

ค. จุดปริมาตรเป็นศูนย์และจุดแรงบิดเป็นศูนย์ Zero-volume (V_1) points and Zero-torsion (V_2) points

บทที่ 7

ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

7.1 บทนำ

ผลการทดลอง แยกออกได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อทดสอบความคงสภาพของความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ ส่วนที่สองเป็นการทดลองเพื่อจัดเรียงให้ตรงกันและลงทะเบียณภาพใบหน้าสามมิติ ในเงื่อนไขที่ข้อมูลภาพหายไปบางส่วนและใบหน้าที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน โดยใช้ข้อมูลภาพสามมิติจากเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ สแกนภาพใบหน้าของหุ่นจำลอง ภาพใบหน้าอาสาสมัคร และภาพใบหน้าจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ที่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการในการทดสอบทฤษฎีการประมวลผลภาพสามมิติ จากผลการทดลองพบว่าความคงสภาพของความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์ มีความคงสภาพต่อการแปลงแอฟเฟน สามารถนำมาใช้ในการจัดให้ตรงกันและลงทะเบียณภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันได้

แนวคิดในการออกแบบการทดลองคือ ทำการทดลองพื้นฐานก่อนแล้วเพิ่มระดับการทดลองสู่ความซับซ้อนที่สูงขึ้น เนื่องจากตัวแปรที่ซับซ้อนที่สุดในการทดลองคือ จุดแรงบิดเป็นศูนย์ คำนวณได้จากเส้นโค้งเชิงพาราโบลา เส้นโค้งเชิงพาราโบลาคำนวณได้จากความโค้งเกาส์เซียน และความโค้งเกาส์เซียนคำนวณได้จากพิกัดพื้นผิวของใบหน้า ดังนั้นจึงเริ่มทดลองจากตัวแปรพื้นฐานก่อนคือ ความโค้งเกาส์เซียน เมื่อทดสอบโปรแกรมจนมั่นใจความถูกต้องแล้วจึงเพิ่มระดับสู่ตัวแปรที่ซับซ้อนขึ้นคือเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และจุดแรงบิดเป็นศูนย์ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Matlab เป็นเครื่องมือ การทดลองทั้งหมดประกอบด้วย หัวข้อที่ 7.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ หัวข้อที่ 7.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุด

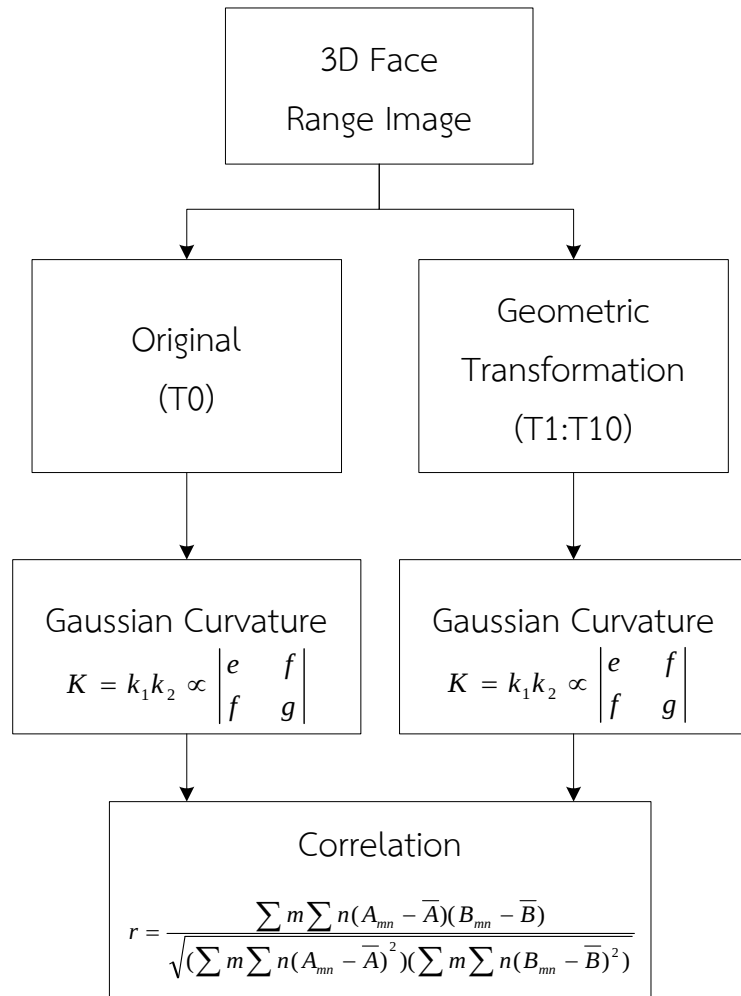
แรงบิดเป็นศูนย์ หัวข้อที่ 7.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน หัวข้อที่ 7.5 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติโดยใช้ข้อมูลภาพบริเวณจมูก หัวข้อที่ 7.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอ้าปากค้าง หัวข้อที่ 7.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล

7.2 การทดลองเกี่ยวกับความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ

การทดลองหาความโค้งเกาส์เซียนและความคงสภาพ มีลำดับขั้นตอนการทดลอง ดังภาพ

ที่ 7.1 โดยคำนวณจาก $K = k_1 k_2 \propto \left| \frac{e}{f} \frac{f}{g} \right|$ และ ค่าเฉลี่ยของความโค้งเกาส์เซียน จาก

$K_m = \frac{1}{2} (k_1 k_2)$ ซึ่งจะทำให้เราสามารถบอกรูปร่างของพื้นผิวได้ วัตถุประสงค์ ของการทดลองนี้ เพื่อพิสูจน์ว่าความโค้งเกาส์เซียนสามารถคงทนต่อการแปลงต่างๆ ได้หรือไม่ การทดลองทำโดยนำข้อมูลภาพที่ได้จากการสแกนหุ่นจำลองด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D โดยให้ความละเอียดได้ 0.135-0.210 มิลลิเมตร ที่ระยะการทำงาน 300-650 มิลลิเมตร มาแปลงในลักษณะต่างๆ เช่นการหมุนรอบแกน Z เพื่อจำลองการเอียงคอ การหมุนรอบแกน Y เพื่อจำลองการหันหน้าไปทางซ้ายหรือขวา การหมุนรอบแกน X เพื่อจำลองการก้มเงยหน้า เป็นต้น



ภาพที่ 7.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพความโค้งเกาส์เซียน

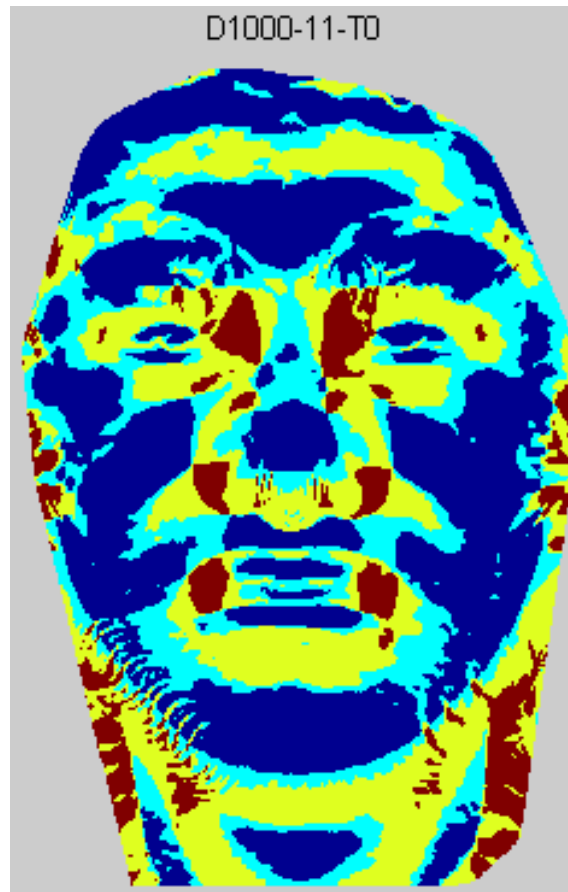
ผลการทดลองแสดงไว้ดังภาพที่ 7.2 รูปใบหน้าต้นฉบับ แสดงรูปร่างของพื้นที่บริเวณต่างๆของใบหน้าด้วยสีที่แตกต่างกัน โดยถ้าค่าความโค้งเกาส์เซียนมีค่าเป็นลบหมายถึงบริเวณที่เว้าลง (concave) แสดงเป็นสีน้ำตาล (เว้ามาก) และสีเหลือง (เว้าน้อย) ส่วนบริเวณที่ค่าความโค้งเกาส์เซียนมีค่าเป็นบวกหมายถึงพื้นที่ที่นูน (convex)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

ผลการทดลองเชิงปริมาณ ได้ใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติ (3D Correlation coefficient) โดยคำนวณจาก

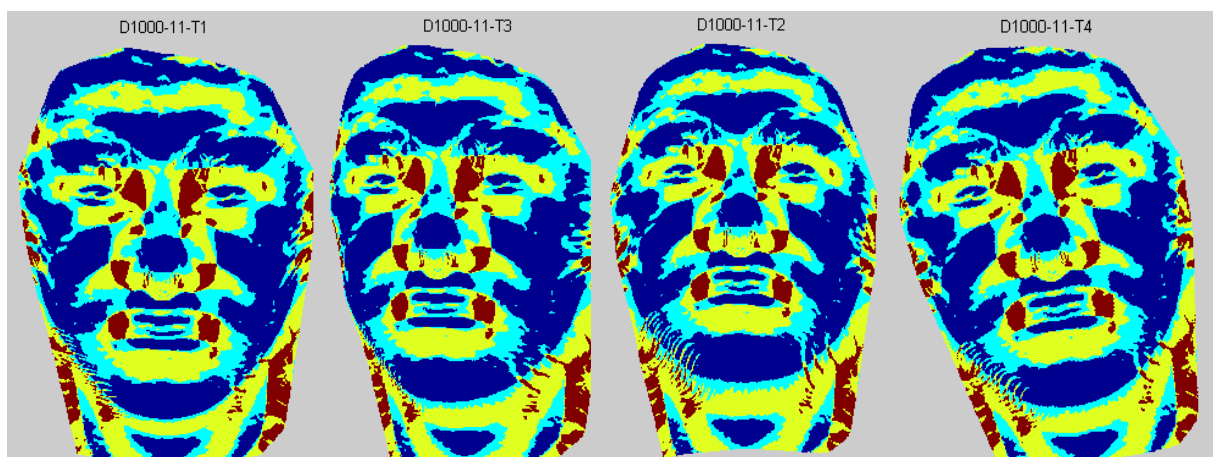
$$r = \frac{\sum m \sum n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum m \sum n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum m \sum n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (7.1)$$

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

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



ภาพที่ 7.2 รูปร่างพื้นผิวของใบหน้าต้นฉบับหน้าตรง [43]



ก.ก้มหน้า 10 องศา

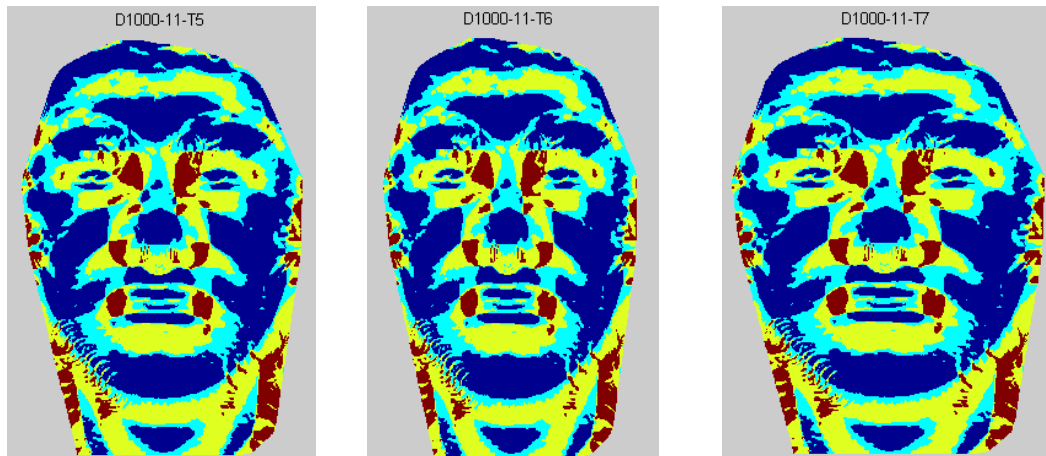
ข.หันขวา 10 องศา

ค.เงยหน้า 10 องศา

ง.เอียงคอไปทางขวา 10

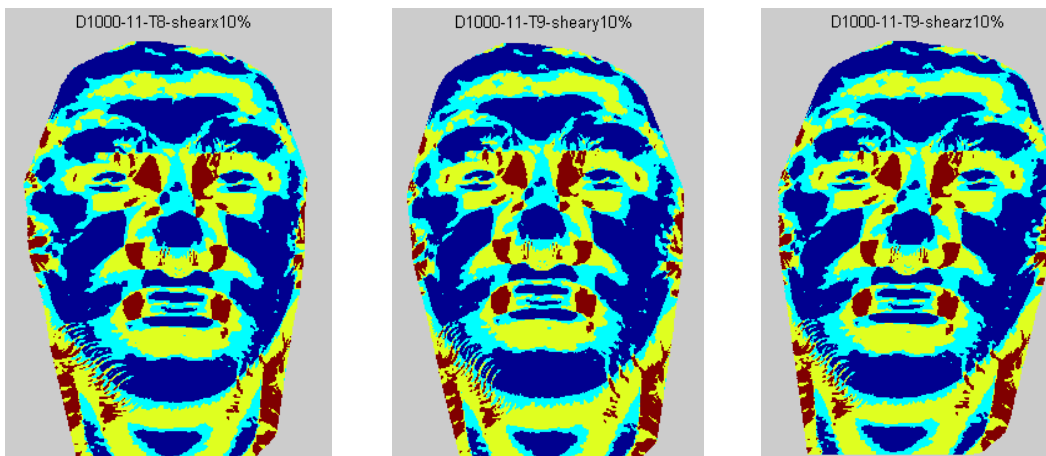
(หมุนรอบแกน X) (หมุนรอบแกน Y) (หมุนรอบแกน X) องศา (หมุนรอบแกน Z)

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



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

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



ก. ฉีกตามแกน X 10% ข.ฉีกตามแกน Y 10% ค.ฉีกตามแกน Z 10%
(Shear X) (Shear Y) (Shear Z)

ภาพที่ 7.5 บริเวณต่างๆ ของใบหน้าที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ภายใต้การแปลง
ก. ฉีกตามแกน X 10% ข.ฉีกตามแกน Y 10% และ ค.ฉีกตามแกน Z 10%

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

ตารางที่ 7.1 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่เว้า (สีน้ำตาล) ภายใต้การแปลงต่างๆ

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

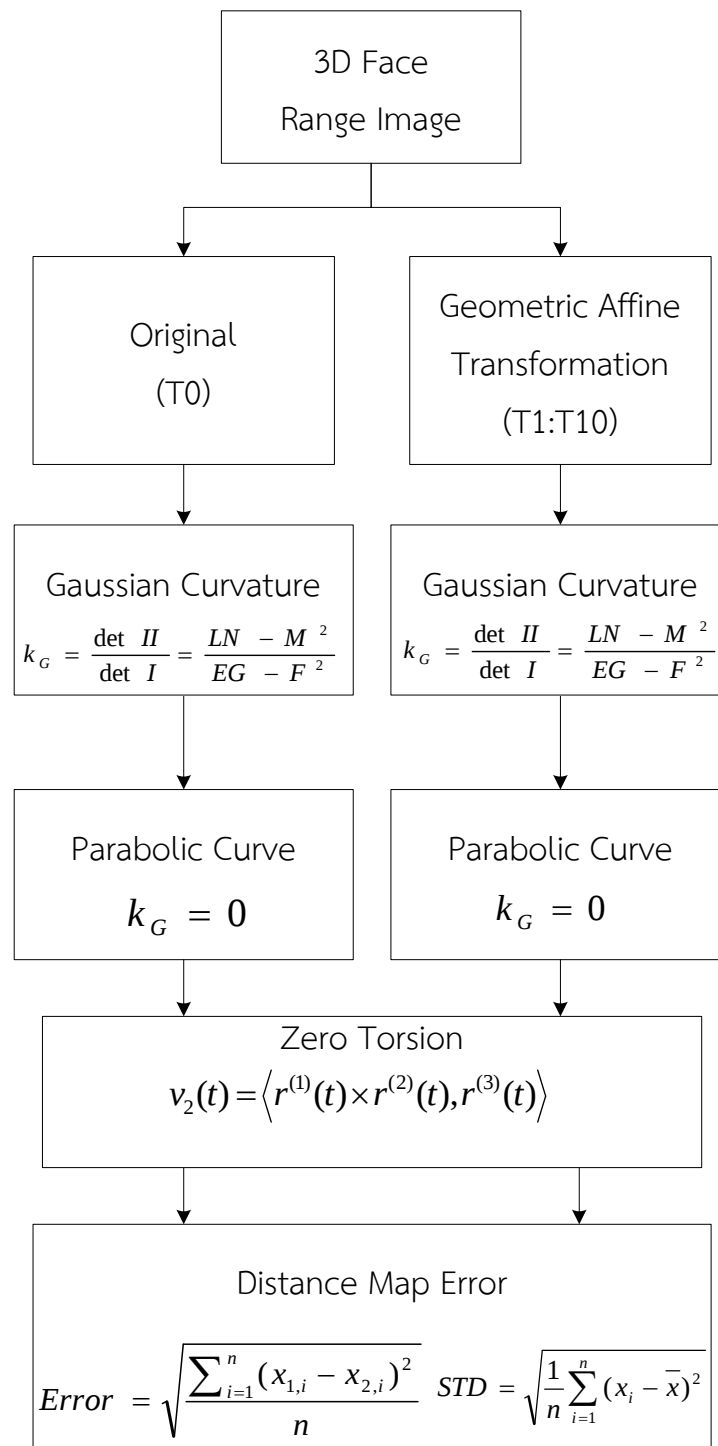
ตารางที่ 7.2 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สามมิติของบริเวณที่นูน (สีน้ำเงิน) ภายใต้การแปลงต่างๆ

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

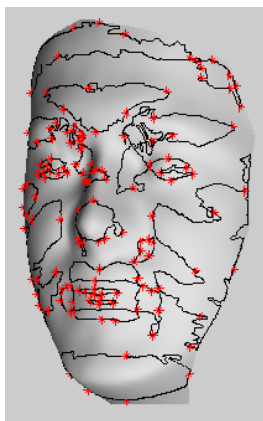
สรุปผลการทดลอง จากภาพที่ 7.2 ถึงภาพที่ 7.5 แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวที่นูน(สีน้ำเงิน) และพื้นผิวที่เว้า(สีน้ำตาล)ของใบหน้า ที่ผ่านการแปลงชนิดต่างๆนั้น ไม่มีความแตกต่างกันจนสังเกตเห็นได้ และเมื่อวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ ดังในตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์นั้น พบว่าพื้นที่ทั้งเว้าและนูนของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้า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

7.3 การทดลองเกี่ยวกับความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์

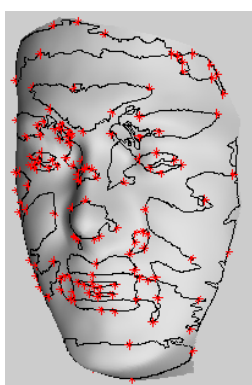
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการทดสอบความคงสภาพ ของจุดที่แรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลา ภายใต้การแปลงแบบแอฟไฟน์ ในการทดลองนี้ ได้ใช้ภาพข้อมูลใบหน้าจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D นำมาแปลงแบบต่างๆ เช่น ก้มหน้า เงยหน้า เอียงคอ ปรับขนาด และ การเฉือน แล้วนำไปคำนวณหาความโค้งเกาส์เซียนบนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิ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



ภาพที่ 7.6 ลำดับขั้นตอนการทดลองความคงสภาพของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาและจุดแรงบิดเป็นศูนย์

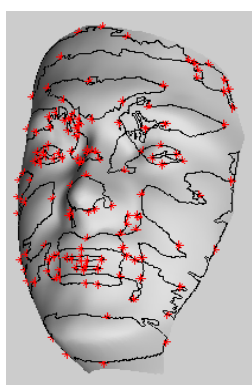


ภาพที่ 7.7 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับ



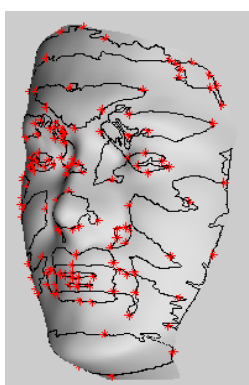
ก.ก้มหน้า 10°

(Rotate $+X$)



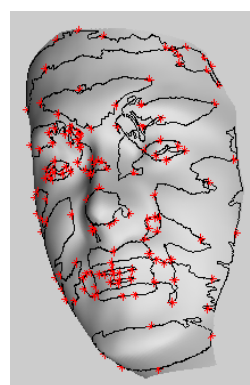
ข.เงยหน้า 10°

(Rotate $-X$)



ค.หันขวา 10°

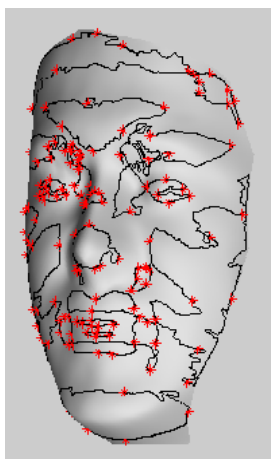
(Rotate Y)



ง.เอียงคอ 10°

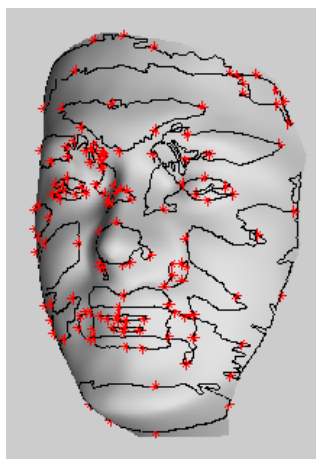
(Rotate Z)

ภาพที่ 7.8 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าต้นฉบับและใบหน้าภายใต้การแปลงแบบหมุน



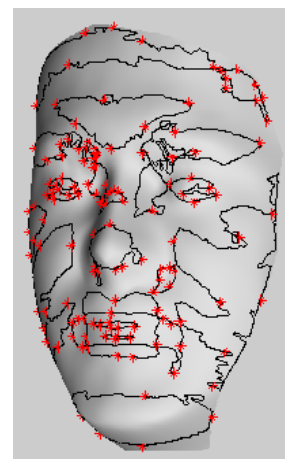
ก.ขยายขนาดตามแกน X

10%



ข.ขยายขนาดตามแกน Y

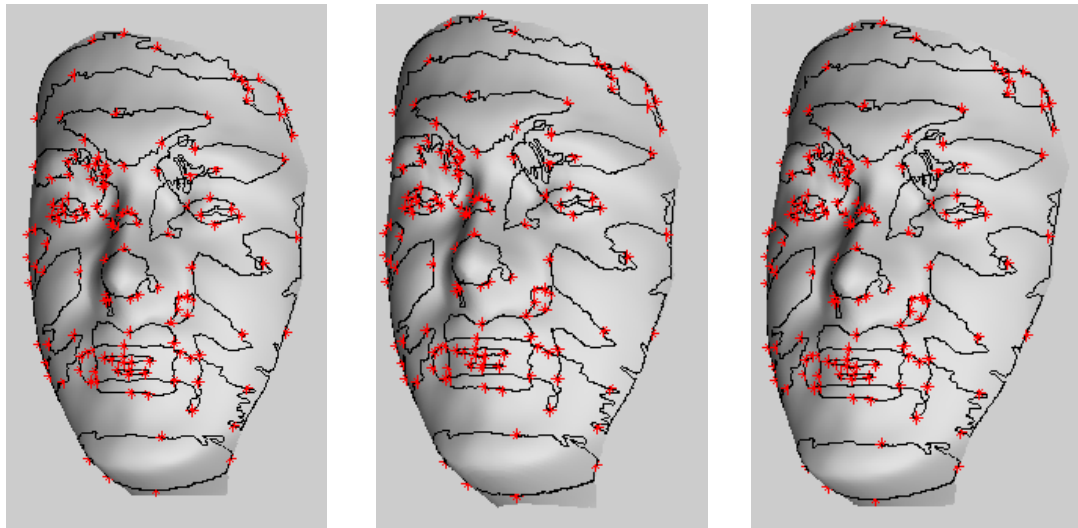
10%



ค.ขยายขนาดตามแกน Z

10%

ภาพที่ 7.9 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงขยายขนาด



ก.เงื่อนไขตามแกน X 10%

ข.เงื่อนไขตามแกน Y 10%

ค.เงื่อนไขตามแกน Z 10%

ภาพที่ 7.10 จุดค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าภายใต้การแปลงแบบเฉือน

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

ตารางที่ 7.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของมิลลิเมตรระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพภายใต้การแปลงต่างๆ

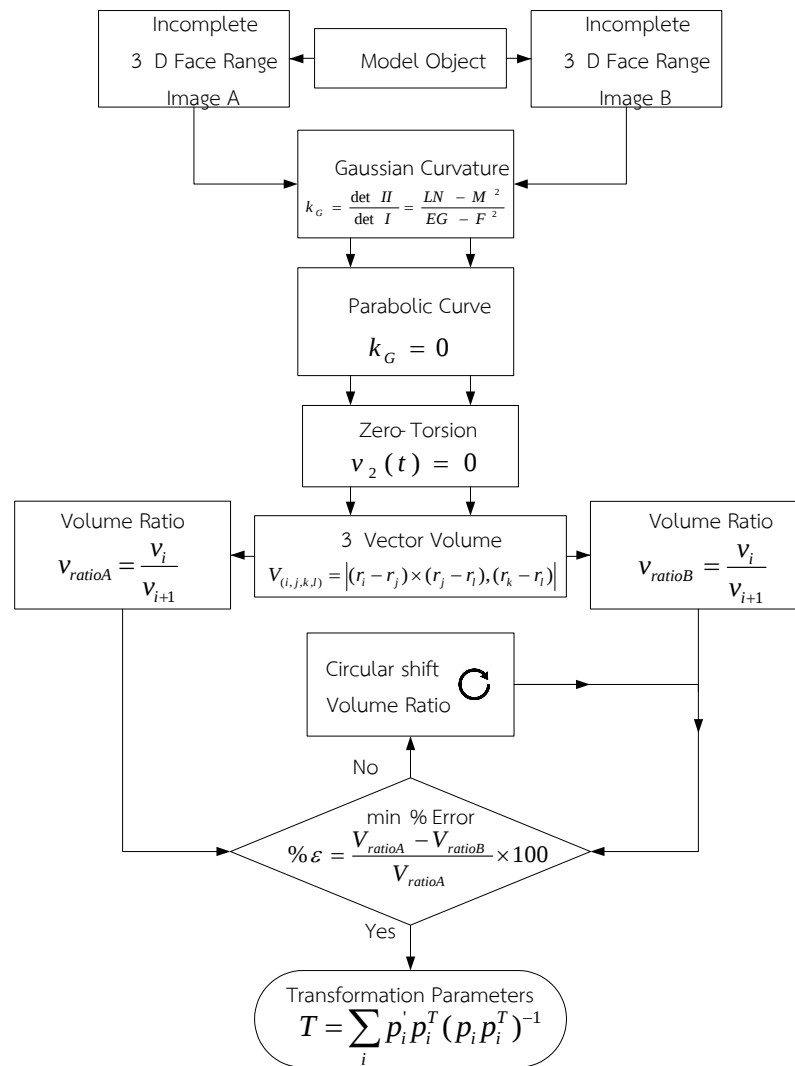
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Mean Error (mm)	1.45	2.73	2.13	1.42	1.98	2.03	2.38	1.77	0.96	3.22
STD (mm)	0.81	1.74	1.24	0.75	1.34	1.48	2.45	1.45	0.73	2.71

สรุปผลการทดลอง

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

7.4 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน

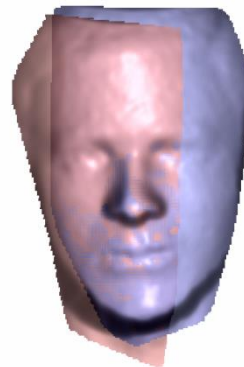
การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถใช้ในกรณีที่ข้อมูลภาพบางส่วนขาดหายไปหรือไม่ ในการทดลองนี้ ทำตามขั้นตอนดังภาพที่ 7.11 โดยใช้เครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ เช่นเดียวกับการทดลองแรก สร้างภาพของหุ่นจำลองมนุษย์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



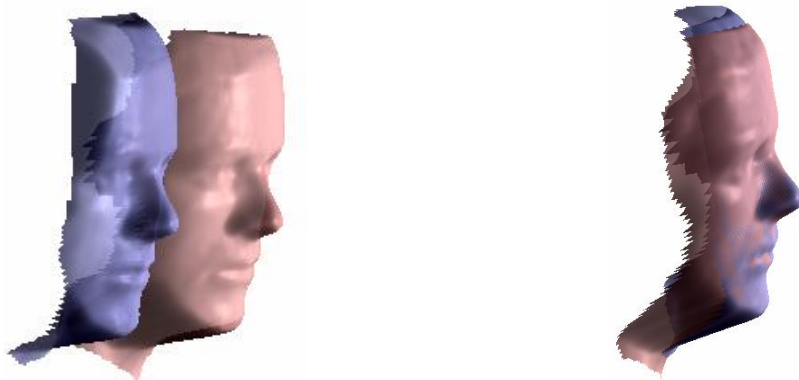
ภาพที่ 7.11 ลำดับขั้นตอนการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่ข้อมูลภาพขาดหายไปบางส่วน



ก.ภาพด้านหน้า ก่อนการซ้อนทับภาพ



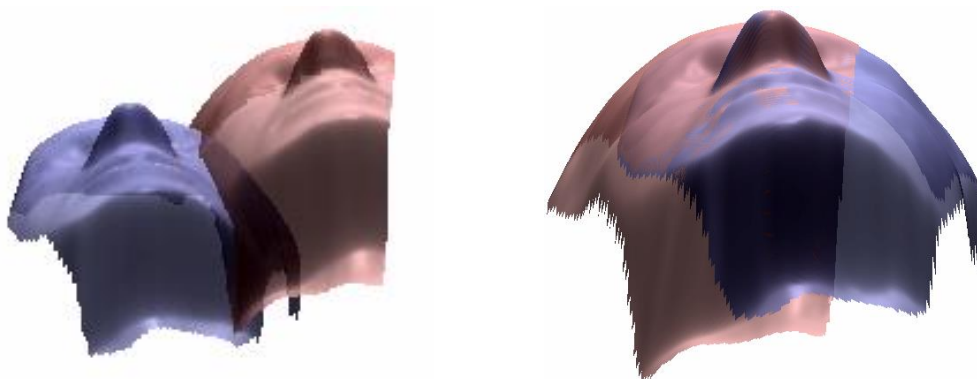
ข.ภาพด้านหน้า หลังการซ้อนทับภาพ



ค.ภาพด้านข้าง ก่อนการซ้อนทับภาพ

ง.ภาพด้านข้าง หลังการซ้อนทับภาพ

ภาพที่ 7.12 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก. ภาพด้านหน้า ก่อนการซ้อนทับภาพ และ ข. ภาพด้านหน้า หลังการซ้อนทับภาพ ค. ภาพด้านข้าง ก่อนการซ้อนทับภาพ และ ง. ภาพด้านข้าง หลังการซ้อนทับภาพ



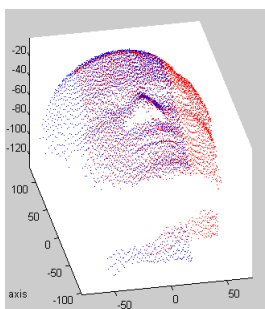
ก.ภาพด้านล่าง ก่อนการซ้อนทับภาพ

ข.ภาพด้านล่าง หลังการซ้อนทับภาพ

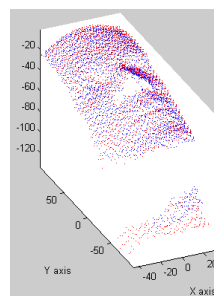
ภาพที่ 7.13 ผลการซ้อนทับภาพที่ข้อมูลขาดหายไปบางส่วน ก.ภาพด้านล่าง ก่อนการซ้อนทับภาพ และ ข.ภาพด้านล่าง หลังการซ้อนทับภาพ

ผลการทดลองเชิงปริมาณ ของการซ้อนทับภาพในกรณีที่ข้อมูลใบหน้าไม่สมบูรณ์ โดยคำนวณค่าความผิดพลาดได้ค่าความแตกต่างของระยะทางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยได้แยกคำนวณโดยใช้ข้อมูลทั้งใบหน้าและเฉพาะบริเวณที่ใบหน้าซ้อนทับกันดังภาพที่ 7.14 ได้ผลดังตารางที่ 7.4 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพในกรณีที่ข้อมูลภาพสามมิติไม่สมบูรณ์

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



ก. ข้อมูลภาพหลังการซ้อนทับทั้งหมด



ข. ข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกันของข้อมูลภาพ

ภาพที่ 7.14 บริเวณใบหน้าที้นำมาใช้ในการคำนวณความผิดพลาดของระยะทาง

ตารางที่ 7.4 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพในกรณีที่ข้อมูลภาพสามมิติไม่สมบูรณ์

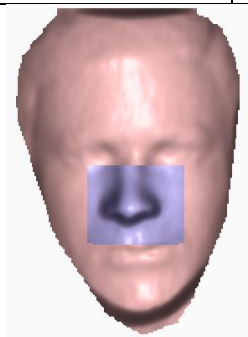
หลังการจัดให้ตรงกัน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ข้อมูลทั้งใบหน้า (ภาพที่ 7.14 ก.)	11.0758	16.6376
ข้อมูลเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกัน (ภาพที่ 7.14 ข.)	1.5045	0.7891

7.5 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติโดยใช้ข้อมูลภาพบริเวณจมูก

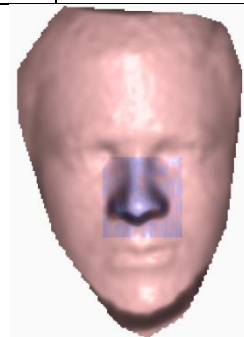
การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติระหว่างใบหน้าต้นฉบับกับข้อมูลภาพบริเวณจมูกของใบหน้าเดียวกันที่สแกนต่างเวลากัน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบว่า เส้นโค้งเชิงพาราโบลาเพียงเส้นเดียวสามารถนำมาใช้ในการซ้อนทับภาพได้หรือไม่ ในการทดลองนี้เป็นการซ้อนทับภาพของใบหน้าหุ่นที่สแกนด้วยเครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D แบบเติมหน้ากับใบหน้าหุ่นที่สแกนเฉพาะบริเวณจมูกเท่านั้น มีลำดับการทำงานเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ดังภาพที่ 7.11 ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 7.15

ตารางที่ 7.5 ผลการทดลองลงทะเบียนภาพระหว่างใบหน้าต้นฉบับทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น

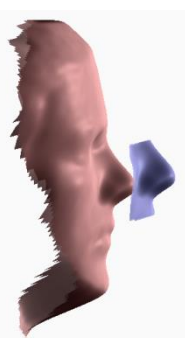
หลังการจัดให้ตรงกัน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)
ข้อมูลทั้งใบหน้ากับจมูก	28.4132	25.3149
ข้อมูลเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกัน	1.3592	0.5784



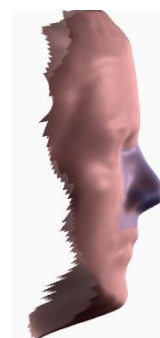
ก.ภาพด้านหน้า ก่อนการซ้อนทับภาพ



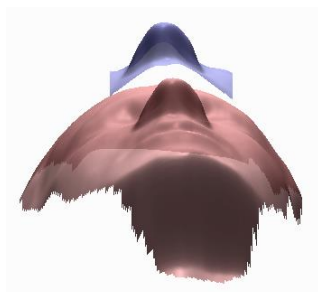
ข.ภาพด้านหน้า หลังการซ้อนทับภาพ



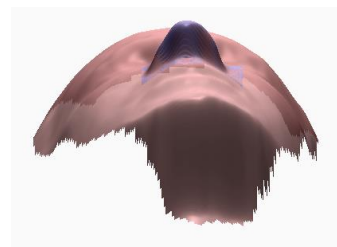
ค.ภาพด้านข้าง ก่อนการซ้อนทับภาพ



ง.ภาพด้านข้าง หลังการซ้อนทับภาพ



ค.ภาพด้านล่าง ก่อนการซ้อนทับภาพ



ง.ภาพด้านล่าง หลังการซ้อนทับภาพ

ภาพที่ 7.15 ภาพก่อนและหลังการซ้อนทับภาพระหว่างใบหน้าทั้งหมดกับเฉพาะบริเวณจมูก

ผลการทดลองเชิงปริมาณของการจัดใบหน้าให้ตรงกันของใบหน้าทั้งใบหน้ากับข้อมูลภาพเฉพาะบริเวณจมูก ได้ใช้ค่าความผิดพลาดของระยะทางของจุดที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ผลดัง

ตารางที่ 7.57.5 คำนวณโดย $Distance\ map\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$ เมื่อ $x_{1,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าทั้งใบหน้า และ $x_{2,i} = (x, y, z)_i$ เป็นพิกัดของใบหน้าบริเวณจมูก ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้จาก $STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ เมื่อ x_i คือ ค่าผลต่างระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันของข้อมูลภาพใบหน้าทั้งหมดกับบริเวณจมูกของอีกข้อมูลใบหน้าหนึ่งหลังการซ้อนทับภาพ และ $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

สรุปผลการทดลอง

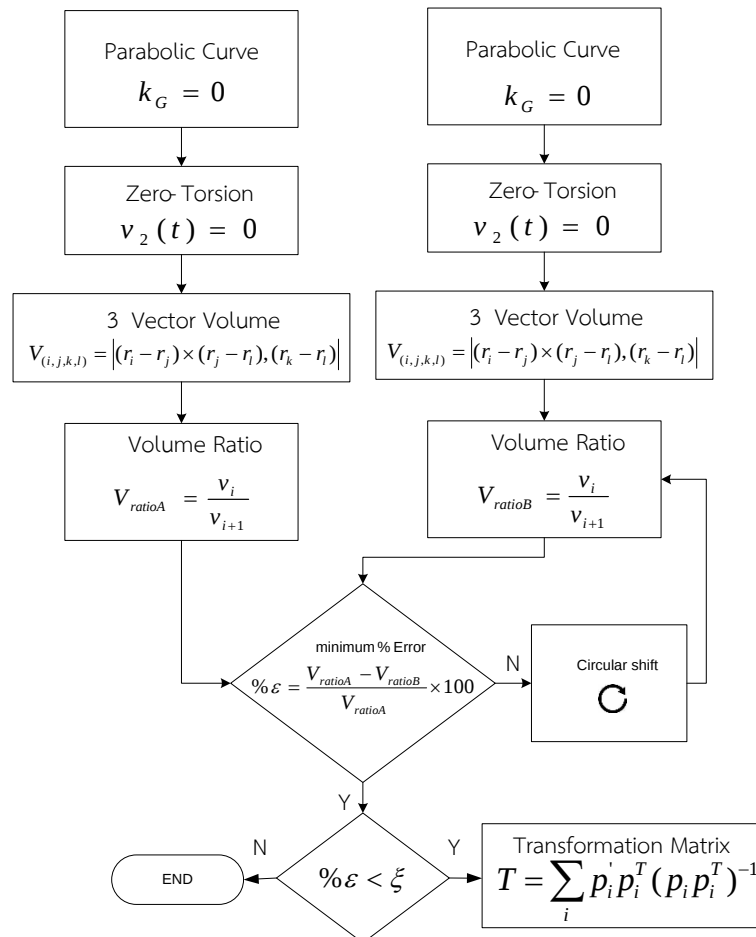
จากผลการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพสามมิติของใบหน้าทั้งหมดกับบริเวณจมูกเท่านั้น พบว่าเมื่อนำข้อมูลภาพที่จัดให้ตรงกันแล้วมาคำนวณหาความผิดพลาด พบว่าสูงมาก และเมื่อนำข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่ซ้อนทับกันเท่านั้นมาคำนวณค่าความผิดพลาด พบว่าได้ค่าที่ต่ำลงมาก โดยลดลงเหลือเพียง 1.35 มิลลิเมตร และความเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงเหลือ 0.57 มิลลิเมตร

7.6 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติ ที่แสดงอารมณ์ปกติและอัปากค้าง

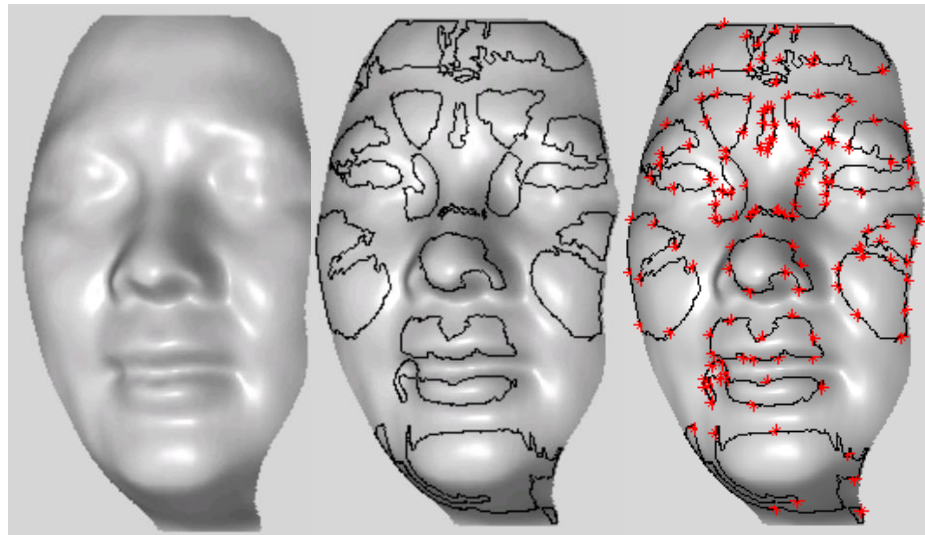
การทดลองเพื่อการจัดเรียงให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้ สามารถใช้ลงทะเบียภาพใบหน้าที่มีอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันได้หรือไม่ ในการทดลองนี้ได้ใช้ เครื่องสแกนภาพสามมิติแบบเลเซอร์ ของบริษัท 3D digital corp. รุ่น eScan3D โดยให้ความละเอียดได้ 0.135-0.210 มิลลิเมตร ที่ระยะการทำงาน 300-650 มิลลิเมตร มาสร้างภาพอาสาสมัครขณะแสดงอารมณ์สีหน้าปกติและขณะอัปากค้างอยู่ มีลำดับขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 7.16 โดยกำหนดระดับขีดขึ้นไว้ว่าถ้าค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยกว่า 5% จะถือว่าเส้นโค้งเชิงพาราโบลาที่จุดค่าแรงบิดปืนศูนย์รั้งอยู่นั้น สอดคล้องกัน แล้วจึงนำคู่สอดคล้องทั้งหมดของเส้นโค้งเชิงพาราโบลาไปคำนวณหาเมตริกซ์การแปลง เพื่อนำไปแปลงภาพเปรียบเทียบกลับมาซ้อนทับกับภาพต้นฉบับ ได้ผลแสดงดังภาพที่ 7.17 ก.ภาพใบหน้าอาสาสมัครขณะอารมณ์สีหน้าปกติ ข.ภาพใบหน้าอาสาสมัครอารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้ง

เชิงพาราโบลา ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าปกติ ซึ่งเป็นจุดที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา

ภาพที่ 7.18 ภาพใบหน้าอาสาสมัครขณะอำปากค้าง ส่วนภาพที่ 7.19 เป็นภาพใบหน้าก่อนและหลังการจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติและขณะอำปากค้าง



ภาพที่ 7.16 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์ปกติและอำปากค้าง



ก.อารมณ์สีหน้าปกติ

ข.อารมณ์สีหน้าปกติ

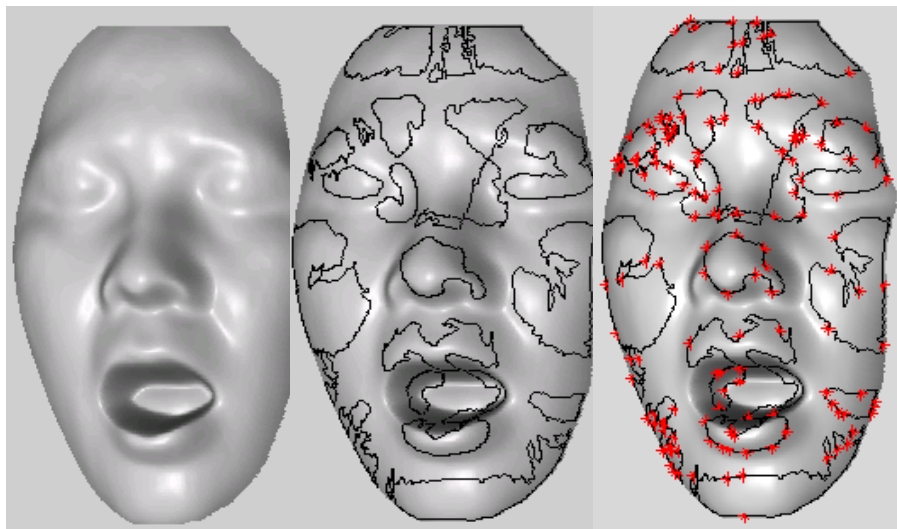
ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บน

และเส้นโค้งเชิง

ใบหน้าปกติ

พาราโบลา

ภาพที่ 7.17 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าอารมณ์ปกติ ก.อารมณ์สีหน้าปกติ ข.อารมณ์สีหน้าปกติและเส้นโค้งเชิงพาราโบลา และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์ที่ค่าแรงบิดเป็นศูนย์บนใบหน้าอารมณ์ปกติ [44]



ก.ใบหน้าขณะอ้าปาก

ข.เส้นโค้งเชิง

ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บน

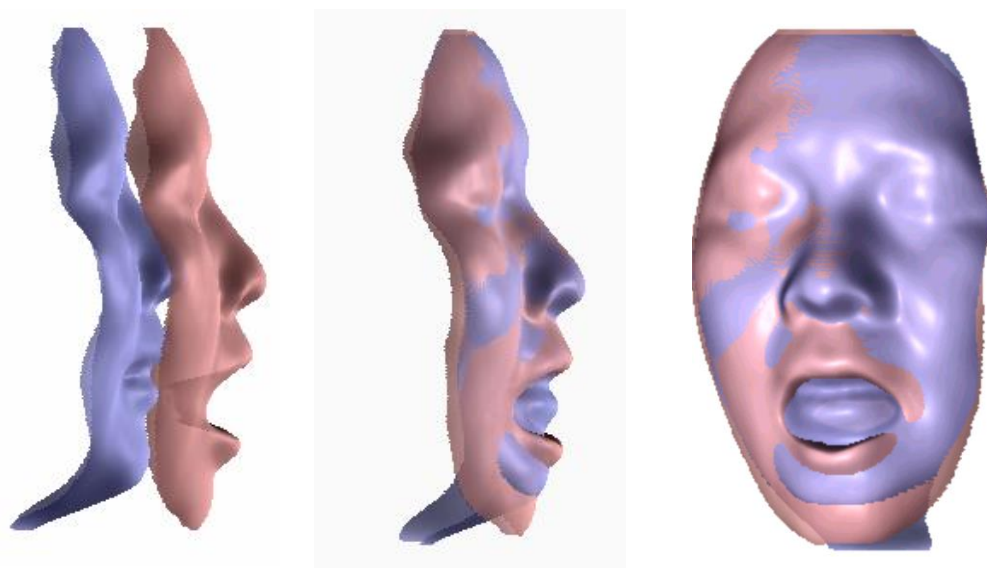
ค้าง

พาราโบลา

ใบหน้าขณะอ้าปากค้าง

ขณะอ้าปากค้าง

ภาพที่ 7.18 จุดเด่นเอกลักษณ์บนเส้นโค้งเชิงพาราโบลาของใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ก.ใบหน้าขณะอ้าปากค้าง ข.เส้นโค้งเชิงพาราโบลาขณะอ้าปากค้าง และ ค.จุดเด่นเอกลักษณ์บนใบหน้าขณะอ้าปากค้าง



ก.มุมมองด้านขวาของ

ข.มุมมองด้านขวาของ

ค.มุมมองด้านหน้าของใบหน้า

ใบหน้าก่อนจัดให้ตรงกัน

ใบหน้าหลังการจัดให้ตรงกัน

หลังการจัดให้ตรงกัน

ภาพที่ 7.19 ภาพใบหน้าก่อนและหลังการซ้อนทับและจัดให้ตรงกันของใบหน้าอารมณ์ปกติและขณะอ้าปากค้าง [44]

ผลการทดลองเชิงปริมาณของการจัดใบหน้าให้ตรงกันของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง ได้ใช้ค่าความผิดพลาดของระยะทางของจุดที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ผลดังตารางที่ 7.6 คำนวณโดย

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

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

ตารางที่ 7.6 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของใบหน้าปกติและขณะอ้าปากค้าง

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

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการจัดภาพให้ตรงกันและการซ้อนทับภาพสามมิติของใบหน้าที่แสดงอารมณ์ปกติกับใบหน้าที่ยำปากค้าง พบว่าเมื่อนำข้อมูลภาพที่จัดให้ตรงกันแล้วมาคำนวณหาความผิดพลาด พบว่าค่าความผิดพลาดจะสูงเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณความผิดพลาด และลดลงเมื่อนำข้อมูลภาพเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือริมฝีปากบนขึ้นไปมาคำนวณเท่านั้น โดยพบค่าความผิดพลาดเพียง 1.6 มิลลิเมตร และความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.75 มิลลิเมตร

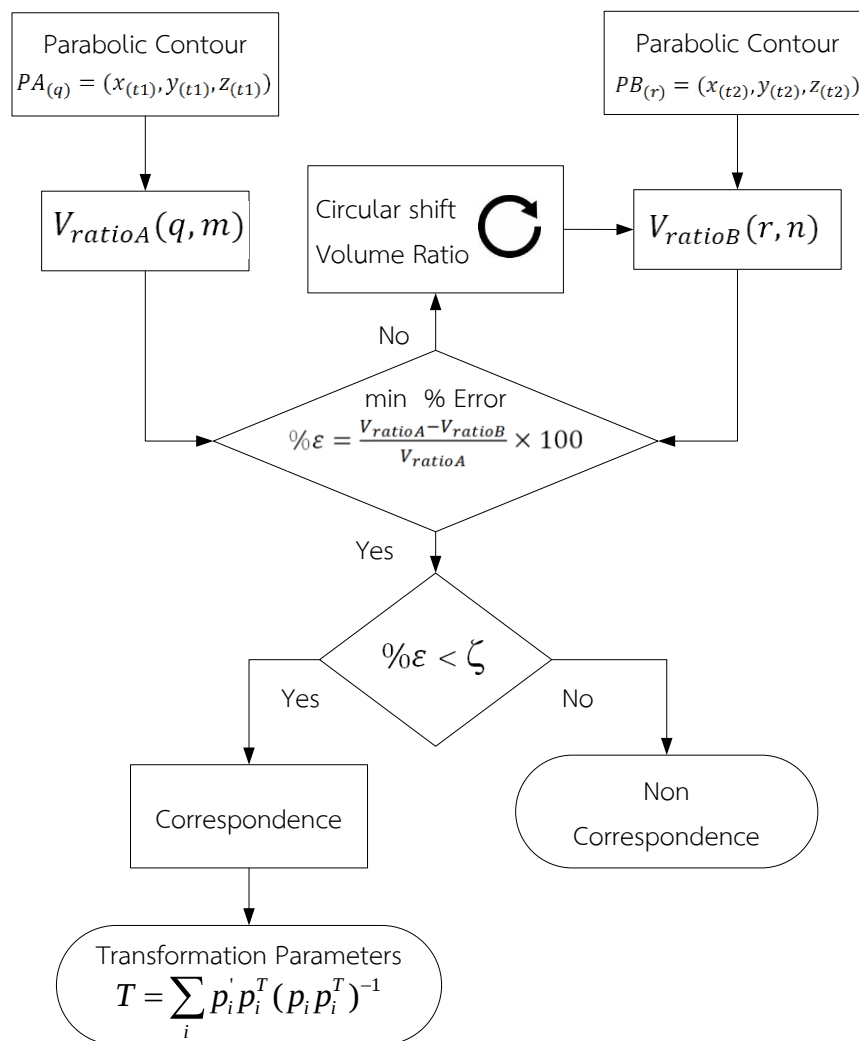
7.7 การทดลองซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกันของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันและการระบุตัวบุคคล

ในการทดลองสุดท้ายนี้ได้ทดลองจัดให้ตรงกันและลงทะเบียนภาพใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกันของภาพใบหน้าสามมิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการระบุตัวบุคคล แม้ว่าบุคคลนั้นจะมีสีหน้าไม่เหมือนกับภาพต้นฉบับที่ได้ลงทะเบียนไว้ และได้เปรียบเทียบกับวิธีการที่เป็นที่นิยมอีกสองวิธี คือ ICP และ CPD โดยการนำข้อมูลภาพจากฐานข้อมูลที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมาทดสอบ

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

ขั้นตอนการทดลอง เริ่มจากสุ่มข้อมูลใบหน้าจากฐานข้อมูลจำนวน 10 ภาพที่มีใช้คนๆ เดียวกันขึ้นมา กำหนดให้เป็นภาพต้นฉบับ แล้วสุ่มข้อมูลภาพของบุคคลเดิมที่มีใช้ข้อมูลต้นฉบับ กำหนดให้เป็นภาพเทียบ คำนวณหาความโค้งเกาส์เซียน เส้นโค้งเชิงพาราโบลา จุดแรงบิดเป็นศูนย์เชิงพาราโบลา และอัตราส่วนปริมาตรสามเวกเตอร์ แล้วนำมาลงทะเบียนภาพ ตามลำดับขั้นตอนการทำงานตามภาพที่ 7.20 โดยจะนำเส้นโค้งเชิงพาราโบลาทุกเส้นของภาพต้นฉบับมาหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างอัตราส่วนปริมาตร ซึ่งจะพิจารณาที่ค่าต่ำที่สุดแล้วตรวจสอบว่าต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าต่ำกว่าจะถือว่าคู่เส้นโค้งเชิงพาราโบลานี้สอดคล้องกัน ทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดนี้จนครบทุกคู่ของเส้นโค้งเชิงพาราโบลา แล้วนำไปหาพารามิเตอร์การแปลง เพื่อแปลงภาพเทียบไปซ้อนให้ตรงกับภาพต้นฉบับ แสดงผลในเชิงคุณภาพด้วยภาพผลการจัดภาพให้ตรงกัน แสดงผลเชิงปริมาณด้วยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของระยะทาง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 7.21 ซึ่งเป็นตารางภาพ โดยใบหน้าแถวแรกเป็นภาพต้นฉบับจำนวน 10 ภาพ ภาพในหลักแรกเป็นภาพที่สุ่มจากภาพบุคคลในแถวแรกแต่แสดงอารมณ์สีหน้าที่แตกต่างกัน นำมาจัดให้ตรงกันกับภาพต้นฉบับ โดยได้แสดงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจัดให้ตรงกัน(ค่าบน) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(ค่าล่าง) กำกับไว้ที่ด้านล่างของผลการจัดให้ตรงกันของภาพแต่ละคู่ด้วย

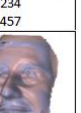
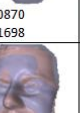
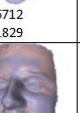
การทดลองนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการจัดให้ตรงกันของภาพและการซ้อนทับภาพสามมิติกับวิธีการ ICP (Iterative Closed Points)[46] และวิธี CPD (Coherent Points Drift) [17] ได้ผลแสดงดังภาพที่ 7.22 และภาพที่ 7.23 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ผลค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการจับคู่ (ผลค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตามแนวแยงมุมซ้ายบนซ้ายไปล่างขวา) และผลค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการจับคู่ (ผลค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอื่นๆ ยกเว้นตามแนวแยงมุมซ้ายบนซ้ายไปล่างขวา) นำไปแสดงในตารางที่ 7.7 ซึ่งได้แสดงเวลาที่ใช้ในการทำงานของแต่ละวิธี นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าวิธีการ ICP จำเป็นต้องมีการจัดให้ตรงกันแบบหยาบก่อนด้วย



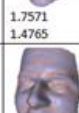
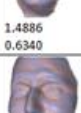
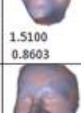
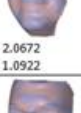
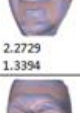
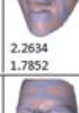
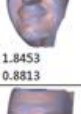
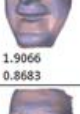
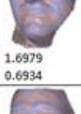
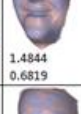
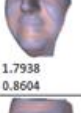
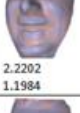
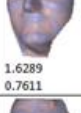
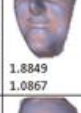
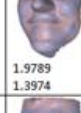
ภาพที่ 7.20 ลำดับขั้นตอนการทดลองการซ้อนทับภาพและการจัดเรียงให้ตรงกัน ของใบหน้าสามมิติที่แสดงอารมณ์สีหน้าแตกต่างกันเพื่อการระบุตัวบุคคล

Reference Query										
	 2.5643 1.6692	 10.7672 6.8649	 12.0333 10.7059	 9.3588 7.7743	 17.2062 11.7894	 9.0489 6.2824	 6.8356 5.5077	 13.9021 8.7295	 20.9340 11.2835	 14.2164 8.1131
	 7.6133 5.4139	 2.4644 1.3442	 9.8850 7.2603	 16.8821 11.0456	 16.1265 12.3078	 6.7069 4.8506	 7.6484 5.5253	 6.9767 5.0161	 25.6540 19.0114	 16.0708 10.0689
	 9.6120 8.3935	 19.1664 10.4277	 2.1669 1.4027	 10.9464 6.9338	 13.2603 9.6698	 18.4997 11.4094	 10.6203 6.3471	 6.9331 4.8686	 12.5192 8.9417	 10.9984 8.8320
	 9.4153 6.4825	 33.5730 23.3092	 20.8306 13.9505	 1.5082 0.7806	 21.5194 13.6289	 9.8636 7.3977	 18.5631 11.4936	 14.0611 11.2956	 17.7258 14.0817	 26.3414 16.9444
	 10.6230 7.2367	 23.3767 15.3488	 8.5667 5.7807	 7.0946 5.5317	 1.5548 0.8116	 12.5411 7.3099	 16.9850 14.3987	 13.8533 10.2304	 21.5598 15.8189	 15.8410 11.3618
	 31.2977 20.1926	 17.3812 9.3099	 10.5474 7.6347	 9.3805 8.7951	 25.8506 14.4769	 1.8776 0.9425	 6.3859 4.6327	 9.1447 7.3682	 14.3984 11.0952	 26.7102 18.4743
	 9.1019 7.4067	 14.0174 10.1811	 11.1050 8.3224	 13.8816 9.4966	 17.7700 13.2174	 10.6731 7.6277	 2.0160 1.0423	 8.2376 5.9747	 15.3397 9.8081	 10.2715 6.3222
	 17.0113 12.6795	 11.3995 6.8978	 8.3168 6.3508	 13.8955 9.9595	 14.8340 11.0189	 16.2401 11.6120	 10.7833 7.7944	 2.3555 1.4561	 9.4453 7.0899	 10.2222 7.5573
	 6.6186 5.5848	 22.1522 13.3269	 10.1889 6.7368	 8.3752 5.5175	 9.7373 6.7155	 13.0436 8.8677	 6.8454 5.1201	 28.7809 20.4989	 3.6981 3.0411	 17.8562 11.1877
	 14.1803 11.0160	 30.5296 21.3472	 13.1324 8.9796	 16.7648 10.2082	 16.3452 11.2697	 15.1857 11.9198	 5.3057 3.6319	 24.5680 15.5037	 20.2437 12.4688	 3.0597 2.3923

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

Reference Query										
	 1.7739 1.0007	 1.9880 1.0160	 3.4149 2.1347	 2.1193 1.1407	 2.6069 1.4545	 2.4441 1.4735	 2.7916 1.3834	 3.1075 1.8139	 3.5837 2.2131	 2.8844 1.9541
	 2.8189 1.7895	 2.6121 1.8693	 4.1347 2.4939	 2.8085 1.8249	 2.6780 1.5114	 3.2112 1.8309	 3.2280 1.5500	 4.0624 2.5749	 3.8283 2.2917	 3.2600 2.1091
	 2.7365 1.8574	 2.6241 1.4666	 2.3280 1.6014	 2.4621 1.5249	 3.0319 1.5916	 3.3731 2.0617	 3.3022 1.7422	 3.1456 2.0105	 2.6210 1.9985	 2.4147 1.8246
	 2.4231 2.0273	 2.1839 1.2962	 3.1930 2.1891	 1.4366 0.7828	 2.4258 1.5523	 2.7416 1.6669	 2.9381 1.5943	 3.2607 2.1292	 3.4235 2.2974	 2.6786 2.0576
	 2.6778 1.3964	 2.7997 1.5463	 3.4589 2.6126	 2.5058 1.3234	 1.4199 0.7763	 3.6601 2.6734	 3.6062 2.0600	 3.5505 2.4871	 3.0388 2.4336	 2.9906 2.1549
	 2.9482 2.7986	 2.3347 1.5080	 4.0164 2.7191	 2.3525 1.2147	 4.3854 2.9777	 1.9032 1.3766	 2.3092 1.3827	 2.8441 1.8937	 4.3713 3.1408	 2.9557 2.3201
	 3.1826 1.8517	 3.4370 2.3389	 4.2448 2.9214	 3.7716 2.8328	 4.8642 3.0620	 3.5182 2.1179	 2.4804 1.6285	 3.9207 2.5143	 4.7326 3.7440	 3.9234 2.7457
	 3.2831 2.3730	 3.0096 1.6928	 2.4951 1.2846	 2.8947 1.5322	 4.3681 2.6928	 3.5327 1.9792	 3.0669 1.6614	 2.0388 1.3265	 2.9977 1.6595	 2.6047 1.9765
	 3.4673 2.0019	 3.6189 2.0254	 4.5025 3.4759	 3.4236 2.0090	 2.3572 1.3858	 4.3508 2.9774	 4.6318 3.1915	 4.0870 3.1698	 3.6712 3.1829	 3.8039 2.8674
	 2.8984 1.5775	 2.7429 1.5698	 4.1261 2.8196	 2.5925 1.3490	 2.5400 1.7277	 3.4479 2.2889	 3.8108 2.0678	 3.4658 2.6383	 3.5358 2.7101	 2.7951 2.3462

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

Reference Query										
	 1.3833 0.5695	 1.6566 0.7284	 2.0682 1.1092	 1.6369 0.7742	 1.5714 0.6450	 1.7174 0.7791	 1.8738 0.9225	 1.9785 1.0746	 1.9814 1.2842	 1.9123 1.5528
	 1.7961 0.8178	 1.8118 0.9347	 2.2313 1.0738	 1.8424 0.8815	 1.5863 0.7442	 1.9715 0.9753	 2.1224 1.1062	 2.1797 1.1022	 2.2271 1.6562	 2.1989 1.5459
	 1.5424 0.7470	 1.5700 0.6866	 1.5751 1.0243	 1.5428 0.6870	 1.4425 0.6982	 1.7900 0.9073	 1.9150 1.0188	 1.8036 0.9572	 1.8117 1.7162	 1.8404 1.6781
	 1.5020 0.7371	 1.5579 0.7791	 1.7768 1.0510	 1.0930 0.4389	 1.2730 0.6047	 1.6697 0.8954	 1.7676 0.9213	 1.8528 1.0726	 1.7571 1.4765	 1.7991 1.6356
	 1.5480 0.6781	 1.5722 0.6663	 1.9890 1.0559	 1.4886 0.6340	 1.2840 0.5896	 1.7848 0.9599	 1.8597 0.9442	 2.1746 1.1622	 2.0263 1.7911	 1.9698 1.5909
	 1.6210 0.7970	 1.5635 0.7815	 1.5342 0.7393	 1.4218 0.6257	 1.7281 0.8949	 1.4259 0.7042	 1.6305 0.8813	 1.5100 0.8603	 1.6009 1.1859	 1.5733 1.4104
	 1.8415 0.8984	 2.0672 1.0922	 2.2729 1.3394	 2.1007 1.0830	 1.6847 0.8254	 2.1174 1.1658	 2.0414 1.1134	 2.4392 1.4389	 2.2634 1.7852	 2.2595 1.7310
	 1.8698 0.8271	 1.8453 0.8813	 1.9066 0.8683	 1.6979 0.6934	 1.8787 0.9358	 1.7745 0.8408	 1.8193 0.9159	 1.4844 0.6819	 1.8949 0.9596	 1.9403 1.6872
	 1.5727 0.7769	 1.7938 0.8604	 2.2202 1.1984	 1.6289 0.7611	 1.7771 0.9041	 1.7377 0.8615	 1.8460 0.9242	 1.8849 1.0867	 2.1551 1.8949	 1.9789 1.3974
	 1.6920 0.8411	 1.8148 0.8929	 2.2595 1.3574	 1.5082 0.6646	 1.7573 0.9123	 1.7789 0.9255	 1.8283 0.9868	 1.8901 1.1183	 2.1590 1.9687	 1.9324 1.6395

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

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

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

เมื่อ μ_M คือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการจับคู่ถูกต้อง (ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยตามแนวแยงมุมในภาพที่ 7.21 ภาพที่ 7.22 หรือภาพที่ 7.23)

σ_M คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการจับคู่ถูกต้อง (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยตามแนวแยงมุมในภาพที่ 7.21 ภาพที่ 7.22 หรือภาพที่ 7.23)

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

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

ตารางที่ 7.7 ความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการจับคู่ภาพถูกคู่และผิดคู่

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

สรุปผลการทดลอง

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

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