภายใต้ข้อกำหนดที่เท่าเทียมกันของขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบ ผ่อนปรน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับวิธีการอื่น ส่วนหนึ่งของการทดลองชุดนี้ได้ตีพิมพ์ลงในการประชุมวิชาการ 2010 International Conference on Image Processing (ICIP 2010) ณ ประเทศฮ่องกง [41]

4.2.1 วิธีการทดลอง

เพื่อให้การเปรียบเทียบความสามารถของการปรับเหมาะแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธีต่าง ๆ มีความเท่าเทียมจึงกำหนดให้แต่ละขั้นตอนวิธีสามารถดำเนินการค้นหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมด้วยความพยายามที่เท่ากันโดยจะหยุดดำเนินการเมื่อเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งต่อไปนี้เป็นจริง (บังคับใช้กับทุก ๆ ขั้นตอนวิธี)

1. กระบวนการค้นหาดำเนินมาถึงภาวะที่แบบจำลองปรับเหมาะเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์ด้วยค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งการทดลองนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.0 จุดภาพโดยเฉลี่ยต่อตัวอย่าง
2. จำนวนรอบการค้นหาของขั้นตอนวิธีดำเนินมาจนครบจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดเอาไว้ก่อนหน้าในแต่ละชุดการทดลอง

รอบการค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง CANDIDE ให้เหมาะกับจุดพีเจอร์จะแบ่งออกเป็นรอบการค้นหาแบบหยาบ (Coarse Search) และรอบการค้นหาแบบละเอียด (Fine Search) ซึ่งการค้นหาแบบหยาบจะดำเนินการก่อนโดยปรับตัวแปรด้วยค่าที่กว้างกว่าการค้นหาแบบละเอียด โดยกำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาแบบหยาบมีค่าเท่ากันสำหรับทุก ๆ ชุดการทดลองที่ 10 รอบ และปรับเปลี่ยนค่าจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาแบบละเอียดแตกต่างกันออกไปในแต่ละชุดการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นกับความแม่นยำของการปรับเหมาะแบบจำลองที่ได้และระยะเวลาการประมวลผลที่ต้องใช้

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดลองแต่ละชุดประกอบด้วยขั้นตอนวิธีผ่อนคลาย (Relaxed Search: RS) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด (Steepest Descent: SD) และขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยกำหนดจำนวนรอบของการค้นหาแบบละเอียดสูงสุดไม่เกิน 25, 50 และ 100 รอบตามลำดับในแต่ละชุดการทดลอง

ข้อมูลสำหรับทดลองประกอบไปด้วยชุดภาพใบหน้าบุคคลที่บันทึกจากกล้องเว็บแคมที่อยู่หนึ่งขนาด 640×480 จุดภาพ จำนวน 4,355 ภาพจากฐานข้อมูลสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ครอบคลุมจำนวนบุคคล 31 คน

4.2.2 ผลการทดลอง

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์สองมิติที่ได้จากแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์เพื่อให้ได้ข้อมูลใบหน้าสามมิติจากภาพแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์สองมิติ

ขั้นตอนวิธี	เวลาประมวลผล (มิลลิวินาที)		ค่าความผิดพลาดระยะทาง (จุดภาพ)	
	เฉลี่ย	เบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย	เบี่ยงเบนมาตรฐาน
GA 25 รอบ	67.725	31.639	9.548	2.079
SD 25 รอบ	48.192	15.130	7.339	1.560
RS 25 รอบ	109.653	34.978	5.949	1.403
GA 50 รอบ	107.987	34.402	8.028	1.665
SD 50 รอบ	90.906	34.762	6.941	1.500
RS 50 รอบ	280.339	98.600	5.955	1.398
GA 100 รอบ	199.061	25.377	7.440	1.501
SD 100 รอบ	314.587	109.184	6.362	1.390
RS 100 รอบ	575.423	162.574	5.738	1.379

4.2.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์สองมิติข้างต้นให้ผลชัดเจนว่าเมื่อกำหนดให้ขั้นตอนวิธีแต่ละแบบสามารถใช้เวลาประมวลผลตามขั้นตอนวิธีที่ต่างกันแล้ว ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรน (RS) สามารถค้นหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองใบหน้าสามมิติและชุดของจุดพีเจอร์มีค่าต่ำที่สุดในทุกกรณีเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (GA) และ ขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุด (Steepest Descent) อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรนใช้เวลาประมวลผลที่มากกว่าขั้นตอนวิธีทั้งสองข้างต้นเนื่องจากใช้เวลาในการค้นหาตัวแปรเพิ่มเติมหลังจากสิ้นสุดรอบการค้นหาแบบลงทางลาดชันที่สุดเพื่อป้องกันการติดอยู่ในบริเวณค่าต่ำสุดเฉพาะบริเวณแต่ไม่ใช่ค่าต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ของปริภูมิ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบลงทางลาดชันที่สุด แม้ว่าการลงทางลาดชันที่สุดจะสามารถค้นหาตามทิศทางการลดลงของค่าความผิดพลาดก็ตาม

นอกจากนี้ค่าของความผิดพลาดระยะทางดังแสดงในตารางที่ 4.3 เป็นค่าเฉลี่ยรวมของความผิดพลาดระยะทางแบบยูคลิเดียนระหว่างคู่จุดมุมของแบบจำลองที่ฉายลงบนระนาบสองมิติและจุดพีเจอร์สองมิติที่สอดคล้องกัน ซึ่งจากการสังเกตพบว่าโดยส่วนมากแล้วคู่จุด

ดังกล่าวจะวางทับตำแหน่งกันได้เกือบสนิทหรือมีค่าความผิดพลาดระหว่างคู่จุดต่ำมาก โดยเฉพาะจุดที่มีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าที่สูงกว่าจะมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยความผิดพลาดมาก ดังนั้นคู่จุดส่วนน้อยที่ปรับเหมาะไม่ถูกต้องนั้นก็จะมีค่าผิดพลาดที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยที่สังเกตได้อย่างแน่นอนไปโดยปริยาย ดังนั้นค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดระยะทางที่ลดลงเพียงไม่กี่จุดภาพจึงสามารถส่งผลให้รูปร่างของแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ปรับเหมาะได้มีความแม่นยำสูงขึ้นค่อนข้างมากหากพิจารณาดังที่กล่าวมา

4.3 การทดลองปรับปรุงรูปร่างแบบจำลองใบหน้าสามมิติเฉพาะบริเวณ

การปรับปรุงรูปร่างใบหน้าสามมิติเฉพาะบริเวณเป็นกระบวนการที่ดำเนินการหลังจากปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์ด้วยขั้นตอนวิธีการค้นหาตัวแปรแบบผ่อนปรนเสร็จสิ้นแล้วเพื่อปรับปรุงรูปร่างของแบบจำลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้นไปอีกโดยใช้ฟังก์ชันวัดค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยแบบเดียวกันกับการปรับเหมาะแบบจำลองทุกประการ

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปรับปรุงรูปร่างแบบจำลองใบหน้าสามมิติเฉพาะบริเวณด้วยจำนวนรอบรวมสูงสุดที่กำหนดโดยพิจารณาถึงระยะเวลาที่ต้องสูญเสียเทียบกับค่าความผิดพลาดที่ลดลงไปจากที่ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรนสำเร็จไปก่อนหน้า โดยชุดข้อมูลที่ใช้ทดลองส่วนนี้เป็นชุดข้อมูลเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลอง 4.2 ทุกประการ โดยแบ่งหมวดหมู่ของข้อมูลออกเป็นชุดภาพหน้าตรง ชุดภาพใบหน้าหันไม่เกิน 10 องศา และชุดภาพใบหน้าที่หันเกิน 10 องศาเพื่อวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีว่าเหมาะสมกับใบหน้าในลักษณะใดบ้าง

4.3.1 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชุด ประกอบด้วยชุดการค้นหาแบบผ่อนปรนอย่างละเอียดไม่เกิน 25 รอบ, ไม่เกิน 50 รอบ และไม่เกิน 100 รอบ โดยแต่ละชุดจะเพิ่มเติมการปรับปรุงแบบจำลองแบบเฉพาะบริเวณจำนวนไม่เกิน 50 รอบ และไม่เกิน 100 รอบตามลำดับโดยมีการค้นหาแบบผ่อนปรนเป็นค่าเปรียบเทียบ (Baseline) ในแต่ละชุดการทดลอง โดยทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดลอง 4.2 กล่าวคือ เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในแต่ละชุด และ เวลาที่ใช้ในการประมวลผลเป็นค่าเฉลี่ยต่อหนึ่งภาพทั้งหมด

4.3.2 ผลการทดลอง

ผลการเปรียบเทียบในรูปของเวลาประมวลผลสำหรับใบหน้าที่หันด้วยมุมต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.4 และในรูปของค่าความผิดพลาดระยะทางแสดงดังตารางที่ 4.5 และเมื่อนำ

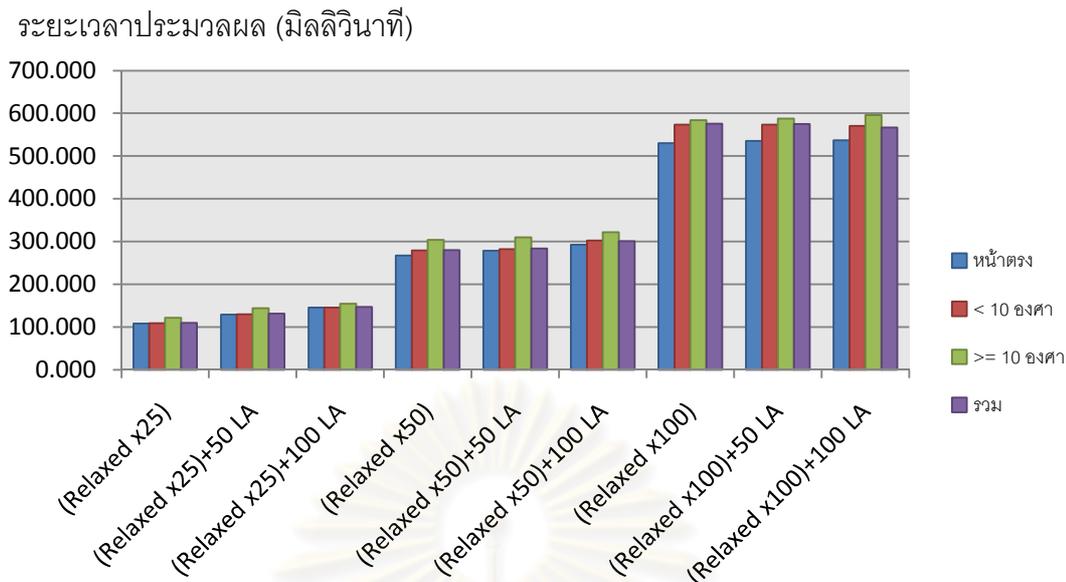
ข้อมูลดังกล่าวมาวาดลงบนแผนภูมิแท่งเพื่อเปรียบเทียบแต่ละชุดการทดลองจะได้ดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 ตามลำดับ โดยนิยาม (Relaxed \times 25)+100 LA หมายถึงดำเนินการค้นหาแบบ ผ่อนปรนไม่เกิน 25 รอบ และปรับปรุงเฉพาะบริเวณไม่เกิน 100 รอบ

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูลใบหน้าที่ทำทางต่าง ๆ

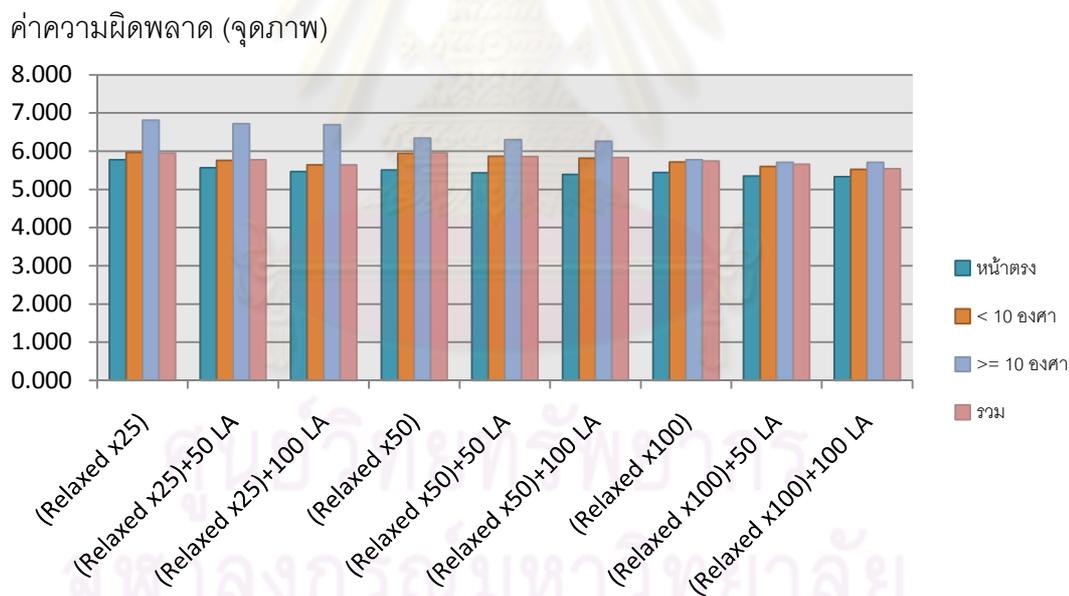
ขั้นตอนวิธี	เวลาประมวลผล (มิลลิวินาที)			
	หน้าตรง	มุม < 10°	มุม \geq 10°	รวม
RS 25 รอบ	145.724	108.615	121.519	109.653
RS 25 รอบ + ปรับ 50 รอบ	145.724	129.970	144.222	131.116
RS 25 รอบ + ปรับ 100 รอบ	145.724	145.419	154.185	146.849
RS 50 รอบ	267.286	279.012	304.075	280.339
RS 50 รอบ + ปรับ 50 รอบ	278.602	282.276	309.800	283.604
RS 50 รอบ + ปรับ 100 รอบ	292.717	302.638	321.975	301.076
RS 100 รอบ	530.302	573.302	584.231	575.423
RS 100 รอบ + ปรับ 50 รอบ	535.088	573.251	587.641	575.005
RS 100 รอบ +ปรับ 100 รอบ	537.150	570.777	595.769	566.403

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูลใบหน้าที่ทำทางต่าง ๆ

ขั้นตอนวิธี	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (จุดภาพ)			
	หน้าตรง	มุม < 10°	มุม \geq 10°	รวม
RS 25 รอบ	5.776	5.963	6.813	5.949
RS 25 รอบ + ปรับ 50 รอบ	5.567	5.759	6.716	5.774
RS 25 รอบ + ปรับ 100 รอบ	5.465	5.641	6.689	5.640
RS 50 รอบ	5.504	5.940	6.343	5.955
RS 50 รอบ + ปรับ 50 รอบ	5.428	5.862	6.298	5.860
RS 50 รอบ + ปรับ 100 รอบ	5.389	5.817	6.262	5.829
RS 100 รอบ	5.436	5.719	5.776	5.738
RS 100 รอบ + ปรับ 50 รอบ	5.346	5.601	5.706	5.654
RS 100 รอบ +ปรับ 100 รอบ	5.332	5.519	5.704	5.543



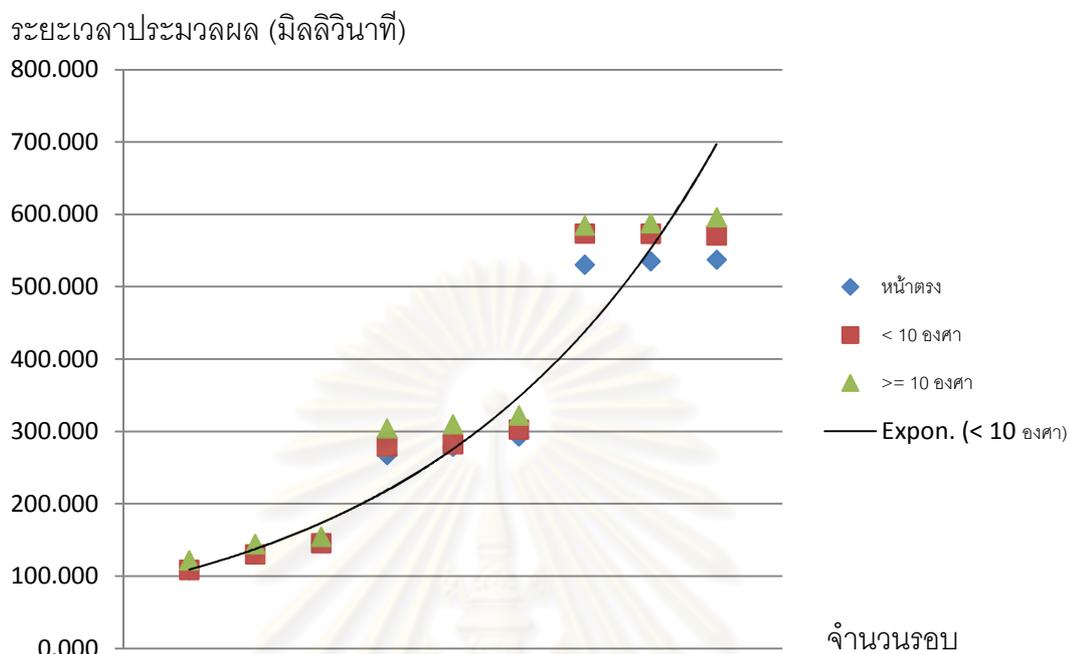
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูลใบหน้าท่าทางต่าง ๆ



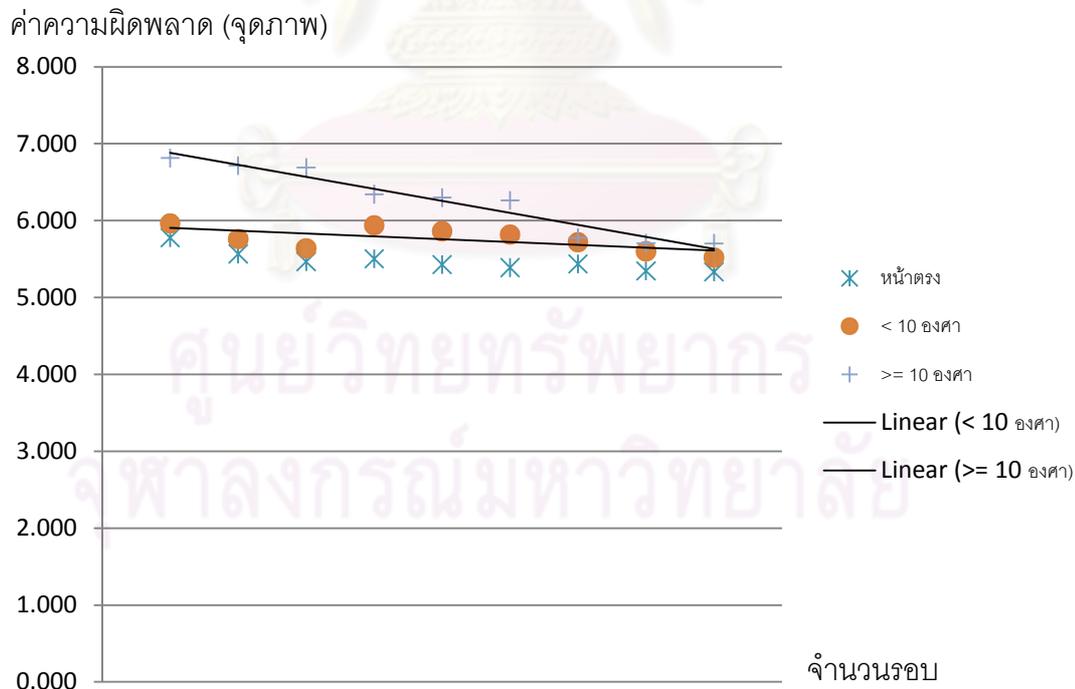
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณ ภายใต้ข้อมูลใบหน้าท่าทางต่าง ๆ

เพื่อให้การพิจารณาแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างเวลาประมวลผลที่เพิ่มขึ้น และ ค่าความผิดพลาดระยะทางที่ลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการประมวลผลของขั้นตอนวิธีการค้นหา

แบบผ่อนปรน และ การปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณทำได้ง่ายขึ้น จึงเขียนกราฟเส้นแสดงแนวโน้มดังกล่าวได้ดังรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 โดยแกนนอนแสดงถึงจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

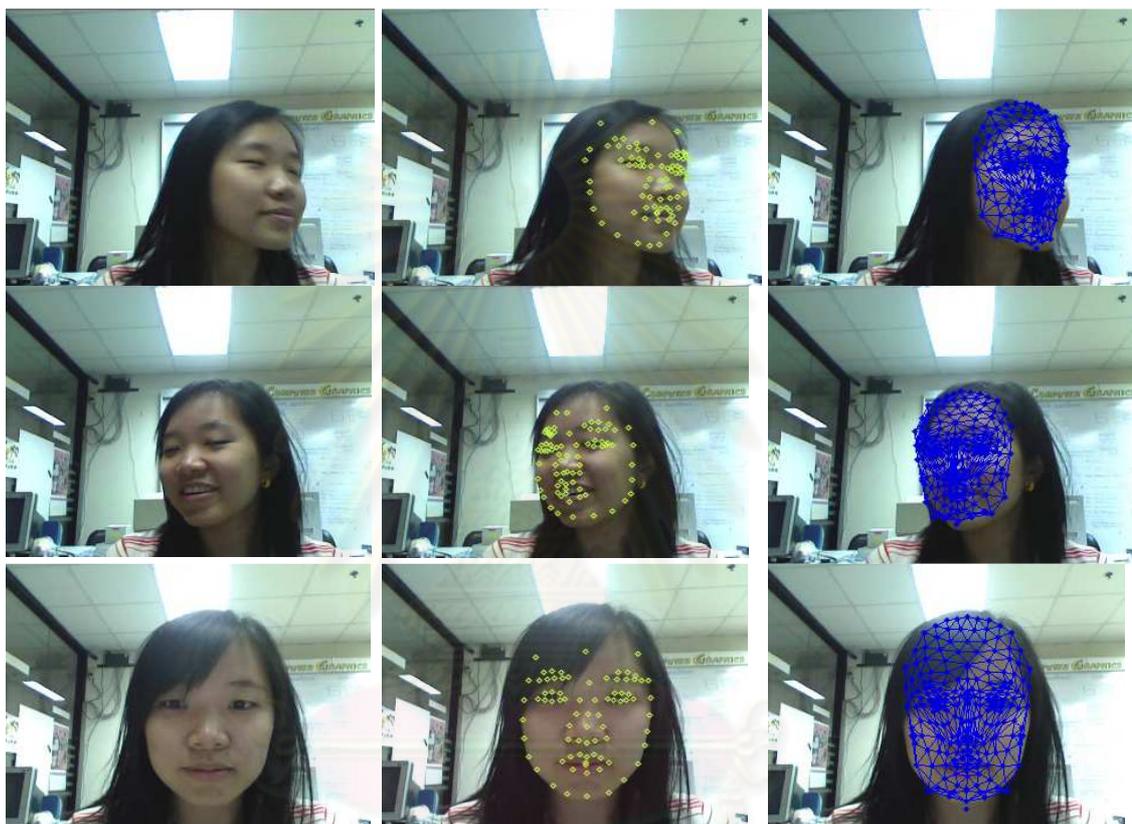


รูปที่ 4.10 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นกับเวลาการประมวลผล



รูปที่ 4.11 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นกับค่าความผิดพลาด

โดยแบบจำลองผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการแสดงได้ดังตัวอย่างในชุดภาพดังรูปที่ 4.12 โดยภาพซ้ายในสตรมภ์สุดแสดงภาพต้นฉบับ ภาพในสตรมภ์กลางแสดงชุดของจุดพีเจอร์สองมิติที่สกัดจากภาพต้นฉบับด้วยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ และ ภาพในสตรมภ์สุดท้ายแสดงแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ปรับเหมาะและปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณให้เข้ากับชุดของจุดพีเจอร์ในสตรมภ์กลาง



รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์การปรับเหมาะและปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณของหน้าเห็นเกิน 10 องศา
ไม่เกิน 10 องศา และหน้าตรงตามลำดับ

4.3.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการประมวลผลของการค้นหาแบบผกผันโดยไม่เปลี่ยนแปลงจำนวนรอบของการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณแบบเชิงเส้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดของแบบจำลองที่ปรับเหมาะได้ลดลงแบบเชิงเส้นสำหรับใบหน้าในทุก ๆ มุมหัน โดยสามารถลดค่าความผิดพลาดของใบหน้าที่หันเกินกว่า 10 องศาได้ดีที่สุด (ค่าความผิดพลาดลดลงด้วยความชันมากที่สุด) อย่างไรก็ตามก็ต้องสูญเสียระยะเวลาประมวลผลที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) ด้วย

โดยจากการทดลองยังพบว่า การปรับปรุงรูปร่างแบบจำลองเฉพาะบริเวณยังสามารถลดค่าความผิดพลาดของแบบจำลองลงได้อีกโดยไม่ได้สูญเสียระยะเวลาการประมวลผลเพิ่มขึ้นจากเดิมมากนัก (เมื่อเทียบกับการค้นหาแบบฟ่อนปรนเพียงอย่างเดียว) แต่ก็สังเกตเห็นได้ชัดเจนเช่นกันว่าโดยรวมแล้วแม้ว่าจะเพิ่มจำนวนการปรับปรุงเฉพาะบริเวณอีกเท่าตัวก็ยังไม่สามารถลดค่าความผิดพลาดของแบบจำลองลงได้ดีกว่าการเพิ่มจำนวนการค้นหาแบบฟ่อนปรนอีกหนึ่งเท่าตัว กล่าวคือการค้นหาแบบฟ่อนปรนสามารถปรับปรุงองค์ประกอบท่าทาง (Pose) ของแบบจำลองใบหน้าให้ใกล้เคียงกับจุดพีเจอร์สองมิติได้ดีขึ้น ในขณะที่การปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณเป็นการปรับปรุงเฉพาะข้อมูลรูปร่างโดยไม่มีแก้ไขท่าทางของแบบจำลองซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการปรับปรุงเฉพาะบริเวณสามารถลดค่าความผิดพลาดลงได้อีกจากการค้นหาแบบฟ่อนปรนแสดงถึงการปรับปรุงรูปร่างที่ทำให้ได้ดีกว่าการค้นหาแบบฟ่อนปรนเพียงอย่างเดียว

4.4 การทดลองวัดความถูกต้องของรูปร่างใบหน้าสามมิติ

กระบวนการรวมข้อมูลรูปร่างทั้งด้านลึกและด้านกว้างของแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ได้จากชุดภาพรับเข้าเป็นแบบจำลองเดี่ยวเพื่อแทนลักษณะของรูปร่างใบหน้าบุคคลหนึ่ง ๆ โดยใช้กระบวนการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักดังอธิบายในหัวข้อ 3.3.4.1 ซึ่งการทดลองนี้จัดทำเพื่อทดสอบความแม่นยำของรูปร่างสามมิติที่ได้จากการกระบวนการรวมด้วยการหาค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันสองแบบ คือ ค่าเฉลี่ยทุกภาพ และ ค่าเฉลี่ยแบบตัดกลุ่มข้อมูลรูปร่างที่มีความผิดพลาดของการปรับเหมาะแบบจำลองเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 ดังที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

4.4.1 วิธีการทดลอง

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่

1. ชุดข้อมูลรูปร่างสามมิติของใบหน้า (3D Shape Data Set) ที่ได้จากกระบวนการรวมข้อมูลรูปร่างสามมิติของใบหน้าจากชุดภาพที่ได้จากกระบวนการปรับเหมาะแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธีฟ่อนปรนไม่เกิน 100 รอบ และ ปรับปรุงรูปร่างใบหน้าเฉพาะบริเวณไม่เกิน 100 รอบ โดยนำมาเฉลี่ยรวมเก็บไว้ชุดหนึ่ง และ เฉลี่ยแบบตัดข้อมูลที่มีความผิดพลาดจากการปรับเหมาะเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 เก็บไว้อีกชุดหนึ่งสำหรับทดสอบความถูกต้อง
2. ชุดข้อมูลใบหน้าที่ทดสอบ (Validation Set) เป็นชุดภาพที่มาจากฐานข้อมูลเดียวกันกับข้อ 1 โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เลือกมาจากชุดที่ใช้สร้าง

แบบจำลอง (Seen Data) และชุดที่ไม่ผ่านการนำมาสร้างแบบจำลองมาก่อน (Unseen Data) แต่ละชุดบรรจุชุดภาพบุคคลที่มีในข้อมูลรูปร่างในข้อ 1 ทั้งหมด แต่ละชุดประกอบด้วยภาพหน้าตรง หน้าหันไม่เกิน 10 องศา และหน้าหันเกิน 10 องศา อย่างละ 5 ภาพ

การเตรียมข้อมูลทดสอบจะนำภาพทั้งหมดมาผ่านกระบวนการสกัดตำแหน่งจุดพีเจอร์สองมิติด้วยแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์สำหรับทดสอบความถูกต้องของรูปร่างแบบจำลองที่ได้ โดยกระบวนการทดสอบเป็นไปตามลำดับดังนี้

1. สำหรับแต่ละภาพบุคคลทดสอบ $I_{vi}, i = 0..14$ นำค่าตัวแปรค่าทางไปสั่งให้แบบจำลองรูปร่างใบหน้าสามมิติ S ของบุคคลนั้นมีท่าทาง ขนาด และตำแหน่งตรงกับในภาพพอดี
2. วัดค่าเฉลี่ยของระยะทางแบบยูคลิเดียน d_i ระหว่างจุดมุมทุกคู่ระหว่างแบบจำลองใบหน้าสามมิติ S และชุดจุดพีเจอร์สองมิติที่สกัดได้จากภาพทดสอบ S_{vi} โดยจุดบันทึกค่าความแม่นยำแยกในแต่ละท่าทางของใบหน้าด้วย
3. เมื่อประมวลผลครบทุกภาพทดสอบสำหรับบุคคลนั้น ๆ แล้ว หาค่าเฉลี่ยระยะทางต่อบุคคล แล้วจุดบันทึก

4.4.2 ผลการทดลอง

การทดลองเปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยระหว่างรูปร่างสามมิติที่ประกอบขึ้นและรูปร่างจากภาพใบหน้าทดสอบสำหรับบุคคลเดียวกันให้ผลดังตารางที่ 4.6 โดยค่าที่แสดงในตารางมีหน่วยเป็นจุดภาพต่อภาพต่อหนึ่งบุคคล

ตารางที่ 4.6 ผลเปรียบเทียบความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างรูปร่างสามมิติและภาพหน้ามุมต่าง ๆ

ความผิดพลาดระยะทางระหว่างรูปร่างสามมิติและภาพหน้ามุมต่าง ๆ			วิธีรวมข้อมูลรูปร่าง	
			เฉลี่ยรวม	เฉลี่ยตัด Q3 ขึ้นไป
ผลทดสอบกับชุดข้อมูลที่ไม่เคยเห็น (Unseen Data)	ภาพหน้าตรง	เฉลี่ย	7.0800	7.0531
		เบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.8022	4.8001
	ภาพหน้าหัน < 10°	เฉลี่ย	7.2896	7.2581
		เบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.1777	4.1828
	ภาพหน้าหัน >=	เฉลี่ย	7.7829	7.6429

	10°	เบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.3651	3.0075
	รวมทุกมุม	ต่ำสุด / สูงสุด	4.10 / 28.80	4.11 / 28.81
		เฉลี่ย	7.4746	7.4412
		เบี่ยงเบน มาตรฐาน	4.2352	4.2412
ผลทดสอบกับ ชุดข้อมูลที่ใช้ สร้าง แบบจำลอง (Training Set)	ภาพหน้าตรง	เฉลี่ย	7.1500	7.0931
		เบี่ยงเบน มาตรฐาน	4.7022	4.8403
	ภาพหน้าหัน < 10°	เฉลี่ย	7.2810	7.2200
		เบี่ยงเบน มาตรฐาน	4.27011	4.2215
	ภาพหน้าหัน >= 10°	เฉลี่ย	7.6541	7.6033
		เบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.4075	3.1150
	รวมทุกมุม	ต่ำสุด / สูงสุด	3.78 / 26.65	4.21 / 28.90
		เฉลี่ย	7.4533	7.4332
		เบี่ยงเบน มาตรฐาน	4.2178	4.1305

4.4.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า การเฉลี่ยรวมทำให้รูปร่างใบหน้าสามมิติที่ได้มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเมื่อเทียบกับการเฉลี่ยโดยตัดกลุ่มข้อมูลที่ความผิดพลาดจากการปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติเข้ากับจุดพีเจอร์เกินกว่าควอไทล์ที่ 3 สูงกว่าทั้งมุมใบหน้าหันตรง ใบหน้าหันมุมต่ำกว่า 10 องศา และมุมใบหน้าหันเกินกว่า 10 องศา แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดจากกระบวนการปรับเหมาะใบหน้าสามมิติเข้ากับจุดพีเจอร์สองมิติที่สกัดได้จากภาพมีผลโดยตรงต่อความผิดพลาดของรูปร่างแบบจำลองใบหน้าที่ได้ เนื่องจากเมื่อตัดกลุ่มข้อมูลที่มีค่าความผิดพลาด

จากการปรับเหมาะสูงออกไปก่อนการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักจะทำให้แบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น

แม้ว่าการตัดข้อมูลส่วนที่ผิดพลาดออกไปจากการรวมจะสามารถลดความผิดพลาดของรูปร่างใบหน้าสามมิติที่ได้แต่ก็ยังไม่มากนัก เนื่องจากค่าความผิดพลาดของแบบจำลองสามมิติที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความผิดพลาดของการปรับเหมาะแบบจำลองแต่ละภาพ ความถูกต้องของข้อมูลความลึกและด้านกว้างที่ได้จากการถ่วงน้ำหนัก และบทบาทของข้อมูลส่วนที่สร้างความผิดพลาดอาจจะไม่ถูกลดทอนลงโดยค่าถ่วงน้ำหนักมากนัก ทำให้รูปร่างของแบบจำลองสามมิติที่ได้มีค่าความผิดพลาดลดลงไม่มากนักเมื่อตัดข้อมูลโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดจากการปรับเหมาะแบบจำลองเพียงอย่างเดียว

4.5 การทดลองวัดความถูกต้องของพื้นผิวใบหน้าสามมิติ

พื้นผิวที่ได้จากกระบวนการรวมพื้นผิวโดยการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักดังอธิบายใน 3.3.4.2 สามารถทดสอบความถูกต้องได้โดยใช้วิธีเดียวกันกับการทดสอบความถูกต้องของรูปร่างแบบจำลองสามมิติของบุคคลที่ได้ กล่าวคือเป็นการทดสอบความใกล้เคียงระหว่างจุดสีที่ได้จากภาพฉายของแบบจำลองใบหน้าสามมิติกับชุดภาพทดสอบซึ่งเป็นชุดเดียวกันกับที่ใช้ทดลองวัดความถูกต้องของรูปร่างใบหน้าสามมิติ ซึ่งเป้าหมายของการทดลองนี้คือเพื่อทดสอบความถูกต้องของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติที่ประกอบขึ้นเมื่อเทียบกับชุดภาพใบหน้าบุคคลนั้น ๆ แบบจุดภาพต่อจุดภาพ

4.5.1 วิธีการทดลอง

ใช้ชุดข้อมูลพื้นผิวของใบหน้าที่ได้จากกระบวนการรวม และ ชุดข้อมูลทดสอบชุดเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง 4.4 ทุกประการ โดยแบ่งชุดข้อมูลพื้นผิวของใบหน้าที่ใช้ประกอบเข้ากับแบบจำลองรูปร่างออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ได้จากการเฉลี่ยรวม และ ชุดที่ได้จากการเฉลี่ยแบบตัดส่วนที่เกินควอไทล์ที่ 3 ออกไป โดยลำดับขั้นการทดลองวัดค่าความถูกต้องของพื้นผิวที่ได้เป็นดังนี้

1. สำหรับแต่ละภาพบุคคลทดสอบ $I_{vi}, i = 0..14$ นำค่าตัวแปรค่าทางไปสั่งให้แบบจำลองรูปร่างใบหน้าสามมิติ S ของบุคคลนั้นมีท่าทาง ขนาด และตำแหน่งตรงกับในภาพพอดี แล้วประกอบพื้นผิวลงบนแบบจำลองรูปร่างนั้น
2. ฉายแบบจำลองที่ประกอบพื้นผิวแล้วลงบนระนาบสองมิติ จะได้ภาพใบหน้าที่มีลักษณะการวางตำแหน่งใกล้เคียงกับภาพทดสอบ

3. วัดค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดระหว่างสีของจุดภาพใบหน้าในภาพทดสอบ S_{vi} และจุดภาพจากภาพถ่ายของแบบจำลอง ดังสมการ (4.1)

$$diff(I, I_v) = \frac{1}{M} \sum_{(x,y)} \left| \frac{I_v(x,y) - I(x,y)}{I_v(x,y)} \right| \quad (4.1)$$

เมื่อ I แทน ภาพถ่ายจากแบบจำลอง
 I_v แทน ภาพทดสอบ
 $I(x,y)$ แทน ค่าเฉลี่ยของจุดสีในรูปแบบ RGB ที่ตำแหน่ง (x,y) ของภาพ I
 M แทน จำนวนจุดภาพทั้งหมดที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

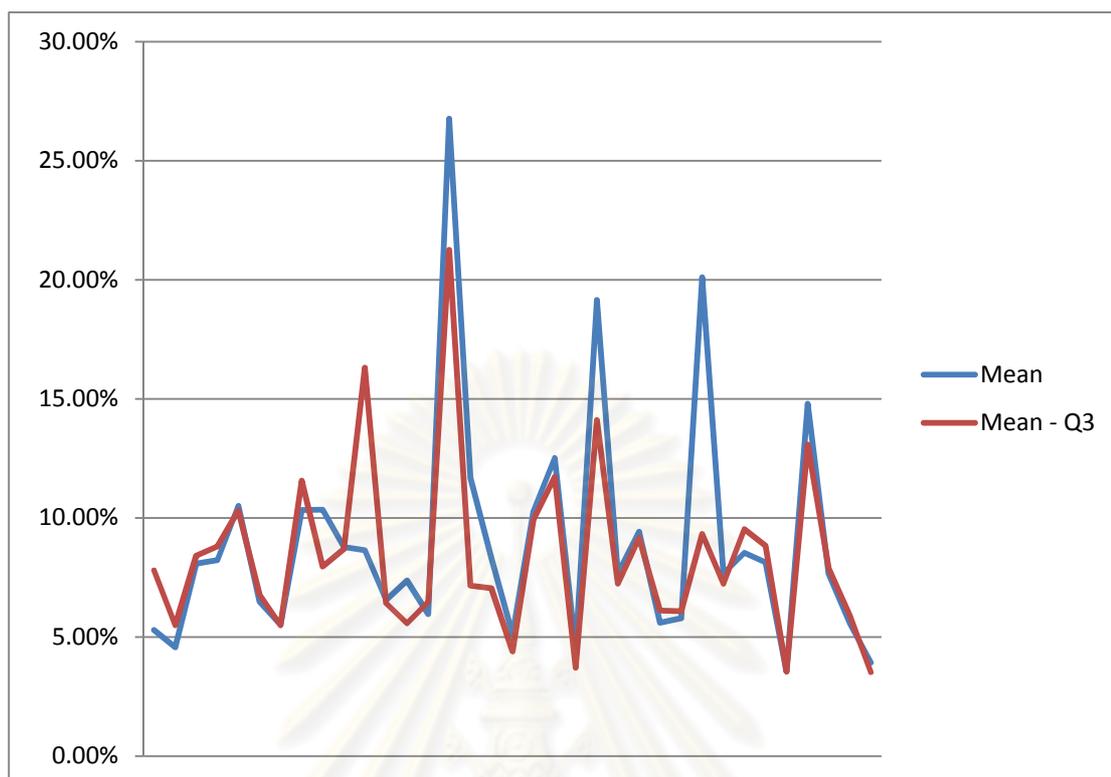
4. เมื่อประมวลผลครบทุกภาพทดสอบสำหรับบุคคลนั้น ๆ แล้ว หาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดต่อบุคคล แล้วจัดบันทึก

4.5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองวัดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยของพื้นผิวแยกเป็นรายบุคคลแสดงเทียบกันระหว่างการเฉลี่ยรวมและการเฉลี่ยโดยตัดชุดข้อมูลที่มีค่าความผิดพลาดจากการปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติเข้ากับจุดพีเจอร์เกินกว่าควอไทล์ที่ 3 เป็นดังรูปที่ 4.13 และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่อบุคคลจากชุดข้อมูลทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความผิดพลาดของพื้นผิวแบบจำลองต่อบุคคล

ค่าความผิดพลาดของพื้นผิว		เฉลี่ยรวม	เฉลี่ยตัด Q3 ขึ้นไป
ผลทดสอบกับชุดข้อมูลทดสอบที่ไม่เคยเห็น (Unseen Data)	ต่ำสุด / สูงสุด	3.55 % / 26.76%	3.52 % / 21.25 %
	เฉลี่ย	8.95 %	8.36 %
	เบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.87 %	3.67 %
ผลทดสอบกับชุดข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลอง (Training Set)	ต่ำสุด / สูงสุด	3.27 % / 22.36%	3.19 % / 21.13 %
	เฉลี่ย	8.73 %	8.39 %
	เบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.63 %	3.35 %

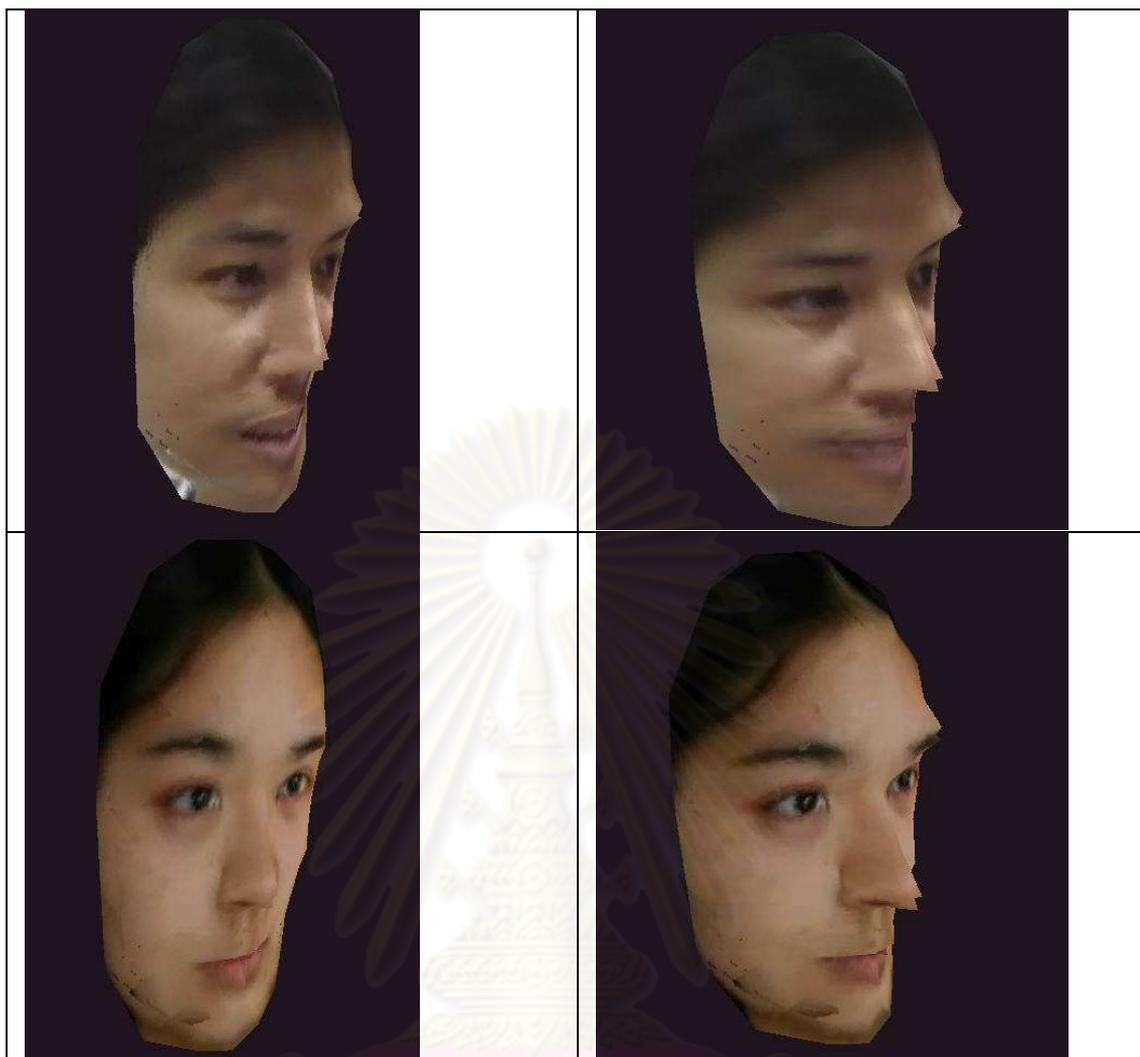


รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของพื้นผิวจากตัวอย่างรายบุคคล

นอกจากนี้ผลเปรียบเทียบใบหน้ามุมเดียวกันที่ได้จากวิธีการรวมพื้นผิวที่แตกต่างกันเป็นดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบใบหน้าสามมิติที่ได้จากการรวมพื้นผิวสองวิธี

ผลจากการเฉลี่ยรวม	ผลจากการเฉลี่ยตัดค่าเกิน Q3
	



4.5.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าผลที่ได้จากการเฉลี่ยโดยตัดข้อมูลที่ความผิดพลาดจากการปรับเหมาะเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 มีความผิดพลาดของพื้นผิวโดยเฉลี่ยที่ต่ำกว่าการเฉลี่ยรวมทั้งหมด โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาเป็นรายบุคคลแล้วพบว่าแบบจำลองใบหน้าบุคคลใดที่สร้างโดยใช้ค่าเฉลี่ยแบบตัดค่าที่เกินควอไทล์ที่ 3 ทั้งแล้วให้ความผิดพลาดพื้นผิวส่วนใหญ่ต่ำกว่าการเฉลี่ยรวม อีกทั้งยังมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดที่ต่ำกว่าด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการประกอบแบบจำลองสามมิติโดยตัดค่าเกินควอไทล์ที่ 3 ทั้งไปก่อนเฉลี่ยจะลดความผิดพลาดของผลลัพธ์ได้ทั้งรูปร่างและพื้นผิว

เมื่อพิจารณาร่วมกับผลจากการทดลอง 4.4 จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าความผิดพลาดของการปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์มีผลต่อการประกอบแบบจำลองสามมิติในภายหลัง โดยจากการทดลองวัดค่าความผิดพลาดของรูปร่างและพื้นผิวพบว่า การตัดข้อมูลส่วนที่มีความผิดพลาดสูงเกินควอไทล์ที่ 3 ทั้งไปก่อนคำนวณช่วยลดค่าความ

ผิดพลาดทั้งสองได้โดยไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาดเพิ่มเติมในทุกกรณี ดังนั้นจึงเป็นข้อสนับสนุนการถ่วงน้ำหนักให้แก่ข้อมูลที่มีความแม่นยำของการปรับเหมาะที่สูงด้วยค่าน้ำหนักที่สูงกว่าด้วย เพื่อลดบทบาทของข้อมูลส่วนที่ปรับเหมาะอย่างคลาดเคลื่อนลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบางตัวอย่างจากในตารางที่ 4.8 จะเห็นว่ารูปร่างที่ผิดเพี้ยนส่งผลให้ความผิดพลาดของพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากมีผลต่อกันโดยตรง ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมที่จะเลือกใช้วิธีการรวมข้อมูลทั้งด้านพื้นผิวและรูปร่างด้วยการเฉลี่ยแบบตัดข้อมูลส่วนที่เกินควอไทล์ที่ 3 ออกไปก่อนเพื่อความถูกต้องของผลลัพธ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้สรุปรายละเอียดและผลการดำเนินการวิจัยการจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติจากกล้องเดี่ยวที่อยู่หนึ่ง ตั้งแต่ขั้นตอนการคัดเลือกบริเวณของใบหน้าจากภาพรับเข้า การสกัดข้อมูลรูปร่างใบหน้าจากภาพ และการรวมข้อมูลทั้งรูปร่างสามมิติและพื้นผิวเป็นแบบจำลองใบหน้าสามมิติผลลัพธ์ และข้อเสนอแนะ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ฐานข้อมูลสำหรับใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชุดภาพจากฐานข้อมูล MIT-CBCL และชุดภาพใบหน้าบุคคลที่บันทึกจากกล้องเว็บแคม Sony MotionEye® ที่อยู่หนึ่ง ความละเอียดของภาพทั้งหมดที่ใช้เป็น 640×480 จุดภาพ โดยประกอบไปด้วยภาพใบหน้าบุคคลที่หันหน้ารอบแกนตั้ง (ลำคอ) ระหว่างมุมไม่เกิน ± 45 องศา โดยกระบวนการทั้งหมดที่เสนอในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการอัตโนมัติโดยตลอดตั้งแต่กระบวนการค้นหาบริเวณใบหน้าแต่ละภาพจนถึงกระบวนการประกอบข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวขึ้นเป็นแบบจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติ

ก่อนการประมวลผลแต่ละภาพจะนำมอดทอนความผิดพลาดของรูปร่างที่เกิดจากลักษณะเฉพาะตัวของเลนส์ก่อนเพื่อให้องค์ประกอบในภาพมีอัตราส่วนของรูปร่างใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดเสียก่อน จากนั้นนำมาคัดเลือกบริเวณใบหน้าจากภาพโดยใช้แบบจำลองสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างขึ้นจากปริภูมิสี่ TSL โดยหลังจากนี้การประมวลผลภาพใบหน้าจะกระทำต่อบริเวณใบหน้าที่คัดเลือกจากขั้นตอนนี้เท่านั้น ซึ่งการตรวจหาบริเวณใบหน้าด้วยแบบจำลองสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้จะสามารถทดแทนวิธีการตรวจหาใบหน้าวิธีอื่น ๆ ที่มีการคำนวณสูงกว่า อีกทั้งยังมีความแม่นยำของการตรวจหาใบหน้าดีกว่าการใช้แบบจำลองสี่เหลี่ยมแบบจุดอย่างมีนัยยะสำคัญด้วย

ข้อมูลรูปร่างสองมิติของใบหน้าจากบริเวณใบหน้าที่คัดเลือกได้สกัดได้โดยใช้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ ซึ่งจะได้ข้อมูลรูปร่างใบหน้าในรูปของชุดของตำแหน่งจุดพีเจอร์สองมิติตามลำดับและนิยามที่ได้สอนแบบจำลองเอาไว้ก่อนหน้า จากนั้นชุดจุดพีเจอร์ดังกล่าวจะนำมาปรับเหมาะด้วยแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE ที่ผ่านการซัปดิวิชันด้วยวิธี Triangular Subdivision และเพิ่มเติมหน่วยกระทำเฉพาะจุด โดยใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรนเพื่อค้นหาท่าทางและรูปร่างโดยคร่าวของใบหน้าจากภาพดังกล่าว ก่อนจะปรับรูปร่างเฉพาะบริเวณอีก

ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่ารูปร่างของแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ได้มีความแม่นยำใกล้เคียงกับใบหน้าจากภาพมากที่สุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ลดความซับซ้อนของการสกัดข้อมูลใบหน้าสามมิติจากภาพโดยทั่วไปที่ต้องพิจารณาพื้นผิวทั้งหน้าเหลือเพียงคำนวณหาจุดพีเจอรและส่งผ่านไปสู่วางแบบจำลองสามมิติโดยตรงซึ่งใช้การคำนวณที่ซับซ้อนน้อยลงและมีความแม่นยำสูง

จากชุดภาพของบุคคลหนึ่ง ๆ จากฐานข้อมูลจะได้ชุดของแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่สกัดได้จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้น แต่ข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวจากชุดข้อมูลดังกล่าวจะมีอยู่ในแต่ละภาพไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดและค่าของมุมหันของใบหน้าด้วย ดังนั้นการรวมข้อมูลรูปร่างสามมิติของใบหน้าซึ่งประกอบด้วยข้อมูลด้านกว้างและด้านลึกจะอาศัยการพิจารณาจากมุมหันเป็นหลัก โดยให้มุมหน้าหันตรงมีข้อมูลด้านกว้างของใบหน้าสามมิติสูงสุดแต่ไม่มีข้อมูลด้านลึก และมุมใบหน้าที่หันด้วยมุมสูงสุดมีข้อมูลด้านลึกสูงสุดแต่มีข้อมูลด้านกว้างน้อยที่สุด จากข้อสมมติฐานดังกล่าวจึงทำให้การรวมข้อมูลรูปร่างใช้วิธีเฉลี่ยโดยตัดข้อมูลที่มีความผิดพลาดจากการปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 ออกไปก่อน และถ่วงน้ำหนักของข้อมูลด้านกว้างและด้านลึกดังที่กล่าวข้างต้น โดยลดทอนบทบาทของข้อมูลที่มีความผิดพลาดจากการปรับเหมาะสูงด้วยการกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าน้อย ในขณะที่การรวมข้อมูลพื้นผิวใช้แนวคิดเดียวกันกับการรวมข้อมูลรูปร่าง กล่าวคือจะตัดข้อมูลส่วนที่มีความผิดพลาดจากการปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอรเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 ออกไปก่อนแล้วถ่วงน้ำหนักค่าเฉลี่ยโดยใช้มุมหันของใบหน้าเป็นตัวกำหนด กล่าวคือ มุมหน้าตรงจะมีข้อมูลพื้นผิวด้านหน้าตรงสูงกว่าจึงถ่วงน้ำหนักด้วยค่าที่สูงกว่า และมุมหน้าที่หันข้างจะมีข้อมูลพื้นผิวฝั่งที่หันให้เห็นสูงกว่าก็จะถ่วงน้ำหนักด้านดังกล่าวนั้นด้วยค่าที่สูงกว่าเช่นกัน ผลการรวมข้อมูลพื้นผิวด้วยวิธีการนี้จะได้ข้อมูลครบทุกมุมมองของใบหน้าโดยมีความต่อเนื่องของพื้นผิว ไม่ปรากฏรอยของความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวที่ได้และเมื่อนำข้อมูลพื้นผิวดังกล่าวมาประกอบเข้ากับรูปร่างสามมิติก็จะได้แบบจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติตามต้องการ

5.2 การคัดเลือกบริเวณใบหน้าจากภาพ

งานวิจัยนี้เสนอการใช้แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่สำหรับคัดเลือกบริเวณใบหน้าจากภาพ โดยเป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากปริภูมิสี T-S ซึ่งตัดองค์ประกอบความส่องสว่าง L ออกไปเพื่อให้แบบจำลองสีผิวสามารถกรองสีผิวได้โดยไม่ขึ้นกับสภาพแสง โดยพิจารณารองบริเวณในภาพที่มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสีอยู่นอกช่วงที่เก็บบันทึกเอาไว้ในแบบจำลองสีผิวออกไปเนื่องจากถือว่าไม่ใช่บริเวณสีผิว ผลที่ได้จะเป็นกลุ่มของบริเวณสีผิวหรือใกล้เคียงย่อย ๆ

หลายกลุ่มในภาพโดยจะใช้วิธีการปรับเหมาะรูปร่างของแต่ละบริเวณด้วยวงรี กลุ่มสี่เหลี่ยมที่มีค่าความผิดพลาดระหว่างวงรีและขอบจริงต่ำที่สุดจะได้รับการคัดเลือกเป็นบริเวณใบหน้า

โดยทั่วไปการใช้แบบจำลองสี่เหลี่ยมเพื่อหาบริเวณใบหน้าจากภาพเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาประมวลผลไม่มากนักหากเทียบกับการใช้พีเจอร์อื่นบนใบหน้าที่ต้องอาศัยขั้นตอนวิธีที่แม่นยำในการตรวจหาองค์ประกอบบนใบหน้าซึ่งจำเป็นต้องประมวลผลซับซ้อนกว่า ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้แนวคิดการพิจารณาสี่เหลี่ยมเป็นบริเวณแทนที่จะพิจารณาเพียงจุดภาพเดียวซึ่งพบว่าความแม่นยำของการตรวจหาบริเวณสี่เหลี่ยมสูงชันอันจะเห็นได้จากอัตราการตรวจพบใบหน้าที่ถูกต้องมีค่าสูงกว่าการใช้แบบจำลองสี่เหลี่ยมแบบจุดเดียว

5.3 การสกัดข้อมูลรูปร่างใบหน้าและการปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติ

งานวิจัยนี้พยายามให้ข้อมูลรูปร่างใบหน้าสองมิติจากภาพเป็นชุดของพิกัดจุดพีเจอร์สองมิติที่มีลำดับและตำแหน่งบนใบหน้าที่ชัดเจนตายตัว ซึ่งขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมสำหรับการสกัดข้อมูลดังกล่าวจากบริเวณใบหน้าจากภาพคือการใช้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ซึ่งมีความยืดหยุ่นและคงทนต่อสภาพรบกวนภายในภาพสูง โดยลำดับของกระบวนการสกัดข้อมูลรูปร่างและปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเพื่อให้ได้พิกัดของจุดต่าง ๆ บนใบหน้าในปริภูมิสามมิติเป็นดังนี้

1. ใช้แบบจำลองรูปร่างกัมมันต์ที่สอนไว้แล้วสกัดชุดพิกัดของจุดพีเจอร์บนใบหน้า
2. ปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติที่ซับซ้อนและเพิ่มชุดหน่วยกระทำเฉพาะจุดไว้แล้วเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์ที่สกัดได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบผกผันคลาย ซึ่งเป็นการค้นหาตามทิศทางารลดลงของค่าฟังก์ชันความผิดพลาดระหว่างจุดพีเจอร์และจุดมุมของแบบจำลองที่ขยาลงบนระนาบสองมิติ สลับกับการค้นหาตัวแปรที่เหมาะสมกว่ารอบ ๆ ตัวแปรปัจจุบันเพื่อป้องกันการติดอยู่ในบริเวณจุดต่ำสุดเฉพาะบริเวณของฟังก์ชัน
3. ปรับปรุงรูปร่างแบบจำลองเฉพาะบริเวณโดยการเลือกปรับกลุ่มของจุดมุมที่ให้ค่าความผิดพลาดสูงก่อน

โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ฟังก์ชันค่าความผิดพลาดระหว่างจุดมุมของแบบจำลองและจุดพีเจอร์เป็นการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของค่าระยะทางแบบยูคลิเดียน โดยกำหนดให้น้ำหนักของจุดสำคัญบนใบหน้ามีค่าสูงกว่า กล่าวคือ จุดที่แสดงถึงโครงสร้างหลักบนใบหน้าจะได้รับการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าที่สูงกว่า เช่น จุดบนโครงหน้าทั้งหมด มุมปาก จมูก จะมีค่าน้ำหนักสูงกว่าจุดย่อย ๆ บนคิ้ว บนขอบดวงตา เป็นต้น

นอกจากนี้เมื่อใบหน้ามีการหมุนจนกระทั่งขอบของแบบจำลองถูกบดบังโดยบริเวณแก้มจะต้องมีการปรับเปลี่ยนคู่เทียบจากขอบเดิมมาเป็นจุดบนแก้มแทนเพราะว่าตำแหน่งดังกล่าวจะมีตำแหน่งสอดคล้องกับจุดพีเจอร์ที่สกัดได้แทน

จากการทดลองในส่วนนี้ของงานวิจัยสรุปได้ว่าการปรับเหมาะแบบจำลองโดยใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาพารามิเตอร์แบบผ่อนคลายเป็นการค้นหาค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ทำให้ท่าทางและรูปร่างโดยคร่าวตรงกับรูปใบหน้ามากที่สุดด้วยขอบเขตความพยายามที่เท่ากันกับขั้นตอนวิธีอื่น ๆ แต่ยังไม่ใช่วิธีที่ใช้ระยะเวลาประมวลผลต่ำที่สุด โดยที่จำเป็นจะต้องใช้การปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณเพื่อลดความผิดพลาดของรูปร่างแบบจำลองใบหน้าที่ได้ซึ่งขั้นตอนวิธีนี้จะทำได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการค้นหาตัวแปรแบบผ่อนคลายเป็นและยังใช้ระยะเวลาประมวลผลที่ไม่มากนัก อย่างไรก็ตามการปรับปรุงรูปร่างเฉพาะบริเวณมีความสามารถในการแก้ไขรูปร่างเท่านั้นไม่สามารถแก้ไขท่าทางของใบหน้าได้

ประโยชน์ของการสกัดรูปร่างใบหน้าสามมิติจากภาพด้วยกระบวนการนี้ทำให้ได้รูปร่างและท่าทางของใบหน้าโดยใช้การคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมากนักเนื่องจากแบบจำลองรูปร่างกัมมันต์พิจารณาเพียงรูปร่างของวัตถุในภาพโดยไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ระดับสีของพื้นผิวในภาพ นอกจากนี้การส่งผ่านจุดพีเจอร์สองมิติไปสู่แบบจำลองรูปร่างใบหน้าสามมิติด้วยขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบผ่อนปรนยังมีความแม่นยำสูงอีกด้วย

5.4 การรวมข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวของใบหน้าสามมิติ

การรวมข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวใบหน้าจากชุดข้อมูลเป็นการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักโดยขึ้นกับปริมาณข้อมูลรูปร่างและพื้นผิวด้านที่เหมาะสมที่ปรากฏในแต่ละภาพด้วย กล่าวคือภาพใบหน้าหันตรงจะแสดงข้อมูลรูปร่างด้านกว้างและพื้นผิวใบหน้าด้านตรงที่มากกว่า ก็จะได้รับ การถ่วงน้ำหนักในการเฉลี่ยด้วยค่าสูง ในขณะที่ภาพใบหน้าหันข้างจะมีข้อมูลรูปร่างด้านลึกและพื้นผิวใบหน้าด้านที่หันออกสู่กล้องที่มากกว่า ก็จะได้รับ การถ่วงน้ำหนักข้อมูลส่วนนั้นด้วยค่าสูง เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการรวมมีข้อมูลในส่วนที่ถูกต้องประกอบอยู่มากตามอัตราส่วนข้างต้น โดยก่อนการเฉลี่ยจำเป็นต้องตัดข้อมูลทั้งรูปร่างและพื้นผิวส่วนที่มีความผิดพลาดจากการปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอร์สูงเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 ขึ้นไปก่อน ซึ่งจากการทดลองพบว่าทำให้ค่าความผิดพลาดทั้งด้านรูปร่างและพื้นผิวมีค่าต่ำลงได้ อีกทั้งแบบจำลองใบหน้าสามมิติผลลัพธ์ที่ได้ก็ยังมีลักษณะสมจริงมากกว่าด้วย

5.5 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคตแยกประเด็นในส่วนต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

5.5.1 ข้อเสนอแนะในส่วนแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่

ขั้นตอนวิธีคัดเลือกใบหน้าโดยใช้แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่และการปรับเหมาะด้วยวงรี ยังคงมีอัตราการตรวจพบใบหน้าที่ต้องไม่มากนักซึ่งอาจจะยังสามารถหาวิธีปรับปรุงเพิ่มเติม ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการคัดเลือกใบหน้าด้วยพีเจอรอินเสริมเข้าไปอีกเพราะเวลาประมวลผลของแบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่ไม่มากนักจึงน่าจะสามารถเพิ่มความซับซ้อนของการประมวลผลอีกเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความแน่นอนของการตรวจหาบริเวณใบหน้าเข้าไปอีกได้

นอกจากนี้วิธีการตรวจหาใบหน้าโดยใช้แบบจำลองสีผิวเชิงพื้นที่จะไม่ได้ผลหากพื้นหลังของรูปมีสีใกล้เคียงกับสีผิว หรือมีวัตถุ ลวดลาย หรือสภาพแสงที่ทำให้การกรองสีผิวไม่ได้ผล ดังนั้นถ้าเป็นไปได้อาจจะสามารถใช้ขั้นตอนวิธีการตรวจหาใบหน้าสำรองในกรณีดังกล่าว ด้วยเพื่อให้ข้อจำกัดของงานกว้างขึ้นได้

5.5.2 ข้อเสนอแนะในส่วนการปรับเหมาะแบบจำลองสามมิติ

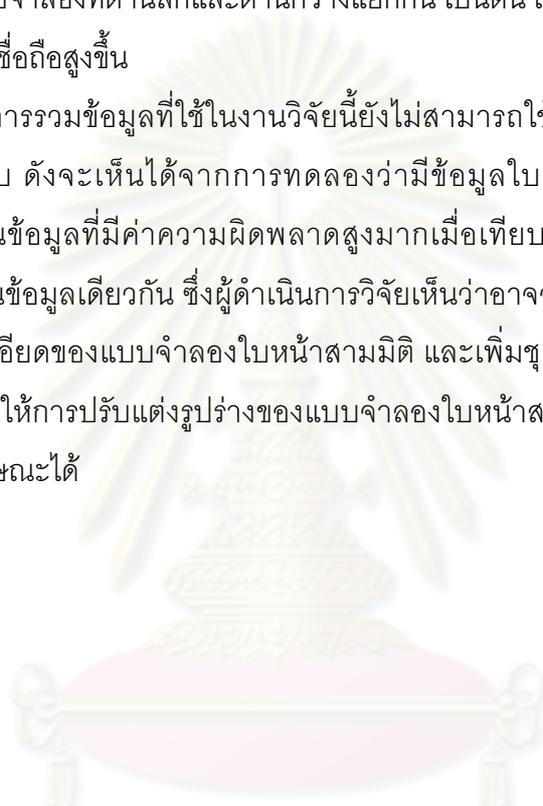
1. วิธีการค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบผอนคลายยังสามารถปรับปรุงให้ใช้ระยะเวลาลดลงได้อีกหากการค้นหาตัวแปรเพิ่มเติมหลังรอบการค้นหาแบบลงทางลาดชันลึกลงมีวิธีเลือกเส้นทางที่ดีกว่าการทดลองแทนตัวแปรรอบ ๆ ทั้งหมด ซึ่งเสียระยะเวลาทดสอบนานกว่า
2. ยังมีขั้นตอนวิธีการค้นหาที่ลู่เข้าคำตอบได้เร็วกว่าขั้นตอนวิธีลงทางลาดชันที่สุดที่เป็นแกนของการค้นหาแบบผอนคลายในงานวิจัยนี้ คือ ขั้นตอนวิธีของนิวตัน (Newton's Method) แต่มีการคำนวณที่ซับซ้อนกว่าวิธีการลงทางลาดชันที่สุด ซึ่งอาจจะให้คำตอบที่ดีกว่าในจำนวนรอบที่เท่ากันได้
3. การปรับตัวแปรในงานวิจัยนี้เป็นการปรับแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ซึ่งอาจจะข้ามตัวแปรที่ถูกต้องมากกว่าไปในกระบวนการค้นหา ดังนั้นหากต้องการผลการค้นหาที่แม่นยำอย่างสูงจำเป็นจะต้องปรับค่าละเอียดมากขึ้นเพื่อให้ใกล้เคียงกับการค้นหาบนค่าต่อเนื่องซึ่งอาจจะได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องสูงขึ้นแต่จะต้องแลกกับระยะเวลาการประมวลผลที่มากขึ้นตามไปด้วย

5.5.3 ข้อเสนอแนะในส่วนการรวมข้อมูลรูปร่างและพื้นผิว

1. แม้ว่าการตัดข้อมูลส่วนที่มีค่าความผิดพลาดจากการปรับเหมาะสูงเกินกว่าควอไทล์ที่ 3 ทิ้งไปจะช่วยเพิ่มความถูกต้องของแบบจำลองทั้งรูปร่างและพื้นผิวได้ก็

ตาม แต่ในบางครั้งข้อมูลส่วนที่สำคัญอาจจะสูญหายไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากปรับปรุงให้การปรับเหมาะแบบจำลองมีความแม่นยำสูงขึ้นแล้ว อาจไม่จำเป็นต้องตัดข้อมูลใด ๆ ออก ทำให้แบบจำลองที่ประกอบขึ้นไม่สูญเสียข้อมูลไปได้

2. ฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักยังสามารถหาวิธีปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ ซึ่งอาจจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมมากขึ้น เช่น ความถูกต้องจากการปรับเหมาะแบบจำลองที่ด้านลึกและด้านกว้างแยกกัน เป็นต้น เพื่อให้การถ่วงน้ำหนักมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น
3. วิธีการรวมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถใช้งานได้ดีกับข้อมูลรับเข้าทุกแบบ ดังจะเห็นได้จากการทดลองว่ามีข้อมูลใบหน้าของบุคคลบางคนจากฐานข้อมูลที่มีค่าความผิดพลาดสูงมากเมื่อเทียบกับใบหน้าบุคคลอื่น ๆ จากฐานข้อมูลเดียวกัน ซึ่งผู้ดำเนินการวิจัยเห็นว่าอาจจะแก้ไขได้โดยการเพิ่มความละเอียดของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ และเพิ่มชุดหน่วยกระทำเฉพาะบริเวณ เพื่อให้การปรับแต่งรูปร่างของแบบจำลองใบหน้าสามารถใช้ได้กับรูปใบหน้าทุกลักษณะได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Cyberware 3D Scanner [Online]. Available from <http://www.Cyberware.com/> [10-Jan-2009]
- [2] Y. Guan, Automatic 3D Face Reconstruction based on Single 2D Image, International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering (MUE '07), 26-28 April 2007 ,pp1216-1219.
- [3] A. Iso and T. Tanaka, 3D Reconstruction of Facial Shape using Color Stripe Projection, In Proceedings SICE Annual Conference, The University Electro-Communications, Japan, pp 3092-3095, 2008.
- [4] M. Zhao, T. S. Chua, and T. Sim, Morphable Face Reconstruction with Multiple Images, 7th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 2006 (FGR 2006.), pp 597-602.
- [5] N. Bourbakis and P. Kakumanu, Skin-based Face Detection-Extraction and Recognition of Facial Expressions, Studies in Computational Intelligence (SCI) 91, March 2008.
- [6] H. Fengsong, L. Yaping, Z. Beiji, and Z. Maojun, Individual 3D Face Generation Based on Candide-3 for Face Recognition, In Proceedings of 2008 IEEE Congress on Image and Signal Processing, Volume 01, pp 646-650 , 2008.
- [7] F. Pighin, J. Hecker, D. Lischinski, R. Szeliski, and D. Salesin. Synthesizing Realistic Facial Expressions from Photographs. In Proceedings of SIGGRAPH'98 Conference, ACM, July 1998, pp 75–84.
- [8] S. Wang, L. Zhang, and D. Samaras, Face Reconstruction Across Different Poses and Arbitrary Illumination Conditions, Department of Computer Science, Heidelberg, Audio- and Video-based Biometric Person Identification, Volume 3546/2005, pp 91-101.
- [9] M. Song, Z. Dong, C. Theobalt, H. Wang, Z. Liu, and Hans-Peter Seidel, A Generic Framework for Efficient 2-D and 3-D Facial Expression Analogy, IEEE Transactions on Multimedia, Volume 9, No. 7, pp 1384-1395 November 2007.

- [10] J. Ahlberg, CANDIDE-3 – An Updated Parameterized Face, Report No. LiTH-ISY-R-2326, Dept. of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden, 2001.
- [11] J. Ahlberg, CANDIDE – Parameterized Face Model Project, [Online]. Available from: <http://www.icg.isy.liu.se/candide/> [10-Jan-2009]
- [12] M. Rydfalk, CANDIDE, a parameterized face, Report No. LiTH-ISY-I-866, Dept. of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden, 1987.
- [13] M. Turk and A. Pentland, Eigenfaces for Recognition, Journal of Cognitive Neuroscience, Volume 3 Number 1, Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [14] H. Rowley, S. Baluja, and T. Kanade, Neural Network-Based Face Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 20, 1998, pp 23-38.
- [15] The Facial Recognition Technology Database (FERET), [Online], National Standard Institute of Technology, USA, Available from <http://www.itl.nist.gov/iad/humanid/feret/> [1-Feb-2009]
- [16] Y. P. Lin, Y. P. Chao, C. C. Lin, and J. H. Chen, Webcam Mouse Using Face and Eye Tracking in Various Illumination Environments, In Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, Shanghai, China, September 2005.
- [17] H. Rowley, S. Baluja, and T. Kanade, Rotation Invariant Neural Network-Based Face Detection, Computer Vision and Pattern Recognition, 1998, pp 38-44.
- [18] T. F. Cootes, C. J. Taylor, D. H. Cooper, and J. Graham, Active Shape Model – Their Training and Application, Computer Vision and Image Understanding, Volume 61, Issue 1, January 1995, pp 38-59.
- [19] T. F. Cootes, G. Edwards, and C. J. Taylor, Comparing Active Shape Models with Active Appearance Models, In Proceedings British Machinery Vision Conference (BMV 99), 1999, pp 173-182.
- [20] S. Milborrow and F. Nicolls, Locating Facial Features with an Extended Active Shape Model, in Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision: Part IV, 2008, pp 504-513.

- [21] J. Ahlberg, An Active Model for Facial Feature Tracking, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Hindawi Publishing Corporation, 2002:6, 2002, pp 566-571.
- [22] M. B. Stegmann, Analysis and Segmentation of Face Images using Point Annotations and Linear Subspace Techniques, Technical Report ISBN-ISSN : IMM-REP-2002-xx, 2002.
- [23] Y. Zheng, J. Chang, Z. Zheng, and Z. Wang, 3D Face Reconstruction from Stereo: A Model Based Approach, In Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP 2007, San Antonio, Texas, USA 2007, pp 65-68.
- [24] G. Bradski and A. Kaebler, Learning OpenCV, Computer Vision with the OpenCV Library, 1st Edition, O' Reilly, September 2008.
- [25] J.C. Terrillon and S. Akamatsu, Comparative Performance of Different Chrominance Spaces for Color Segmentation and Detection of Human Faces in Complex Scene Images, In Proceedings of the International Conference on Face and Gesture Recognition, pp 54-61.
- [26] W. Gander, G. H. Golub, and R. Strebler, Least-Squares Fitting of Circles and Ellipses, BIT Numerical Mathematics, Volume 34, Number 4, Springer Netherlands, pp 558-578, 1994.
- [27] A. Fitzgibbon, M. Pilu, and R. B. Fisher, Direct Least-Square Fitting of Ellipse, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 21, No. 5, pp 476-480, May 1999.
- [28] R. N. Hota, V. Venkatarao, and S. Bedros, Face Detection by Using Skin Color Model Based on One Class Classifier, In Proceedings 9th International Conference on Information Technology (ICIT'06), pp 15-16, 2006.
- [29] J. Lichtenauer, E.A. Hendriks, and M.J.T. Reinders, A Calibrationless Skin Color Model, Twelfth annual conference of the Advanced School for Computing and Imaging. June 14-16 2006.
- [30] L. H. Zhao, X. L. Sun, J. H. Liu, and X. H. Xu, Face Detection Based on Skin Color, Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp 3625-3628, August 2004.

- [31] A. Ullah and K. Harada, A Study on Surface Subdivision, The 8th International Conference on Advanced Communication Technology, 2006, ICACT 2006, pp 1409-1412, 2006
- [32] T. M. Mitchell, Machine Learning, McGraw-Hill International Editions, 1997.
- [33] R. M. Freund, The Steepest Algorithm for Unconstrained Optimization and a Bisection Line-Search Method, MIT Open Courseware Lecture Note [Online], Massachusetts Institute of Technology, February 2004; Available at <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/web/home/home/index.htm>. [18-June-2009]
- [34] N. Ansari, M. H. Chen, and E. S. Hou, Point Pattern Matching by a Genetic Algorithm, 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON '90), volume 2, pp 1233-1238, 1990.
- [35] Y. Ao and H. Chi, Experimental Study on Differential Evolution Strategies, WRI Global Congress on Intelligent Systems, pp 19-24, 2009.
- [36] MSDN Library [Online]. Available from: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa930379.aspx> [1-July-2009]
- [37] P. Ruangyam and N. Covavisaruch, An Efficient Region-based Skin Color Model for Reliable Face Localization, In Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand 2009 (IVCNZ '09), pp. 260-265, 2009.
- [38] A. Thorn, DirectX 9 Graphics: The Definitive Guide to Direct3D, Wordware Publishing Inc., ISBN-13: 978-1-55622-229-7, 2005.
- [39] MIT-CBCL Face Recognition Database, Center of Biological and Computational Learning [Online]. Available from : <http://cbcl.mit.edu/software-datasets/heisele/facerecognition-database.html> [1-Jan-2009]
- [40] The OpenCV Library [Online], Available from: <http://sourceforge.net/OpenCV/>. [1-Jan-2009]
- [41] P. Ruangyam and N. Covavisaruch, 3-Dimensional Face Pose and Shape Estimation Based on Relaxed Mode Fitting Optimization, In Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP), 2010.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

นิยามคู่จุดมุมของแบบจำลองสามมิติและจุดพีเจอรส์องมิติ

จากวิธีการปรับเหมาะแบบจำลองใบหน้าสามมิติเข้ากับชุดของจุดพีเจอรส์องมิติที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความผิดพลาดระยะทางที่วัดจากคู่จุดทั้งสองแบบเฉลี่ย โดยมีนิยามคู่จุดพีเจอรส์องมิติ (ตั้งนิยามในรูปที่ 3.4) และ จุดมุมของแบบจำลองใบหน้าสามมิติ CANDIDE ที่ผ่านกระบวนการซับริวิชันแล้ว (ตั้งวิธีการในหัวข้อ 2.4.3) ที่สอดคล้องกันสำหรับวัดค่าความผิดพลาดพร้อมค่าถ่วงน้ำหนักตามลำดับดังนี้

ตารางที่ ก.1 ชุดคู่จุดบนโครงใบหน้า

หมายเลขจุดพีเจอรส์องมิติ	หมายเลขจุดมุมสามมิติ	ค่าถ่วงน้ำหนัก
0	47	10
1	148	10
2	62	10
6	63	15
7	235	15
8	65	15
9	10	15
10	32	15
11	228	15
12	30	15
14	248	15
16	29	10
17	119	10
18	14	10
19	35	10
7	240	15
11	236	15

ตารางที่ ก.2 ชุดคู่จุดบนคี่ทั้งสองข้าง

หมายเลขจุดพีเจอร์สองมิติ	หมายเลขจุดมุมสามมิติ	ค่าถ่วงน้ำหนัก
20	48	5
22	51	5
24	50	5
26	49	5
36	17	5
38	18	5
40	15	5
42	16	5

ตารางที่ ก.3 ชุดคู่จุดบนขอบดวงตาทั้งสองข้าง

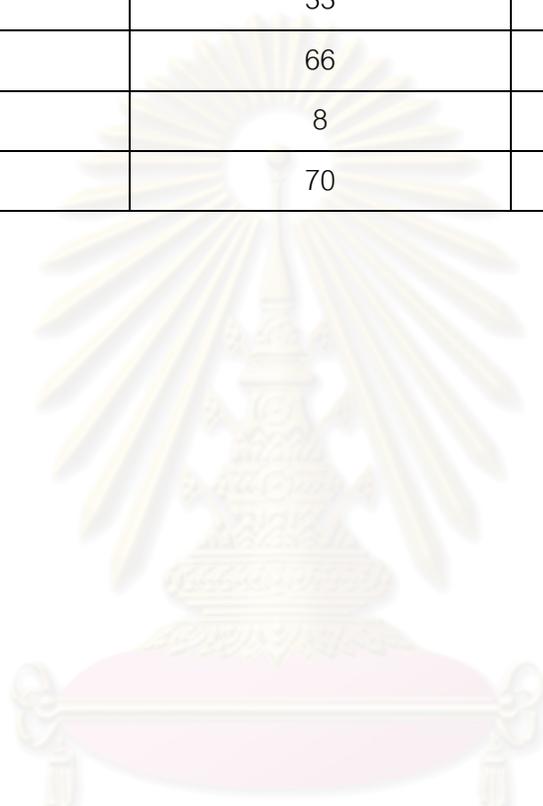
หมายเลขจุดพีเจอร์สองมิติ	หมายเลขจุดมุมสามมิติ	ค่าถ่วงน้ำหนัก
28	53	5
30	57	5
32	56	5
34	52	5
44	23	5
46	24	5
48	20	15
50	19	5

ตารางที่ ก.4 ชุดคู่จุดบนจมูก

หมายเลขจุดพีเจอร์สองมิติ	หมายเลขจุดมุมสามมิติ	ค่าถ่วงน้ำหนัก
52	36	8
53	78	8
63	77	8
57	76	8
58	5	15
59	75	8

ตารางที่ ก.5 ชุดคู่จุดริมฝีปาก

หมายเลขจุดพีเจอร์สองมิติ	หมายเลขจุดมุมสามมิติ	ค่าถ่วงน้ำหนัก
66	64	15
68	9	7
70	31	15
72	33	7
74	66	7
77	8	5
76	70	5

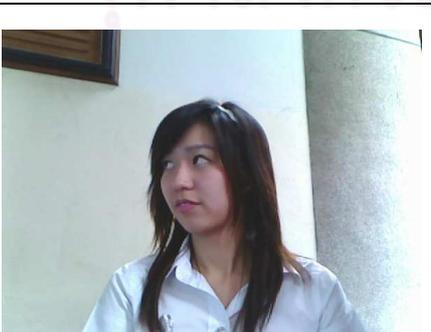


ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างใบหน้าจำลองสามมิติ

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างผลจำลองใบหน้าสามมิติจากฐานข้อมูลที่เก็บจากกล้องเว็บแคม

ตัวอย่างจากชุดภาพรับเข้า	ใบหน้าสามมิติที่ได้	
		
		
		
		



ตารางที่ ข.2 ตัวอย่างผลจำลองใบหน้าสามมิติจากฐานข้อมูล MIT-CBCL

ตัวอย่างจากชุดภาพรับเข้า	ใบหน้าสามมิติที่ได้	ตัวอย่างภาพรับเข้า
		
		
		
		

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปฐมพงษ์ เรืองแย้ม เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) ในปี พ.ศ. 2550 ระหว่างที่ศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิตได้เข้ารับการฝึกงานด้านการประมวลผลภาพจากหน่วยวิจัย IMG สถาบันวิจัย NECTEC และทำโครงการระดับปริญญาบัณฑิตเรื่อง “การติดตามบุคคลต้องสงสัยจากกล้องวงจรปิด” โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพงศ์ อารีกุล เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2551 โดยทำวิทยานิพนธ์หัวข้อเรื่อง “การจำลองใบหน้าบุคคลสามมิติผ่านกล้องเดี่ยวที่อยู่หนึ่ง” มีรองศาสตราจารย์ นงลักษณ์ ไคววิสารัช เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย