

# ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองงานทันตกรรมฝังรากฟันเทียม

นายสิทธิชัย ป้อมทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2551

**COMPUTER-ASSISTED SIMULATION  
FOR DENTAL IMPLANTS**

**Sittichai Pomthong**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for  
the Degree of Master of Engineering in Computer Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2008**

## ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองงานทันตกรรมฝังรากฟันเทียม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติศักดิ์ เกิดประสพ)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.ปรเมศวร์ ห่อแก้ว)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.นิตยา เกิดประสพ)

กรรมการ

(ศ. ดร.พิชโยทัย มัทธนาภิวัดน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สิทธิชัย ป้อมทอง : ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองงานทันตกรรมฝังรากฟันเทียม

COMPUTER-ASSISTED SIMULATION FOR DENTAL IMPLANTS

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. ประเมศวร์ ห่อแก้ว, 111 หน้า

เนื่องจากในอดีตทันตแพทย์ต้องอาศัยประสบการณ์อย่างสูงในการฝังรากฟันเทียม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดรากฟันเทียม (Computer Aided Dental Implants) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของทันตแพทย์ และช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการผ่าตัดรากฟันเทียม การใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองลักษณะโครงสร้างของฟันปลอมในสามมิติก็เป็นขั้นตอนหนึ่งเพื่อใช้ในการจำลอง (Simulation) ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม โดยจะมีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟันปลอมซึ่งสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ โครงสร้าง ขนาด และตำแหน่งของฟันปลอมที่เหมาะสมกับกราม รากฟันเทียมและตำแหน่งของฟันข้างเคียงของผู้เข้ารับการรักษา

งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการนำภาพถ่ายของฟันปลอมที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพ Computed Tomography (CT) ในกรณีนี้ภาพที่ได้มีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากฟัน อาทิเช่น พื้นหลัง และโครงสร้างแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation) เพื่อให้เหลือเพียงแต่ฟัน ซึ่งขั้นตอนวิธีที่ใช้ได้แก่ การขยายพื้นที่ (Region Growing) การประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ (Gaussian mixture Model) และการเพิ่มความน่าจะเป็นของจุดรอบข้าง (Relaxation Labeling) โดยจะเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการแยกองค์ประกอบ หลังจากนั้นนำภาพฟันที่ได้ไปแสดงผลแบบสามมิติด้วยวิธี Marching Cube จากแบบจำลองฟันที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ตัวแปรเชิงพื้นผิว (Surface Parameterization) กล่าวคือในงานวิจัยนี้จะฉาย (Projection) พื้นผิวของฟันลงบนตัวแปรในพิกัดทรงกลมโดยใช้วิธี Conformal Mapping ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำ Conformal Mapping มาคำนวณในขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันระหว่างวัตถุ (Complementary Surface Registration) ด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้ที่สุด (Iterative Closest Point) เพื่อหาจุดที่สัมพันธ์กันระหว่างฟันกับรากฟันเทียมและฟันข้างเคียง ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือ ชุดคำสั่งย่อยที่ทำหน้าที่วิเคราะห์และประมวลผลภาพสามมิติ และช่วยในการออกแบบฟันปลอม โดยการแสดงผลภาพแบบสามมิติ เพื่อให้ผู้ใช้มองเห็นมุมต่าง ๆ และตำแหน่งการวางตัวของฟันปลอมที่เหมาะสม

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

SITTICHAJ POMTHONG : COMPUTER-ASSISTED SIMULATION  
FOR DENTAL IMPLANTS. THESIS ADVISOR : PARAMATE  
HORKAEW, Ph.D., 101 PP.

IMAGE SEGMENTATION/SURFACE RECONSTRUCTION/MAPPING/SURFACE  
PARAMETERIZATION/ITERATIVE CLOSEST POINT

Formerly, dental implants are highly dependent on dentist's experience. This leads to the development of a computer system to help surgical artificial root planning (Computer Aided Dental Implant), which enhance the dental operations and increase the safety on the operation of artificial root systems help, using a computer model in 3D denture help structure is one step toward the simulation of the artificial dental root by a physical analysis of the denture. This is very important, in considering the size and location of the denture to fit grinder, artificial tooth root and the location of the side of the treated.

This research started from a dataset of the denture from the Computed Tomography (CT) imaging. In this study, other teeth elements such as the surrounding background must be separated from the remaining teeth via image segmentation technique. This step includes how to opt amongst the region growing, Gaussian mixture models and relaxation labeling algorithms most appropriately. After that, the 3D picture of the teeth can be displayed using the Marching Cube. The resultant tooth models can then be used to analyze spatial variations of the projecting surface (Surface parameterization on the unit spherical coordinates) using Conformal Mapping. Finally, the conformably mapped parameters will then be used to calculate the data fusion

between the teeth objects (Complementary Surface Registration) by means of the nearest point (Iterative Closest Point). From this point geometrical relationship between the artificial teeth and dental root is obtained side. The expected benefits of this research in guiding 3D denture design.

School of Computer Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และในด้านการดำเนินงานวิจัยดังนี้

อาจารย์ ดร. ประเมศวร์ ห่อแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสในการศึกษาครั้งนี้ และเป็นผู้ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ดร. เสาวภาคย์ โสคติวิรัช นักวิจัยที่ปรึกษาโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย ที่ให้โอกาสที่ดีมาเสมอ และคำแนะนำทางด้านวิชาการที่ดีตลอดมา

ศูนย์เทคโนโลยีทางพันธุกรรมชั้นสูงที่สนับสนุนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน

คุณปฐมพงษ์ พันนุรัตน์ คุณวิรัชกร ศรีพิพัฒน์กุล คุณวุฒติพล หมัดเส้น คุณชนาทร ทะนานทอง คุณณัฐพล พันนุรัตน์ และบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

คุณสรารัตน์ มุสิกพัฒน์ คุณกนิษฐา ประสมศรี และทุกคนที่เป็นแรงบันดาลใจและกำลังใจที่ดีตลอดมา

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด อุปการะเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งจนประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สิทธิชัย ป้อมทอง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 การแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation).....	5
2.2.1 การประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ (Gaussian Mixture Model).....	5
2.2.2 การเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ (Relaxation Labeling).....	8
2.2.3 การขยายพื้นที่ (Region Growing).....	10
2.3 การสร้างรูปสามมิติ (Surface Reconstruction).....	11
2.4 การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรและการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม.....	14
2.4.1 การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปร (Surface Parameterization).....	14
2.4.2 การขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม (Spherical Expansion).....	19
2.5 การซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว (Surface Registration).....	20
2.5.1 การทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันแบบดั้งเดิม (Iterative closest point).....	21



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	Generalized Total Least Squares Iterative Closest Point (GTLS ICP).....	25
2.5.3	การทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันและคล้ายกันแบบเร็ว (Fast Iterative Closest Point : Fast ICP).....	26
2.6	งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.7	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
<b>3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>32</b>
3.1	กล่าวนำ.....	32
3.2	ระเบียบวิธีวิจัย.....	32
3.3	ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม.....	33
3.3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา.....	34
3.3.2	โครงสร้างของระบบ.....	34
3.4	การสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT.....	43
3.4.1	การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์.....	44
3.4.2	การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ.....	45
3.4.3	การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่.....	47
3.5	ขั้นตอนการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยใช้ การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและการ เปรียบเทียบความโค้ง (Surface Registration with Real Valued Spherical Harmonic Expansion and Curvature Matching).....	48
3.5.1	การปรับพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วย ด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบสแกน.....	50
3.5.2	การขยายทรงกลมด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	50
3.5.3	การหาค่าความโค้งบนพื้นผิวฟันปลอม.....	51
3.5.4	การซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมที่ได้กับข้อมูลฟันจำลองด้วย วิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด.....	52
3.6	สรุปวิธีดำเนินการวิจัย.....	53

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>4</b>	<b>การทดสอบและผลการทดสอบ</b>	<b>54</b>
4.1	กล่าวนำ	54
4.2	ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม	54
4.2.1	ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงาน ทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan)	54
4.2.2	ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม	56
4.3	การสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT	64
4.4	ขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว โดยใช้การขยายพื้นผิวด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลม แบบฮาร์โมนิกและการเปรียบเทียบความโค้ง	70
4.4.1	การปรับพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วย ด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว	70
4.4.2	การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก ในแต่ละลำดับ	73
4.4.3	การหาค่าความโค้งของพื้นผิว	78
4.4.4	การทดสอบการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด	82
4.5	การอภิปรายผล	92
<b>5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>94</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย	94
5.1.1	สรุปผลการสร้างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม	94
5.1.2	สรุปผลการสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT	95
5.1.3	สรุปผลการขั้นตอนการใส่ฟันปลอมด้วยการซ้อนทับกัน ระหว่างพื้นผิว	95
5.2	ข้อจำกัดของงานวิจัย	96
5.3	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	96
	รายการอ้างอิง	97

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	100
ประวัติผู้เขียน	.....	101

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
4.1	แผนผังการแสดงลำดับขั้นตอนการพัฒนาขั้นตอนวิธีในการใส่ฟันปลอม เพื่องานทันตกรรมรากฟันเทียม.....	71
4.2	ตารางแสดงผลการหาค่าความโค้งเฉลี่ย.....	78
4.3	ตารางแสดงผลการหาค่าความโค้งของเกาส์.....	79
4.4	ตารางแสดงผลการหาค่าความโค้งที่สอดคล้องกันที่จุดเว้าลึก (Umbilic Point).....	81
4.5	ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิม กับฟันปลอมที่ถูกหมุน 30 องศา กับแกน $x$ .....	83
4.6	ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับ ฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก ในลำดับที่ 4 หมุน 30 องศา กับแกน $x$ .....	83
4.7	ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับ ฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก ในลำดับที่ 8 หมุน 30 องศา กับแกน $x$ .....	84
4.8	ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับ ฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก ในลำดับที่ 16 หมุน 30 องศา กับแกน $x$ .....	84
4.9	ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิม กับฟันปลอมที่ถูกเลื่อน 10 จุดภาพกับแกน $x$ .....	85
4.10	ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับ ฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก ในลำดับที่ 4 เลื่อน 10 จุดภาพกับแกน $x$ .....	85
4.11	ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับ ฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก ในลำดับที่ 8 เลื่อน 10 จุดภาพกับแกน $x$ .....	86

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดระหว่างพินปลอมเดิมกับพินปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก ในลำดับที่ 16 เลื่อน 10 องศา กับแกน $x$ .....	86
4.13 ตารางแสดงรูปสำหรับการทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุด.....	87

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 ภาพตัวอย่างการสร้างตัวแปรบนทรงกลมหนึ่งหน่วยของรูปหอคอย โดยที่ภาพ (ก) คือรูปภาพสามมิติต้นแบบ ภาพ (ข) รูปการสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบจุดกระจายสม่ำเสมอ (Tutte mapping) และภาพ (ค) การสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบสงวนมุม (Conformal mapping)	18
2.17 ภาพตัวอย่างการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลมด้วยรูปแบบฟูเรียร์	20
2.18 ขั้นตอนการทำงานที่ซ้อนทับกันระหว่างจุดบนพื้นผิวทั้ง 2	21
2.19 ภาพตัวอย่างการเปรียบเทียบจุดระหว่างวัตถุ $X$ และ วัตถุ $P$	22
2.20 ภาพตัวอย่างการเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุ $X$ และวัตถุ $P$	24
2.21 ภาพตัวอย่างการซ้อนทับกันระหว่างวัตถุ $X$ และ วัตถุ $P$	25
2.22 การค้นหาจุดโดยการสร้างกรอบ	27
2.23 ภาพการสร้างกล่องเพื่อการทดลองในขนาดที่ต่างกัน	27
2.24 ภาพการค้นหาจุดในแต่ละกล่อง	28
2.25 ภาพอธิบายของคำประกอบการหาความโค้ง	29
3.1 แผนภาพการใช้ในแต่ละกรณี (Use case Diagram)	34
3.2 แผนภาพแสดงระบบทั้งหมดของโปรแกรม	35
3.3 แผนภาพแสดงการทำงานที่ละชั้นของการแสดงพื้นป्लอมที่ต้องการและกำหนดตำแหน่งที่วางพื้นป्लอมในระบบ	38
3.4 แผนภาพแสดงการทำงานที่ละชั้นของโมดูลการปรับเปลี่ยนรูปร่างของพื้นป्लอมด้วยมือ	39
3.5 แผนภาพแสดงการทำงานที่ละชั้นของโมดูลการปรับเปลี่ยนรูปร่างของพื้นป्लอมด้วยกล่องเครื่องมือ	40
3.6 แผนภาพแสดงการทำงานที่ละชั้นของโมดูลการลบข้อมูลของพื้นป्लอม	41
3.7 ภาพพื้นป्लอมจากเครื่องสแกน CT	43
3.8 ภาพตัวอย่างการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ	46
3.9 แผนผังขั้นตอนวิธีการใส่พื้นป्लอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว	49
4.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม	55

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนผังการแสดงลำดับขั้นตอนการพัฒนาขั้นตอนวิธีในการใส่ ฟันปลอมเพื่องานทันตกรรมรากฟันเทียม..... 2
2.1	ภาพตัวอย่างเป็นรูปภาพเบคทีเรีย..... 6
2.2	ภาพ (ก) กราฟที่เก็บข้อมูลเป็นจำนวนความถี่ตามความเข้มของแต่ละ ละจุดภาพและภาพ (ข) คือกราฟที่ประมาณ โดยฟังก์ชันเกาส์..... 6
2.3	รูปภาพเบคทีเรียที่ผ่านกระบวนการหาความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันเกาส์..... 8
2.4	ตัวอย่างผลการทดลองการแยกองค์ประกอบภาพด้วยวิธีเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุด ภาพประกอบด้วยภาพ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพผ่านกระบวนการหาความน่าจะเป็น จากฟังก์ชันเกาส์ ภาพ (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) เป็นภาพผ่านกระบวนการเพิ่มความน่าจะเป็น ให้แต่ละจุดภาพโดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 1, 2, 5 และ 10 ตามลำดับ..... 10
2.5	แผนผังกระบวนการขยายพื้นที่..... 11
2.6	ตัวอย่างการขยายพื้นที่กับรูปเบคทีเรีย..... 11
2.7	พิจารณาจุดภาพบน 2 แผ่นภาพที่ติดกัน..... 12
2.8	รูปแบบต่าง ๆ ของการสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม..... 12
2.9	(ก) ภาพการสร้างตัวชี้ (Index) และ (ข) ภาพตัวอย่างการสร้างตัวชี้..... 13
2.10	รูปการสร้างจุดบนพื้นผิว..... 13
2.11	รูปมุมมองตาข่ายสามเหลี่ยม..... 15
2.12	ภาพตัวอย่างการเปลี่ยน โดเมนตัวแปรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยของรูปหม้อต้มน้ำ..... 16
2.13	ภาพตัวอย่างการเปลี่ยน โดเมนตัวแปรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยของพื้นผิว..... 16
2.14	ภาพการหาอนุพันธ์บนพื้นผิวสามมิติ..... 17
2.15	ภาพตัวอย่างการสร้างตัวแปรบนทรงกลมหนึ่งหน่วยของรูปกระต่าย โดยที่ ภาพ (ก) รูปภาพสามมิติต้นแบบ ภาพ (ข) รูปการสร้างตัวแปรของพื้นผิว แบบจุดกระจายสม่ำเสมอ (Tutte mapping) และภาพ (ค) การสร้าง ตัวแปรของพื้นผิวแบบสงวนมุม (Conformal mapping)..... 18

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ภาพแสดงการสร้างภาพสามมิติจากภาพสแกนของคนไข้ โดยสามารถกำหนดช่วงของความเข้มที่จะแสดงได้.....	55
4.3 ภาพแสดงการแสดงผลภาพสามมิติ.....	56
4.4 ภาพแสดงปุ่มที่ใช้สำหรับเริ่มการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม.....	56
4.5 ภาพหน้าต่างการเลือกฟันปลอม.....	57
4.6 ภาพการเลือกตำแหน่งที่ฟันจะแสดงบนหน้าต่าง Axial.....	58
4.7 ภาพการเลือกตำแหน่งที่ฟันจะแสดง โดยอ้างอิงกับหน้าต่าง Coronal.....	58
4.8 ภาพการเลือกตำแหน่งที่ฟันจะแสดง โดยอ้างอิงกับหน้าต่าง Sagittal.....	59
4.9 โปรแกรมแสดงพื้นผิวฟันปลอมที่ถูกเลือก.....	59
4.10 หน้าต่างแสดงภาพขั้นตอนการปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันด้วยมือในขั้นตอนต่าง ๆ.....	60
4.11 ภาพการคลิกขวาเพื่อเข้าสู่การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยกล่องเครื่องมือ.....	61
4.12 หน้าต่างเครื่องมือเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนรูปร่าง.....	62
4.13 หน้าต่างข้อมูลของฟันปลอมที่อยู่ในระบบ.....	63
4.14 ข้อมูลสำหรับชื่อของฟันปลอมในแต่ละตำแหน่ง.....	63
4.15 ภาพการคลิกขวาเพื่อลบข้อมูลของฟันปลอม.....	64
4.16 ภาพฟันปลอมจากเครื่องสแกน CT ในแผ่นภาพที่ 23.....	65
4.17 ภาพกราฟแสดงความถี่ของความเข้ม (Histogram) และภาพกราฟประมาณความถี่ ของความเข้มด้วยฟังก์ชันรูปร่างผสมของเกาส์.....	65
4.18 ภาพกราฟแสดงผลลัพธ์ของรูปฟันปลอมด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์.....	66
4.19 การแยกองค์ประกอบด้วย Relaxation จำนวน 1, 5, 10 และ 20 รอบ ตามรูป (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ.....	66
4.20 ตัวอย่างการขยายพื้นที่ในฟันปลอมซี่ต่าง ๆ.....	67
4.21 รูปภาพสามมิติของภาพสแกนฟันปลอมกับดินน้ำมัน.....	68
4.22 ภาพ (ก) และ (ข) แสดงรูปภาพสามมิติของภาพสแกนฟันปลอมที่ผ่าน การแยกองค์ประกอบด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์.....	68



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 (ก) และ (ข) แสดงรูปภาพสามมิติของภาพสแกนพื้นปโลมที่ผ่านการ แยกองค์ประกอบด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นของแต่ละจุดภาพ.....	69
4.24 ตัวอย่างภาพสามมิติของภาพสแกนพื้นปโลมที่ผ่าน การแยกองค์ประกอบด้วยการขยายพื้นที่.....	69
4.25 ภาพตัวอย่างที่ 1 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	73
4.26 ภาพตัวอย่างที่ 2 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	74
4.27 ภาพตัวอย่างที่ 3 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	74
4.28 ภาพตัวอย่างที่ 4 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	75
4.29 ภาพตัวอย่างที่ 5 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	75
4.30 ภาพตัวอย่างที่ 6 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	76
4.31 ภาพตัวอย่างที่ 7 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	76
4.32 ภาพตัวอย่างที่ 8 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	77
4.33 ภาพตัวอย่างที่ 9 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก.....	78
4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนการหมุน.....	88
4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนการเคลื่อนที่.....	88
4.36 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นก่อนการทดลอง.....	90
4.37 แสดงผลการทดสอบด้วยผู้สังเกต 1 ราย.....	90
4.38 แสดงผลการทดลองกับขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกัน.....	91
4.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองการซ้อน.....	91

# บทที่ 1

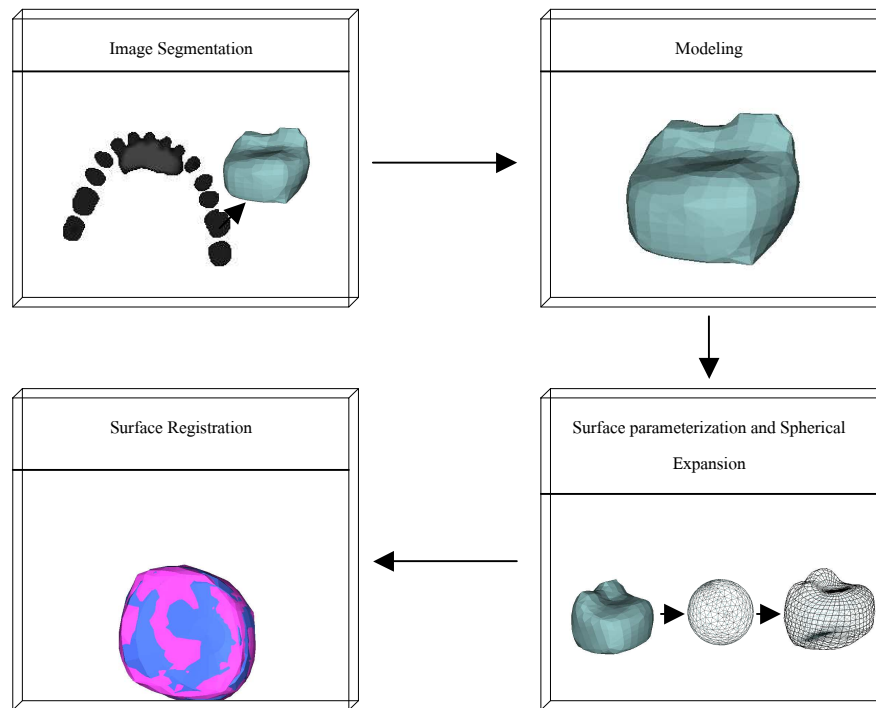
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เนื่องจากฟันแต่ละซี่มีหน้าที่จำเพาะ ดังนั้นเมื่อมีการสูญเสียฟันแท้ไปจึงต้องมีวิธีการสร้างฟันขึ้นมาทดแทน วิธีหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายได้แก่การทำฟันปลอม นอกจากนี้ปัจจุบันยังมีวิธีที่ทำให้ผู้รับการรักษารู้สึกว่าได้สูญเสียฟันและรากฟันไป ได้แก่การทำทันตกรรมรากฟันเทียม (Dental Implants) เนื่องจากด้วยวิธีการนี้รากฟันเทียมและฟันปลอมที่ใช้สร้างมาจากวัสดุที่มีโครงสร้างและลักษณะคล้ายกับกระดูกจริง ๆ ทำให้การปลูกถ่ายรากฟันมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าการทำฟันปลอมประเภทอื่น ๆ สำหรับขั้นตอนในงานทันตกรรมรากฟันเทียม ทันตแพทย์ต้องอาศัยประสบการณ์อย่างสูงในการฝังรากฟันเทียม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัด (Computer Aided Surgery) รากฟันเทียม เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้านทันตกรรม และเพิ่มความปลอดภัยในการผ่าตัดรากฟันเทียม การใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองลักษณะในสามมิติก็เป็นขั้นตอนหนึ่ง เพื่อใช้ในการจำลอง (Simulation) ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม โดยจะมีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟันปลอม ซึ่งสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ โครงสร้าง ขนาด และตำแหน่งของฟันปลอมที่เหมาะสมกับกราม รากฟันเทียมและตำแหน่งของฟันข้างเคียงของผู้รับการรักษา ผลลัพธ์ที่จะได้ก็คือข้อมูลที่ใช้ในการวางแผนสำหรับการผ่าตัดรากฟันเทียม และสังเคราะห์ฟันปลอมโดยผ่านกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ต้นแบบ (Rapid Prototyping) ฟันปลอมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อนำไปใช้งานจริงก็จะยังคงลักษณะรูปร่างของฟัน ซึ่งทำให้สามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งจากการสำรวจในเบื้องต้นผู้วิจัยพบว่าจะไม่เคยมีซอฟต์แวร์ที่รองรับการทำงานร่วมกันระหว่างการออกแบบฟันปลอมกับการทำทันตกรรมรากฟันเทียม ในปัจจุบันจึงเป็นที่มาของข้อเสนอโครงการนี้

จากงานวิจัยดังกล่าวทางนักวิจัยได้พัฒนาระบบการจำลองการใส่ฟันปลอมแบบดั้งเดิมเพื่ออธิบายความซับซ้อนในการใช้งานของระบบเก่า ซึ่งเป็นที่มาของขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวของฟันปลอมกับองค์ประกอบข้างเคียง สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวของฟันปลอมกับองค์ประกอบข้างเคียงประกอบด้วย การแยกองค์ประกอบของภาพ (Image Segmentation) การจำลองภาพสามมิติ (Modeling) การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปร (Surface Parameterization) การขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม (Spherical Expansion) และการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว (Surface Registration) ซึ่งมีลำดับการพัฒนาขั้นตอน

วิธีดังรูปที่ 1.1 โดยผลลัพธ์ของการทดสอบขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับการใช้งานของระบบการใส่ฟันปลอมแบบดั้งเดิม สุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในลักษณะของขั้นตอนวิธี (Algorithm)



รูปที่ 1.1 แผนผังการแสดงผลลำดับขั้นตอนการพัฒนาขั้นตอนวิธีในการใส่ฟันปลอมเพื่องานทันตกรรมรากฟันเทียม

จากแผนผังแสดงขั้นตอนในงานวิจัยต่าง ๆ สุดท้ายแล้วงานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยให้ทันตแพทย์สามารถวางแผนในงานทันตกรรมรากฟันเทียม โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์กึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic) ในการใส่ฟันปลอมเพื่อให้เหมาะสมกับองค์ประกอบรอบข้างได้มากที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาและทดสอบขั้นตอนวิธีในการจำลองการใส่ฟันปลอมแบบกึ่งอัตโนมัติในงานทันตกรรมรากฟันเทียม โดยแบ่งจุดประสงค์ย่อยดังนี้

- 1) เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan)

- 2) เพื่อช่วยวิเคราะห์และวางแผนการจำลองการใส่ฟันปลอมในงานทันตกรรมรากฟันเทียมของทันตแพทย์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
- 3) เพื่อประสานความร่วมมือระหว่างนักวิจัยในหน่วยงานวิจัยหลัก เช่น สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในโครงการทุนสถาบันบัณฑิตและวิทยาศาสตร์ไทย (TGIST)
- 4) เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยซึ่งอยู่ในรูปขั้นตอนวิธีไปผนวกเข้ากับระบบปฏิบัติการร่วมสำหรับการประมวลผลภาพ (SUT Imaging Platform) และใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ทางการแพทย์เพื่องานทันตกรรมรากฟันเทียม

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับ โครงการวิจัยนี้ต้องการนำเสนอขั้นตอนวิธี (Algorithm) และการทำงานของ การซ้อนทับกันระหว่างจุดบนพื้นผิวฟันปลอมกับองค์ประกอบรอบข้างเพื่อการแสดง วิเคราะห์ และประมวลผลภาพสามมิติ โดยพัฒนาระบบไว้สำหรับเปรียบเทียบการทำงานของขั้นตอนการจำลอง การใส่ฟันปลอมในงานทันตกรรมรากฟันเทียมแบบดั้งเดิมกับระบบการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวของฟันปลอมกับองค์ประกอบข้างเคียง สำหรับขั้นตอนวิธีที่จะใช้ ร่วมงานวิจัยแจกแจงได้ดังต่อไปนี้

- 1) พัฒนาระบบการจำลองการใส่ฟันปลอมในงานทันตกรรมรากฟันเทียมแบบดั้งเดิม
- 2) ทดลองการแยกองค์ประกอบบนภาพ (Image Segmentation) โดยเปรียบเทียบวิธีต่าง ๆ และเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุด
- 3) ทดลองการจำลองรูปฟันในสามมิติด้วยเทคนิคการต่อกันของลูกบาศก์ (Marching Cube)
- 4) ทดลองปรับโครงสร้างฟันปลอมในสามมิติ ด้วยการสร้างตัวแปรเชิงพื้นผิวและการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม (Surface Parameterization and Spherical Expansion)
- 5) ทดลองการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว (Surface Registration) ของโครงสร้างฟันผู้ป่วย กับฟันปลอม

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

โครงการวิจัยที่เสนอเป็นงานวิจัยสำหรับสนับสนุนงานทันตกรรมรากฟันเทียม ผลลัพธ์ที่ได้ อยู่ในลักษณะของขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการจำลองลักษณะ โครงสร้างของฟันปลอมในสามมิติ และเป็นส่วนหนึ่งของซอฟต์แวร์ต้นแบบ ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการทำทันตกรรมรากฟัน

เทียม ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในกระบวนการผ่าตัดกระดูกสันหลังเทียมและการใส่ฟันปลอม ซึ่งท้ายที่สุดแล้วชุดคำสั่งย่อจะอยู่ในรูปซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และสามารถจะเผยแพร่ไปสู่กลุ่มเป้าหมายอันประกอบด้วย ทันตแพทย์ สำหรับประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองลักษณะโครงสร้างของฟันปลอมในสามมิติคือ ชุดคำสั่งย่อที่ทำหน้าที่วิเคราะห์และประมวลผลภาพสามมิติ และช่วยในการออกแบบฟันปลอม โดยการแสดงผลลัพท์ของฟันปลอมที่เหมาะสมในลักษณะของภาพสามมิติ เพื่อให้ผู้ใช้วิเคราะห์และวางแผนในมุมมองต่าง ๆ และตำแหน่งการวางตัวของฟันปลอมที่เหมาะสมกับโครงสร้างทางใบหน้าของผู้เข้ารับการรักษา (Patient Specific Simulation)

โดยสรุป หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ สามารถแจกแจงได้ดังต่อไปนี้

- 1) โรงพยาบาล สถาบัน และ หน่วยงานด้านสาธารณสุข และวิทยาศาสตร์สุขภาพ
- 2) มหาวิทยาลัย และสถาบันการศึกษา ที่มีการเปิดสอนวิชาสาขาทันตแพทยศาสตร์
- 3) องค์กรที่ดำเนินการวิจัยด้านเทคโนโลยีการบำบัด และออกแบบเวชภัณฑ์รักษา
- 4) คลินิกทันตกรรม

## 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

รายละเอียดเกี่ยวกับงานวิจัยทั้งหมดจะกล่าวถึงในบทถัดไปดังนี้ *บทที่ 2* จะเป็นการกล่าวถึงวรรณกรรมและรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพ ขั้นตอนวิธีการจำลองภาพสามมิติ ขั้นตอนวิธีการสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปร ขั้นตอนวิธีการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม ขั้นตอนวิธีการหาความโค้งของพื้นผิว และขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว *บทที่ 3* จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น ขั้นตอนการสร้างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม ขั้นตอนการสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT และขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก *บทที่ 4* เป็นผลการทดสอบขั้นตอนวิธีทั้งหมดที่กล่าวมา โดยจะแสดงผลการทดสอบในรูปแบบของรูปภาพ ตารางหรือกราฟ *บทที่ 5* เป็นการสรุปและอภิปรายผลการทดลอง ปัญหาและอุปสรรคที่พบ และข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอถึงขั้นตอนวิธีการจำลองการใส่ฟันปลอมในงานทันตกรรมรากฟันเทียม สำหรับในบทนี้ได้อธิบายถึงรายละเอียดขั้นตอนวิธีของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยประกอบไปด้วย ขั้นตอนวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพ ขั้นตอนวิธีการจำลองภาพสามมิติ ขั้นตอนวิธีการสร้างตัวแปรพื้นผิว ขั้นตอนวิธีการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม ขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว และทฤษฎีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

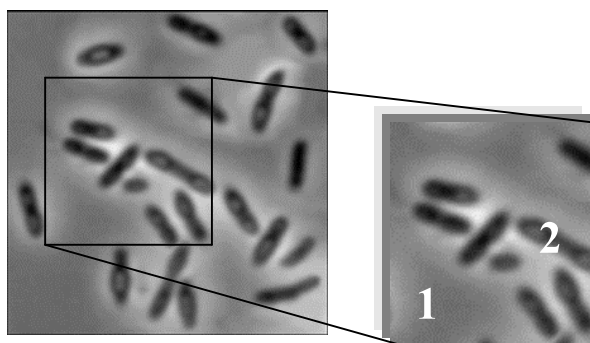
#### 2.2 การแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation)

จากข้อมูลที่นำมาใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นภาพสแกนฟันปลอมจากเครื่องสแกน CT โดยภาพที่ได้มีองค์ประกอบของภาพที่นอกเหนือจากฟันปลอมซึ่งประกอบด้วย ดินน้ำมัน และพื้นหลัง จึงต้องมีขั้นตอนในการแยกองค์ประกอบของภาพเพื่อให้เหลือแต่ภาพของฟันปลอมแล้วจึงนำไปสร้างเป็นภาพสามมิติ ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพดังต่อไปนี้

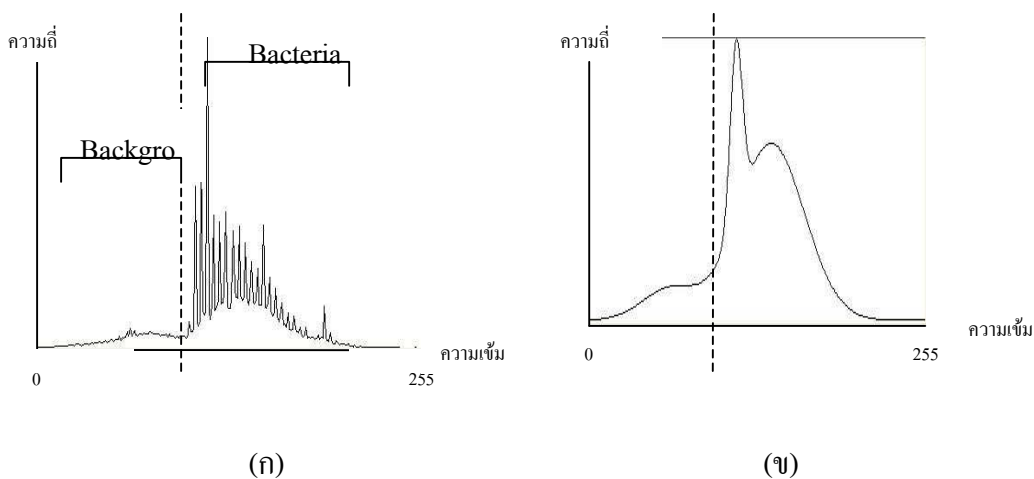
##### 2.2.1 การประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ (Gaussian Mixture Model :GMM)

การแยกองค์ประกอบภาพด้วยวิธีการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ (C.M. Bishop, 1995) จะใช้วิธีการประมาณค่ามากที่สุดด้วยเทคนิควิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Expectation Maximization (EM) วิธีดังกล่าวเป็นลักษณะของกระบวนการทำซ้ำ (Recursive) โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการประมาณการ (คาดคะเน) ซึ่งเป็นขั้นตอนของการคาดคะเนค่าขั้นต้นก่อน และขั้นตอนถัดมาคือการปรับปรุงค่า แล้วส่งค่ากลับไปให้ขั้นตอนที่แรกทำงานในลักษณะของกระบวนการทำซ้ำ โดยกระบวนการทั้งหมดจะหยุดทำก็ต่อเมื่อขั้นตอนในรอบที่ผ่านมากับรอบปัจจุบันมีค่าใกล้เคียงกันมาก ๆ โดยการประมาณค่าในงานวิจัยชิ้นนี้ก็คือค่าความน่าจะเป็นของความเข้มแต่ละจุดภาพ ซึ่งจะใช้ฟังก์ชันเกาส์ในการประมาณค่าความน่าจะเป็น เนื่องจากต้องการจัดกลุ่ม (Clustering) ของแต่ละกลุ่มตามความน่าจะเป็นว่าจุดภาพควรถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มใด โดยสามารถอธิบายการทำงานดังกล่าวได้ด้วยการยกตัวอย่างเป็นรูปภาพแบคทีเรีย (รูปที่ 2.1) ขนาด  $256 \times 256$  จุดภาพ (Pixels) โดยภาพดังกล่าวมีองค์ประกอบของรูปภาพอยู่ 2 องค์ประกอบคือ พื้นหลัง และแบคทีเรีย (หมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับ) โดยจะอธิบายจากกราฟที่เก็บข้อมูลเป็นจำนวนความถี่

ตามความเข้มของแต่ละจุดภาพ (Histograms) ดังรูปที่ 2.2 (ก) จากกราฟจะสามารถประมาณได้ว่าค่าความเข้มในช่วงใดเป็นองค์ประกอบใด ดังรูปที่ 2.2 (ข) แต่การประมาณดังกล่าวอาจทำให้มีความคลาดเคลื่อนบ้างและอาจจะต้ององค์ประกอบที่ต้องการได้ครบถ้วน เพราะฉะนั้นวิธีการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันเกาส์จะทำให้กราฟที่ได้ราบเรียบขึ้น จะช่วยให้การประมาณค่าในแต่ละช่วงของแต่ละความเข้มว่าเป็นองค์ประกอบใดได้แม่นยำมากขึ้น ดังรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.1 ภาพตัวอย่างเป็นรูปภาพแบคทีเรีย



รูปที่ 2.2 ภาพ (ก) กราฟที่เก็บข้อมูลเป็นจำนวนความถี่ตามความเข้มของแต่ละจุดภาพและภาพ (ข) คือกราฟที่ประมาณ โดยฟังก์ชันเกาส์

ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดสามารถอธิบายได้จากสูตรทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้ โดยมีฟังก์ชันในการหาค่าความน่าจะเป็นหลักเป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของเกาส์ดังสมการที่ 2.1

$$g(x : m_k, \sigma_k) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_k)^D} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\|x-m_k\|}{\sigma_k}\right)^2} \quad (2.1)$$

กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปร  $p_k^{(0)}, m_k^{(0)}, \sigma_k^{(0)}$

ขั้นที่ 1 ประมาณการ (E Step)

$$p^{(i)}(k | n) = \frac{p_k^{(i)} g(x_n : m_k^{(i)}, \sigma_k^{(i)})}{\sum_{k=1}^K p_k^{(i)} g(x_n : m_k^{(i)}, \sigma_k^{(i)})} \quad (2.2)$$

ขั้นที่ 2 ปรับปรุงค่า (M Step)

$$m_k^{(i+1)} = \frac{\sum_{n=1}^N p^{(i)}(k | n) x_n}{\sum_{n=1}^N p^{(i)}(k | n)} \quad (2.3)$$

$$\sigma_k^{(i+1)} = \sqrt{\frac{1}{D} \frac{\sum_{n=1}^N p^{(i)}(k | n) \|x_n - m_k^{(i+1)}\|^2}{\sum_{n=1}^N p^{(i)}(k | n)}} \quad (2.4)$$

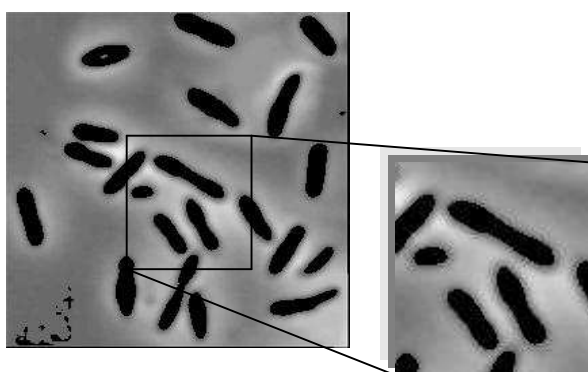
$$p_k^{(i+1)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p^{(i)}(k | n) \quad (2.5)$$

โดยที่  $m_k$  คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มทุกๆ จุดภาพ  
 $\sigma_k$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $p_k$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก  
 $p(k | n)$  คือ ความน่าจะเป็นที่จุดภาพที่  $n$  จะเป็นองค์ประกอบที่  $k$   
 $N$  คือ จำนวนจุดภาพทั้งหมด  
 $D$  คือ มิติของข้อมูล



$K$	คือ จำนวนองค์ประกอบทั้งหมดของรูป
$n$	คือ จุดภาพ
$k$	คือ องค์ประกอบ (Label)
$i$	คือ รอบที่ใช้ในการคำนวณ

กระบวนการทั้งหมดจะหยุดทำก็ต่อเมื่อค่าความน่าจะเป็นของรอบปัจจุบันมีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในรอบที่ผ่านมาเรื่อยๆ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงภาพดังรูปที่ 2.3 โดยมีเงื่อนไขในการแสดงภาพคือถ้าความเข้มของจุดภาพอยู่ในช่วงของผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบของแบคทีเรียถึงผลรวมระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบของแบคทีเรีย แล้วให้ความเข้มเท่ากับ 0 (สีดำ) นอกจากนั้นให้ความเข้มคงเดิม



รูปที่ 2.3 รูปภาพแบคทีเรียที่ผ่านกระบวนการหาความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันเกาส์

จากรูปที่ 2.3 จะพบว่าการใช้ฟังก์ชันเกาส์ในการประมาณค่าความน่าจะเป็น ซึ่งจากผลการทดสอบยังมีองค์ประกอบของกลุ่มพื้นหลังบางส่วนกลายมาเป็นองค์ประกอบของแบคทีเรีย จึงต้องมีขั้นตอนการเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับทุกจุดภาพ (M.Hansen, 1993) ว่าควรจะอยู่ในองค์ประกอบใด ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 2.2.2

### 2.2.2 การเพิ่มความน่าจะเป็นให้แก่จุดภาพ (Relaxation Labeling)

การแยกองค์ประกอบภาพด้วยวิธีการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แก่จุดภาพ คือการเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับแต่ละจุดภาพ โดยอ้างอิงจากจุดภาพรอบข้างว่าจุดภาพรอบข้างส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบใด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ทำงานวิจัยว่าต้องการตรวจสอบจากจุดรอบข้างมากน้อยขนาดไหน ในที่นี้ผู้จัดทำงานวิจัยจะทดลองโดยใช้ 8 จุดรอบข้างเป็นจุดอ้างอิง เพื่อให้ความน่าจะเป็นของ

แต่ละจุดภาพมีค่ามากที่สุด จึงต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำ ในการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นของแต่ละจุดภาพ ซึ่งมีทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ดังนี้

กำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้น  $\sum_{k=0}^K p(n|k) = 1$  ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นของแต่ละจุด

โดยจะต้องมีค่าความน่าจะเป็นในแต่ละทุก ๆ องค์ประกอบรวมกันเท่ากับหนึ่งเสมอ

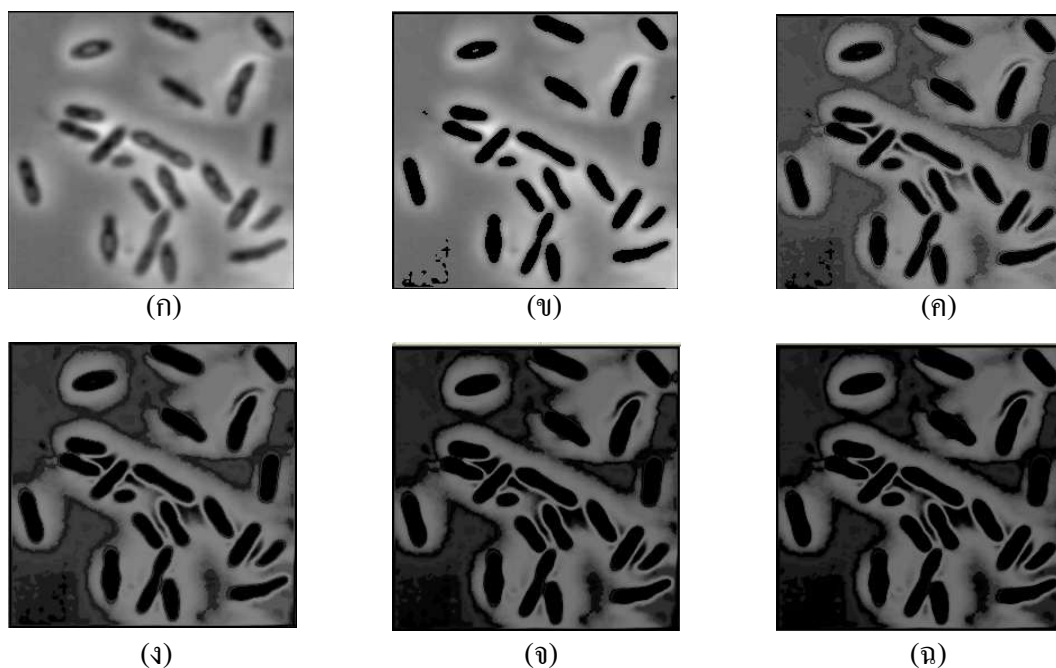
$$q_y^{(i)}(n_x | k_l) = \sum_{m=1}^K r([n_x | k_l], [n_y | k_m]) P^{(i)}(n_y | k_m) \quad (2.5)$$

สมการที่ (2.6) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ตรวจสอบความน่าจะเป็นของจุด  $n_x$  จากจุดรอบข้างที่  $n_y$  ว่ามีความน่าจะเป็นที่จะอยู่ในองค์ประกอบที่  $k_l$  มากสักเท่าไร โดยตรวจสอบจากสัมประสิทธิ์  $r([n_x | k_l], [n_y | k_m])$  มีเงื่อนไขถ้า  $k_l = k_m$  แล้ว  $r([n_x | k_l], [n_y | k_m]) = 1$  นอกนั้นแล้ว  $r = 0$  ซึ่งก็หมายความว่าค่าความน่าจะเป็นที่ต่อเมื่อจุดรอบข้างเป็นองค์ประกอบเดียวกันกับจุดที่กำลังตรวจสอบเพื่อนำไปคำนวณหาฟังก์ชัน  $Q$  ซึ่งฟังก์ชัน  $Q$  เป็นฟังก์ชันผลรวมของฟังก์ชัน  $q$  ดังนี้

$$Q^{(i)}(n_x | k_l) = \sum_{y=1}^n C_{xy} q_y^{(i)}(n_x, k_l) \quad (2.6)$$

โดยที่  $C_{xy}$  คือสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนัก (Coefficients weight) มีเงื่อนไขถ้า  $n_x$  อยู่ติดกับ  $n_y$  แล้ว  $C_{xy} = 1$  นอกนั้นแล้ว  $C_{xy} = 0$  ซึ่งหมายความว่าสมการที่ (2.7) จะถูกคำนวณที่ต่อเมื่อจุดนั้นเป็นจุดรอบข้างของ  $n_x$  เท่านั้น ขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นดังสมการที่ (2.8)

$$P^{(i+1)}(n_x | k_l) = \frac{P^{(i)}(n_x | k_l) Q^{(i)}(n_x | k_l)}{\sum_{k=1}^K P^{(i)}(n_x | k_l) (Q^{(i)}(n_x | k_l))} \quad (2.7)$$

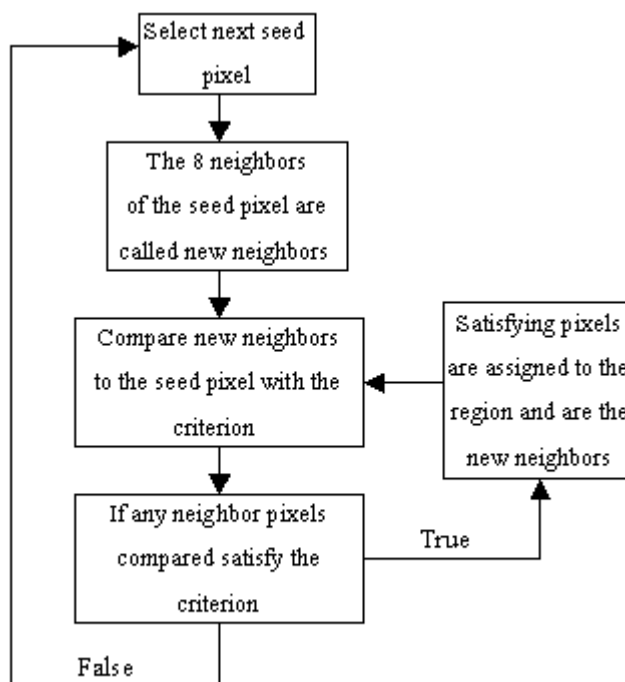


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลการทดลองการแยกองค์ประกอบภาพด้วยวิธีเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพประกอบด้วยภาพ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพผ่านกระบวนการหาความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันเกาส์ ภาพ (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) เป็นภาพผ่านกระบวนการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพโดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 1, 2, 5 และ 10 ตามลำดับ

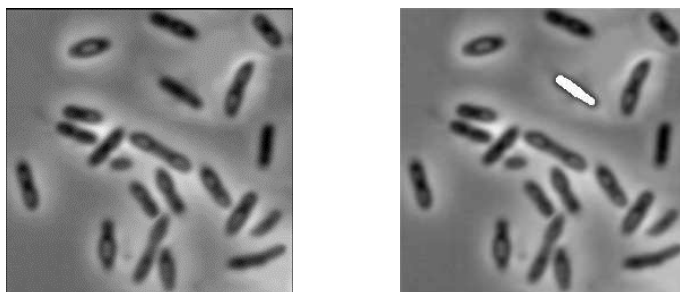
จากการทดสอบขั้นตอนวิธีการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ ด้วยรูปภาพแบคทีเรียปรากฏว่าจากรูปภาพที่ 2.4 (ข) ซึ่งเป็นรูปภาพของการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ จะเห็นองค์ประกอบของแบคทีเรีย และพื้นหลังยังแยกกันไม่ค่อยชัดเจน แต่เมื่อใช้ขั้นตอนวิธีการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพจะเห็นว่ารูปแบคทีเรียและพื้นหลังจะค่อย ๆ ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 2.4 (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) ตามลำดับจนกระทั่งรูปภาพเริ่มคงที่ (Converge)

### 2.2.3 การขยายพื้นที่ (Region Growing)

เป็นขั้นตอนวิธีแยกองค์ประกอบด้วยวิธีการขยายพื้นที่ (R.M. Haralick and L.G. Shapiro, 1985) ในองค์ประกอบนั้น ๆ โดยกำหนดให้มีการขยายพื้นที่ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพื้นที่ที่ขยายเข้าสู่องค์ประกอบใหม่ ขั้นตอนทั้งหมดจะเริ่มจากการกำหนดจุดภาพในองค์ประกอบที่ต้องการ และจะขยายต่อไปโดยคำนวณจากความเข้มของจุดข้างเคียง ซึ่งเงื่อนไขการหยุดขยายจะตรวจสอบจากค่าความเข้มของจุดที่จะขยายกับค่าความเข้มเฉลี่ยของจุดข้างเคียงที่ต้องการว่ามีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มเฉลี่ยหรือไม่ ถ้ามากกว่าจะหยุดคำนวณ โดยกระบวนการทั้งหมดทำตามแผนผังในรูปที่ 2.5 และตัวอย่างการทดสอบขั้นตอนการขยายพื้นที่ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการขยายพื้นที่



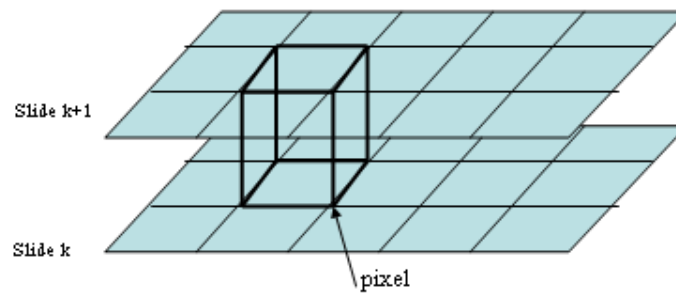
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการขยายพื้นที่กับรูปแบคทีเรีย

### 2.3 การสร้างรูปสามมิติ (Surface Reconstruction)

เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยเป็นภาพสองมิติที่ได้จากเครื่องสแกน CT และผ่านขั้นตอนการแยกองค์ประกอบของภาพแล้ว ในงานวิจัยนี้ต้องการการสร้างรูปสามมิติ เพื่อนำรูปพื้นป्लอมสามมิติที่ได้ไปใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม โดยขั้นตอนในการสร้างรูปจะใช้ขั้นตอนวิธีการต่อกันของลูกบาศก์ (Marching Cubes Algorithm) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

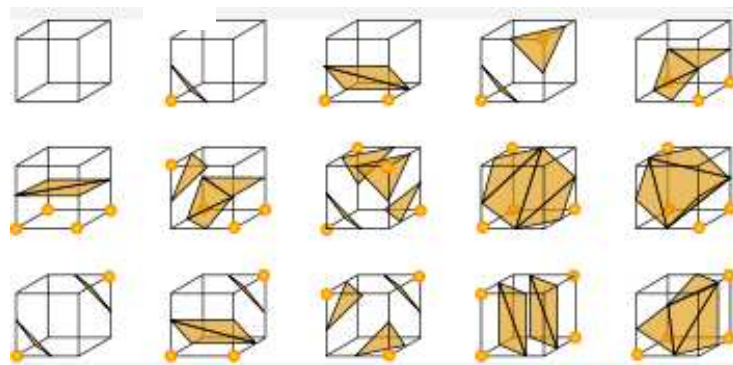
แนวคิดของการสร้างรูปด้วยขั้นตอนวิธีการต่อกันของลูกบาศก์ (William E. Lorensen and Harvey E. Cline, 1987) คือการสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangle Mesh) จากความเข้มของจุดภาพ (Pixel) ในแต่ละแผ่นภาพดังรูปที่ 2.7 แล้วนำจุดภาพไปสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมโดยไปเปรียบเทียบรูปแบบดังรูปที่ 2.8 จนเกิดเป็นกล่องภาพ (Voxels) แล้วนำตาข่ายสามเหลี่ยมในแต่ละกล่องภาพมาต่อกัน จะได้ภาพสามมิติที่ต้องการ ซึ่งอธิบายด้วยขั้นตอนวิธีได้ดังนี้

- 1) เลือกแผ่นภาพ 2 แผ่นภาพที่อยู่ติดกัน เพื่อพิจารณาทีละ 4 จุดภาพของทั้ง 2 แผ่นภาพ



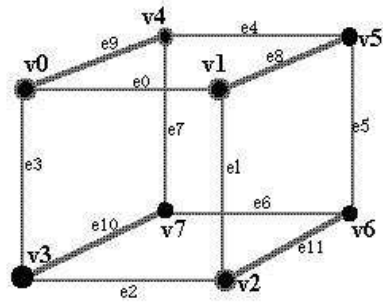
รูปที่ 2.7 พิจารณาจุดภาพบน 2 แผ่นภาพที่ติดกัน

- 2) พิจารณา 8 จุดภาพว่าตรงกับรูปแบบใดให้สร้างตาข่ายสามเหลี่ยมตามรูปแบบนั้น



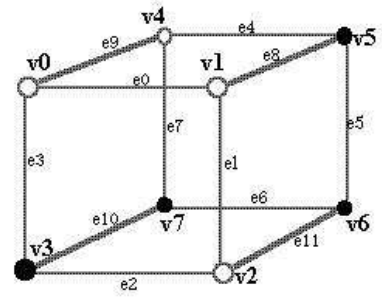
รูปที่ 2.8 รูปแบบต่าง ๆ ของการสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม

3) สร้างตัวชี้ (Index) ในแต่ละกรณี



Index = v0 v1 v2 v3 v4 v5 v6 v7

(ก)



Index = 0 0 0 1 0 1 1 1

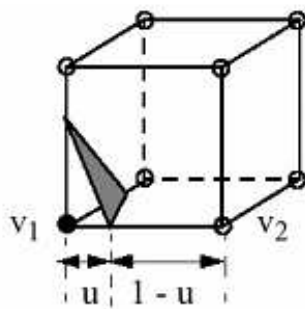
(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) ภาพการสร้างตัวชี้ (Index) และ (ข) ภาพตัวอย่างการสร้างตัวชี้

4) สร้างจุดบนพื้นผิวจากการตัดกันของแต่ละขอบ (edge)

$$v_i = v_1 \cdot (1-u) + v_2 \cdot u \tag{2.8}$$

โดยที่  $u = \frac{v_1 - v_i}{v_1 - v_2}$



รูปที่ 2.10 รูปการสร้างจุดบนพื้นผิว

- 5) คำนวณหาเวกเตอร์ตั้งฉาก (normal vector) ของแต่ละจุดบนลูกบาศก์
- 6) คำนวณหาเวกเตอร์ตั้งฉาก (normal vector) ของแต่ละจุดบนตาข่ายสามเหลี่ยม

## 2.4 การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรและการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม (Surface Parameterization and Spherical Expansion)

ในกระบวนการสร้างพื้นผิวสามมิติด้วยวิธีการต่อกันของลูกบาศก์ (Marching cubes) พบว่าพื้นผิวที่ได้ยังคงมีปัญหาในเรื่องพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบเท่าที่ควร และจำนวนจุดที่มากเกินไป ซึ่งเมื่อนำพื้นผิวดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการทำงานต่าง ๆ พบว่าการสูญเสียเวลาส่วนมากเกิดมาจากพื้นผิวสามมิติที่มีจำนวนจุดมากเกินไป วิธีหนึ่งที่จะช่วยให้ปัญหาดังกล่าวหมดไปคือการสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรและการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้พื้นผิวราบเรียบขึ้นและลดจำนวนจุดลงโดยที่ยังคงรูปลักษณะเดิมของพื้นผิวไว้ โดยขั้นตอนวิธีทั้งหมดมีดังนี้

### 2.4.1 การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปร (Surface Parameterization)

การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรคือการเปลี่ยนโดเมนตัวแปร (Parametric domain) ของพื้นผิวสามมิติให้มีโดเมนตัวแปรที่ลดลง โดยปกติพื้นผิวสามมิติอยู่บนโดเมนที่ขึ้นกับตัวแปร 3 ตัว คือ  $x, y$  และ  $z$  ในการสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรสามารถเปลี่ยนพื้นผิวดังกล่าวให้อยู่บนโดเมนที่ขึ้นกับตัวแปรเพียง 2 ตัว เช่น เปลี่ยนพื้นผิววงกลม (Takashi Kanai, Hiromasa Suzuki และ Fumihiko Kimura, 1997) ตัวแปรจะขึ้นกับ  $r, \theta$  หรือ เปลี่ยนพื้นผิววงกลมหนึ่งหน่วย (Xianfeng Gu, Yalin Wang, Tony F. Chan, Paul M. Thompson และ Shing-Tung Yau, 2004) ตัวแปรจะขึ้นกับ  $\theta, \phi$  เป็นต้น การลดโดเมนตัวแปรจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์และจัดการกับพื้นผิวได้สะดวกขึ้น การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรจึงเป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งสามารถอธิบายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังต่อไปนี้

#### 1. การสร้างตัวแปรของพื้นผิววงกลมหนึ่งหน่วย

(Surface Parameterization on unit Circle)

การสร้างตัวแปรของพื้นผิววงกลมหนึ่งหน่วย (Takashi Kanai, Hiromasa Suzuki, Fumihiko Kimura, 1997) คือการปรับเปลี่ยนระหว่งตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh) ของพื้นผิวสามมิติที่อยู่ในลักษณะรูปทรงแบบเปิด (พื้นผิวสามมิติที่มีขอบนอก) ไปอยู่บนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในสอง มิติ เนื่องจากตาข่ายสามเหลี่ยมที่จะถูกอ้างอิงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยต้องมีมุมที่ใกล้เคียงหรือขนาดที่สมมาตรกับตาข่ายสามเหลี่ยมบนพื้นผิวสามมิติเดิม ดังนั้นสูตรของการปรับเปลี่ยนโดเมนของพื้นผิวดังกล่าวจะอยู่ในรูปของสมการพลังงานสะสมของสปริงในแต่ละจุดโดยอ้างอิงกับจุดรอบข้างดังนี้

$$E(f) = \frac{1}{2} \sum_{(u,v) \in K} k_{u,v} \|f(u) - f(v)\|^2 \quad (2.9)$$

โดยที่ค่า  $k$  คือค่าคงตัวสปริง ในหลักการของการอ้างอิงจุดและตาข่ายสามเหลี่ยมในแต่ละจุดนั้นจะต้องมีพลังงานสะสมที่น้อยที่สุด ดังนั้นจึงมีการคำนวณหาค่าน้อยที่สุดของพลังงานจากสมการ (2.10) ซึ่งขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

สมการพลังงาน  $E$  สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ได้

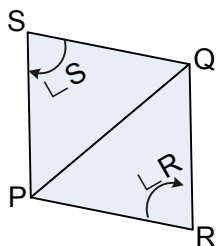
$$E = \mathbf{V}^T \mathbf{H} \mathbf{V} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\mathbf{V} = [V_t, V_b]$ ,  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{tt} & H_{tb} \\ H_{bt} & H_{bb} \end{bmatrix}$

จากสมการที่ 2.11 หาอนุพันธ์อันดับหนึ่งเพื่อหาค่าต่ำสุดของพลังงานดังนั้น

$$\nabla E = \frac{\partial E}{\partial V_t} = 2H_{tt}V_t + 2H_{tb}V_b = 0 \quad (2.11)$$

เพื่อให้มุมในตาข่ายสามเหลี่ยมบนพื้นผิวสามมิติใกล้เคียงเมื่อปรับไปอยู่บนวงกลมแล้ว สามารถทำได้โดยการกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ให้มีความสัมพันธ์กับมุมของสามเหลี่ยมที่อยู่ระหว่างขอบที่พิจารณานั้น ๆ ดังรูปที่ 2.11

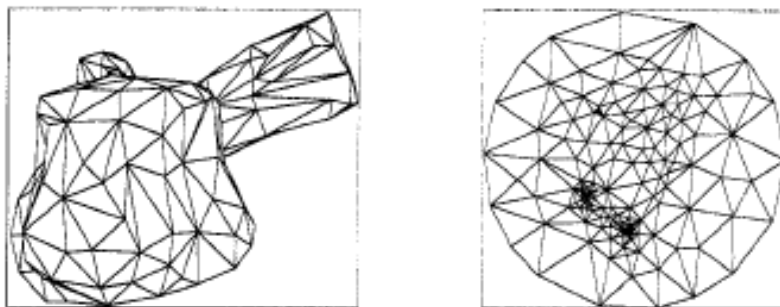


รูปที่ 2.11 รูปมุมบนตาข่ายสามเหลี่ยม

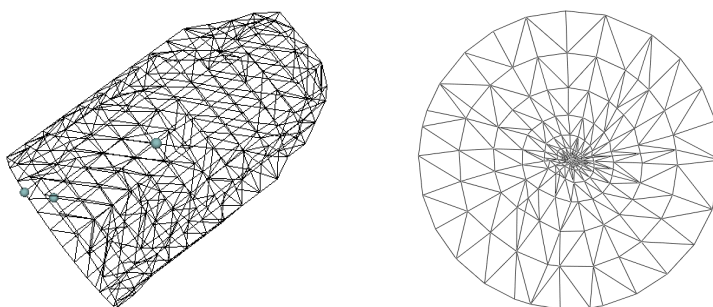


จากความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมสามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังสมการ

$$k_{u,v} = -\frac{1}{2}(\cot \angle R + \cot \angle S) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.12 ภาพตัวอย่างการเปลี่ยน โดเมนตัวแปรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยของรูปหม้อต้มน้ำ

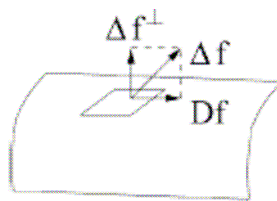


รูปที่ 2.13 ภาพตัวอย่างการเปลี่ยน โดเมนตัวแปรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยของพื้นเงี้ยว

## 2. การสร้างตัวแปรของพื้นผิวบนทรงกลมหนึ่งหน่วย

(Surface Parameterization on unit Sphere)

การสร้างตัวแปรของพื้นผิวบนทรงกลมหนึ่งหน่วย (Xianfeng Gu, Yalin Wang, Tony F. Chan, Paul M. Thompson, and Shing-Tung Yau, 2004) คือการปรับเปลี่ยนระหว่างตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh) ของพื้นผิวสามมิติที่อยู่ในรูปแบบปิด (พื้นผิวสามมิติที่ไม่มีขอบนอก) ไปอยู่บนทรงกลมรัศมีหนึ่ง แนวคิดคล้ายกับการสร้างตัวแปรของพื้นผิบบนวงกลมหนึ่งหน่วย คือต้องคำนวณหาพลังงานสะสมของสปริงในแต่ละจุดดังสมการ 2.9 แต่สิ่งที่ต่างกันคือการหาอนุพันธ์โดยสามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้



รูปที่ 2.14 ภาพการหาอนุพันธ์บนพื้นผิวสามมิติ

จากรูปที่ 2.20

$$D\bar{f}(v) = \Delta\bar{f}(v) - (\Delta\bar{f}(v))^\perp \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$\Delta(f) = \sum_{\{u,v\} \in K} k_{u,v} (f(v) - f(u)). \quad (2.14)$$

$$(\Delta\bar{f}(v))^\perp = \langle \Delta\bar{f}(v), \bar{n}(\bar{f}(v)) \rangle \bar{n}(\bar{f}(v)) \quad (2.15)$$

โดยที่  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  คือการคูณแบบจุด (Dot product) ใน  $R^3$   
 $\bar{n}$  คือเวกเตอร์ตั้งฉาก (Normal vector) ของจุด

ชนิดของการสร้างตัวแปรของพื้นผิวบนทรงกลมหนึ่งหน่วย

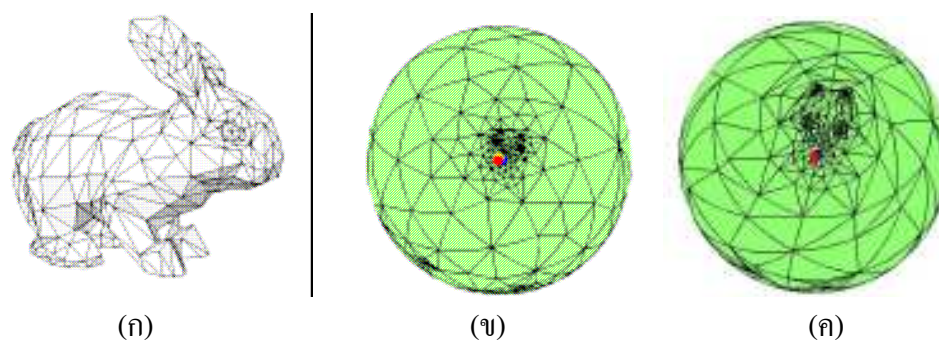
1. การสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบจุดกระจายสม่ำเสมอ (Tutte mapping)

การสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบไม่สงวนคือการสร้างตัวแปรโดยมุมในตาข่ายสามเหลี่ยมบนทรงกลมจะมีมุมใกล้เคียงกันทั้งหมดแต่จะไม่ใกล้เคียงกับมุมในตาข่ายสามเหลี่ยมบนพื้นผิวเดิม สามารถทำการสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบไม่สงวนมุมได้ โดยการกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง งานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นหนึ่งในทุก ๆ จุด

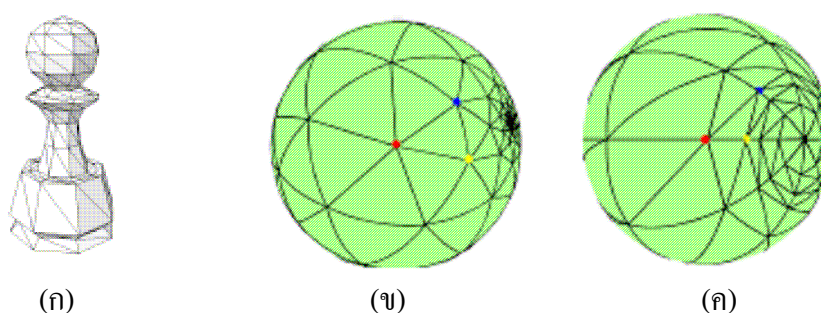
$$k_{u,v} = 1 \quad (2.16)$$

## 2. การสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบสงวนมุม (Conformal mapping)

การสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบสงวนมุมคือการสร้างตัวแปรโดยมุมในตาข่ายสามเหลี่ยมบนทรงกลมจะมีมุมใกล้เคียงกับมุมในตาข่ายสามเหลี่ยมบนพื้นผิวเดิม สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ให้มีความสัมพันธ์กับมุมของสามเหลี่ยมที่อยู่ระหว่างขอบที่พิจารณานั้น ๆ ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งรูปที่ 2.21 กับ 2.22 เป็นตัวอย่างการสร้างตัวแปรของพื้นผิวบนทรงกลม



รูปที่ 2.15 ภาพตัวอย่างการสร้างตัวแปรบนทรงกลมหนึ่งหน่วยของรูปกระต่าย โดยที่ ภาพ (ก) รูปภาพสามมิติต้นแบบ ภาพ (ข) รูปการสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบจุดกระจายสม่ำเสมอ (Tutte mapping) และ (ค) การสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบสงวนมุม (Conformal mapping)



รูปที่ 2.16 ภาพตัวอย่างการสร้างตัวแปรบนทรงกลมหนึ่งหน่วยของรูปหอคอย โดยที่ ภาพ (ก) คือรูปภาพสามมิติต้นแบบ ภาพ (ข) รูปการสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบจุดกระจายสม่ำเสมอ (Tutte mapping) และ (ค) การสร้างตัวแปรของพื้นผิวแบบสงวนมุม (Conformal mapping)

### 2.4.2 การขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม (Spherical Expansion)

การปรับพื้นผิวให้จุดของพื้นผิวน้อยลงและพื้นผิวราบเรียบขึ้นอีกทั้งยังคงรูปเดิมไว้ สามารถทำได้โดยการขยายจุดบนทรงกลมที่ได้จากการสร้างตัวแปรของพื้นผิวในหัวข้อที่ (2.4.1) มากระจายจุดออกด้วยความถี่ที่สม่ำเสมอด้วยฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Spherical harmonic Function) ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดอธิบายได้ดังนี้ การขยายจุดของพื้นผิวทรงกลมด้วยฟังก์ชันฮาร์โมนิก (W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. Vetterling, 1988) คือการแปลงจุดบนทรงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยซึ่งเป็นจุดในพิกัดเชิงฉาก (Cartesian, สมการ 2.17) ด้วยรูปแบบของฟูรีเยร์ (Fourier Transform, สมการ 2.18) และจะกระจายจุดต่าง ๆ ในความถี่คงตัวสม่ำเสมอ ด้วยฟังก์ชันทรงกลมฮาร์โมนิก (Spherical Harmonic, สมการ 2.19) โดยความถี่การกระจายจุดจะขึ้นอยู่กับมุม  $\theta$  และ  $\phi$  บนทรงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย และการกลับคืนสู่รูปทรงเดิมจะขึ้นกับลำดับตามอนุกรมฟูรีเยร์ (ค่าหนึ่งในสมการที่ 2.19) ขั้นตอนทั้งหมดอธิบายได้ดังนี้

$$\mathbf{x}(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} x(\theta, \phi) \\ y(\theta, \phi) \\ z(\theta, \phi) \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

โดยที่  $x, y$  และ  $z$  เป็นพิกัดเชิงฉาก (Cartesian)

$$\theta \in [0, 2\pi] \text{ และ } \phi \in [0, \pi]$$

ฟังก์ชันแปลงพื้นผิวในรูปแบบฟูรีเยร์ (Fourier series)

$$\mathbf{x}(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l c_l^m Y_l^m(\theta, \phi) \quad (2.18)$$

ฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Spherical harmonic Function) ซึ่ง

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}} P_l^{|m|}(\cos \theta) e^{i|m|\phi} \quad (2.19)$$

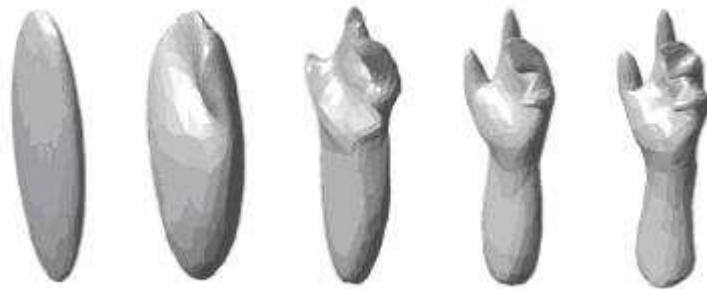
โดยที่ฟังก์ชันโพลีโนเมียล  $P$

$$P_l^m(x) = \frac{(-1)^m}{2^l l!} (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^{m+1}}{dx^{m+1}} (x^2-1)^l \quad (2.20)$$

สัมประสิทธิ์  $c$  หาได้โดย

$$c_l^m = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})(\mathbf{Z}^T \mathbf{V}) \quad (2.21)$$

ซึ่ง  $Z_{l,m} = Y_l^m(\theta_i, \phi_i)$  และ  $V$  คือจุดบนพื้นผิวเดิม



รูปที่ 2.17 ภาพตัวอย่างการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลมด้วยรูปแบบฟูเรียร์

จากรูป 2.23 คือภาพการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลมในแต่ละระดับ (order) ของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) จะเห็นว่าเมื่อลำดับยิ่งสูงพื้นผิวที่ได้จะใกล้เคียงกับพื้นผิวเดิม

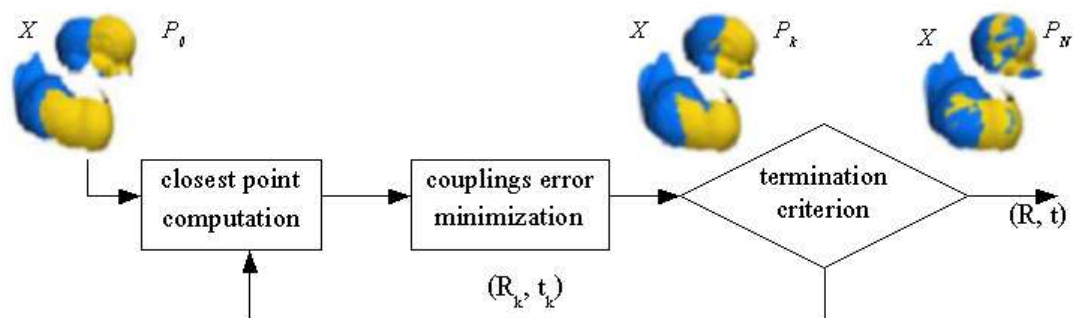
## 2.5 การซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว (Surface Registration)

ในการนำพื้นผิวที่ปัดลอกเข้าไปซ้อนทับกับพื้นผิวโครงสร้างพื้นฐานของผู้ป่วยนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและความสัมพันธ์กันของพื้นผิวทั้งสองปัญหาที่เกิดขึ้นคือพื้นผิวทั้งสองยังไม่สัมพันธ์กันวิธีหนึ่งที่จะช่วยปรับให้พื้นผิวทั้งสองให้สอดคล้องกันได้คือ การซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว (Surface Registration) ซึ่งเทคนิควิธีที่จะนำมาใช้ในการซ้อนทับกันคือ การทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กัน (Iterative Closest Point : ICP) เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันนั้นจะเป็นงานในลักษณะที่ต้องการเปรียบเทียบวัตถุสองชิ้นที่มีลักษณะและมีความคล้ายคลึงกัน โดยหลักการทำงานคือจะมีทำการค้นหาจุดที่คล้ายคลึงกันที่สุดของวัตถุทั้งสอง และปรับตำแหน่งของวัตถุ

นั้นเพื่อจะซ้อนทับวัตถุทั้งสองให้ลงตัวที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กันในทางด้านการแพทย์ ทางด้านภูมิศาสตร์ ทางด้านเคมี เป็นต้น โดยเทคนิคในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุจะใช้วิธีทางด้านการคำนวณทางคณิตศาสตร์จะเน้นการเปรียบเทียบข้อมูลในเชิงสถิติ (Statistic) มีการหาค่าเฉลี่ยของวัตถุต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นต้องนำระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ วางแผนและคำนวณ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องที่สุด โดยเนื้อหาบทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการคำนวณของวิธีดังกล่าว ซึ่งที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันนั้น มีผู้ที่ศึกษาและอธิบายขั้นตอนไว้มากมายดังตัวอย่างต่อไปนี้

### 2.5.1 การทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันแบบดั้งเดิม (Iterative closest point)

ในการซ้อนทับกันระหว่างจุดบนพื้นผิวทั้งสอง (Besl McKay, 1992) นั้นหลักการที่สำคัญก็คือ ขั้นตอนการหาจุดบนพื้นผิวอันหนึ่งเพื่อไปเปรียบเทียบกับจุดบนพื้นผิวอีกอันหนึ่งว่ามีจุดใดบ้างที่ใกล้กันที่สุด โดยหลักการดังกล่าวยังต้องอาศัยหลักการหมุนและการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุให้จุดบนพื้นผิวอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันที่สุด จะใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ อย่างเช่น การหาผลต่างกำลังสอง (Squared Euclidian Distances) การหาค่าเมตริกซ์ความแปรปรวน (Covariance matrix) เวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) ค่าเวกเตอร์ เจาะจง (Eigenvalue) และการหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean square) เป็นต้น โดยจะทำกระบวนการดังกล่าวซ้ำกับจุดอื่น ๆ ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพื้นผิวทั้งสองใกล้เคียงกันที่สุด



รูปที่ 2.18 ขั้นตอนการทำการซ้อนทับกันระหว่างจุดบนพื้นผิวทั้งสอง

ขั้นตอนหลักของการซ้อนทับกันระหว่างจุด (Iterative closest point algorithm) (จากรูปที่ 2.24)

- 1) คำนวณจุดที่ใกล้กัน โดยการหาระยะห่างกำลังสอง (Squared Euclidian distances)
- 2) คำนวณค่าเมตริกซ์การหมุนและการเคลื่อนที่ (Rotation and Translation)

3) ทำการซ้อนทับกัน โดยจะได้จุดใหม่ แล้วทำซ้ำในข้อ 1

ขั้นตอนการคำนวณของการซ้อนทับกันระหว่างจุด (Compute for Iterative Closest Point)

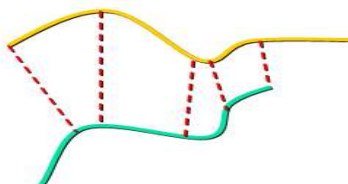
กำหนดให้  $P$  เป็นวัตถุข้อมูล (Data shape) และ  $X$  เป็นวัตถุเป้าหมาย (target shape) และ  $N_P, N_X$  เป็นจำนวนจุดในวัตถุของ  $P$  และ  $X$  โดยกำหนดให้จุด  $N_P$  คือ  $\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$  และจุด  $N_X$  คือ  $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_n\}$  และสูตรการหาระยะทางที่น้อยที่สุด

1. การคำนวณจุดที่ใกล้กัน

$$d(x, P) = \min_{i \in 1..n} d \|p_i - x\| \quad (2.22)$$

โดยที่  $d(r_1, r_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$

หาระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสอง โดยใช้สูตรการหาระยะห่างกำลังสองแล้วเทียบจุดบนวัตถุข้อมูลว่าจุดใดใกล้กันกับจุดบนวัตถุเป้าหมายที่สุด



รูปที่ 2.19 ภาพตัวอย่างการเปรียบเทียบจุดระหว่างวัตถุ  $X$  และ วัตถุ  $P$   
(เส้นสีปะคือระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่างจุดบนวัตถุทั้งสอง)

2. การคำนวณหาเมตริกการหมุนและเวกเตอร์การเคลื่อนที่

ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุต้องอาศัยเมตริกซ์การหมุนกับเวกเตอร์การเคลื่อนที่ ซึ่งต้องใช้หลักการหาของ Quaternion โดยกล่าวไว้ว่า Vector Quaternion สำหรับการหมุนคือ  $\overline{q_R}$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ 1 หน่วย (Unit Rotation Quaternion) และ เวกเตอร์การเคลื่อนที่คือ  $\overline{q_T}$  หาค่าศูนย์กลางของวัตถุ (Center of mass)

$$\bar{\mu}_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \bar{p}_i \quad \text{และ} \quad \bar{\mu}_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \bar{p}_x \quad (2.23)$$

หาค่าเมตริกซ์ความแปรปรวน (Cross-covariance matrix)

$$\sum_{px} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [(\bar{p}_i - \bar{\mu}_p)(\bar{x}_i - \bar{\mu}_x)^t] = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{p}_i \bar{x}_i^t] - \bar{\mu}_p \bar{\mu}_x^t \quad (2.24)$$

หาค่าเมตริกซ์ Quaternion

$$Q(\sum_{px}) = \begin{bmatrix} tr(\sum_{px}) & \Delta^T \\ \Delta & \sum_{px} + \sum_{px}^T - t(\sum_{px}) I_3 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

โดยที่  $A_{ij}$  คือ Anti-Symmetric matrix ซึ่ง  $A_{ij} = (\sum_{px} - \sum_{px}^T)_{ij}$

$\Delta$  คือ Column Vector ซึ่ง  $\Delta = [A_{23} \quad A_{31} \quad A_{12}]^T$

$I_3$  คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์  $3 \times 3$  (Identity matrix  $3 \times 3$ )

หาค่าเมตริกซ์ Quaternion Rotation จาก  $\bar{q}_R$  คือเมตริกซ์การหมุนโดย

$$\bar{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^t \quad (2.26)$$

การหา  $q_0, q_1, q_2$  และ  $q_3$  หาได้จากการหาค่า Eigenvalue ของ  $Q(\sum_{px})$  ที่มีค่ามากที่สุดซึ่งทำให้ได้ Eigenvector ถูกจัดเรียงใหม่ตามค่าของ Eigenvalue ซึ่ง Column แรกนั้นก็คือ  $q_0, q_1, q_2, q_3$  ตามลำดับ

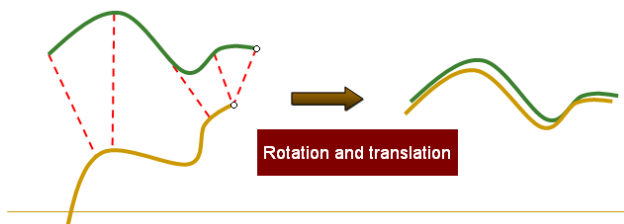
หาค่าเมตริกซ์ Quaternion Translation

$$\bar{q}_T = \bar{\mu}_x - R(\bar{q}_R) \bar{\mu}_p \quad (2.27)$$



โดยที่

$$R(\bar{q}_R) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.20 ภาพตัวอย่างการเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุ  $X$  และวัตถุ  $P$  (เส้นปะคือ ระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่างจุดบนวัตถุทั้งสอง)

### 3. การซ้อนทับกันระหว่างวัตถุ

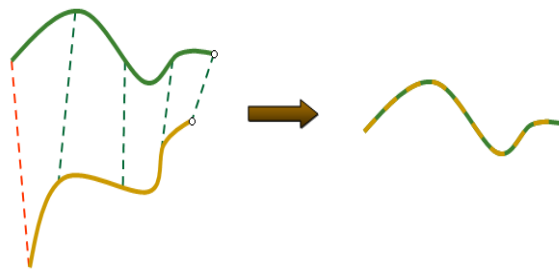
หลักการก็คือการนำเมตริกซ์การหมุนและการเคลื่อนที่ที่ได้นำไปปรับเปลี่ยนวัตถุข้อมูลเพื่อให้ได้ชุดของจุดข้อมูลใหม่ ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{p}_{t+1} = R^t \cdot \bar{p}_t + T^t \quad (2.29)$$

จากรูปที่ 2.26 จะเห็นว่าจุดบนพื้นผิวทั้งสองยังไม่ซ้อนทับกันได้พอดี ดังนั้นจึงต้อง เปรียบเทียบจุดแบบนี้อีกครั้งต้องกับไปทำข้อ 1 ซ้ำ จนกว่าค่าการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดทั้งสองมีค่าเข้าใกล้ 0 จึงจะหยุดคำนวณ ถ้าเขียนในรูปฟังก์ชันจะได้

$$J(R, T) = \sum_{i=1}^{N_p} \|x_i - Rp_i - T\|^2 \quad (2.30)$$

หรือจะกล่าวว่าจะหยุดทำซ้ำเมื่อ  $\min J(R, T)$



รูปที่ 2.21 ภาพตัวอย่างการซ้อนทับกันระหว่างวัตถุ  $X$  และวัตถุ  $P$  (เส้นปะคือระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่างจุดบนวัตถุทั้งสอง)

### 2.5.2 Generalized Total Least Squares Iterative Closest Point (GTLS ICP)

ในการใช้ขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันและคล้ายกัน (Iterative closest point) แบบเดิมนั้นยังมีจุดบกพร่องอยู่ในเรื่องที่มีกรณีของจุดที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาด (Noise) ของการซ้อนทับกันของทั้งสองวัตถุซึ่งขั้นตอนวิธี Generalized Total Least Squares Iterative Closest Point (GTLS ICP) โดย Raúl Estépar, Anders Brun และ Carl-Fredrik Westin ได้นำเสนอวิธีลดข้อผิดพลาดดังกล่าวได้ โดยอาศัยหลักการหาค่าความแปรปรวนของจุดทั้งวัตถุเป้าหมายและวัตถุข้อมูลซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นให้  $R = I_3$ ,  $T = [0, 0, 0]^T$  หรือจะหา  $R$ ,  $T$  แบบอัลกอริทึมแรกก็ได้ (ในที่นี้ผู้เสนองานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดค่าเริ่มต้นมาเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการทดลอง)
- 2) การเปลี่ยนข้อมูลจุดคือการปรับวัตถุข้อมูลให้มีลักษณะคล้ายกับวัตถุเป้าหมาย โดยอาศัยการหมุนและการเคลื่อนที่ของวัตถุข้อมูลดังนั้นจึงเปลี่ยนข้อมูลได้เป็น

$$p'_i = Rp_i + T \quad (2.31)$$

- 3) หาจุดใกล้กัน ในที่นี้เป็นการหาจุดใกล้กันระหว่างวัตถุเป้าหมายกับจุดของวัตถุข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่ในข้อ 2 ดังนั้น

$$y_i = d(p'_i, X) = \min_{i \in 1, \dots, n} d \|x_i - p'_i\| \quad (2.32)$$

## 4) ประเมินระดับความผิดพลาด

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|y_i - p_i\|^2 \quad (2.33)$$

## 5) ปรับปรุงเมตริกซ์ค่าความแปรปรวน (covariance matrix) ก่อนทำซ้ำ

$$V[y_i] = V_{ex}[y_i] + \sigma^2 I_3 \quad (2.34)$$

6) ทำการซ้อนทับกันระหว่างวัตถุซึ่งมีหลักการเหมือนอัลกอริทึมแรกแต่จะเป็นการซ้อนทับกันระหว่างจุดที่ถูกปรับปรุงแล้วซึ่งก็คือ  $y_i$  กับวัตถุข้อมูล  $p_i$  แทน ถ้าเขียนในรูปฟังก์ชันจะได้

$$J(R, T) = \sum_{i=1}^{N_p} (p_i - \bar{p}_i) V[p_i]^{-1} (p_i - \bar{p}_i) + \sum_{i=1}^{N_s} (y_i - \bar{y}_i) V[y_i]^{-1} (y_i - \bar{y}_i) \quad (2.35)$$

จะหยุดทำซ้ำเมื่อ  $J(R, T)$  มีค่าน้อยมาก โดยผลการทดลองเปรียบเทียบค่า noise ใน 2 กรณีดังนี้

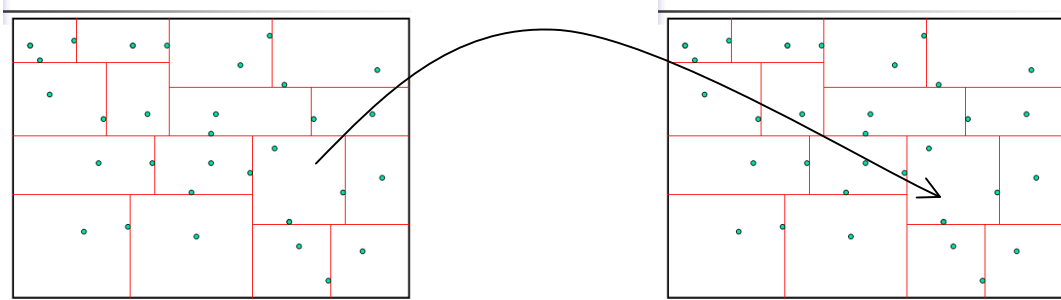
- 1) เปรียบเทียบระหว่าง ICP เดิมกับ GTLS-ICP กรณีที่เกิด Gaussian noise
- 2) เปรียบเทียบระหว่าง ICP เดิมกับ GTLS-ICP กรณีที่เกิด slash noise

ผลสรุปจากผลการทดลองพบว่าในกรณีของ Gaussian noise นั้นความผิดของทั้งสองอัลกอริทึมก็ยังไม่ต่างกันแต่ GTLS-ICP ก็ยังลด Gaussian noise ได้มากกว่าของขั้นตอนวิธีเดิมอยู่เล็กน้อย ส่วนข้อผิดพลาดแบบที่ 2 คือ slash noise นั้น GTLS-ICP จะลดข้อผิดพลาดได้มากกว่าของขั้นตอนวิธีเดิมอยู่มาก ดังนั้น GTLS-ICP ทำให้วัตถุสองวัตถุซ้อนทับกัน โดยที่ข้อผิดพลาดน้อยลง

### 2.5.3 การทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันและคล้ายกันแบบเร็ว (Fast Iterative Closest Point , Fast ICP)

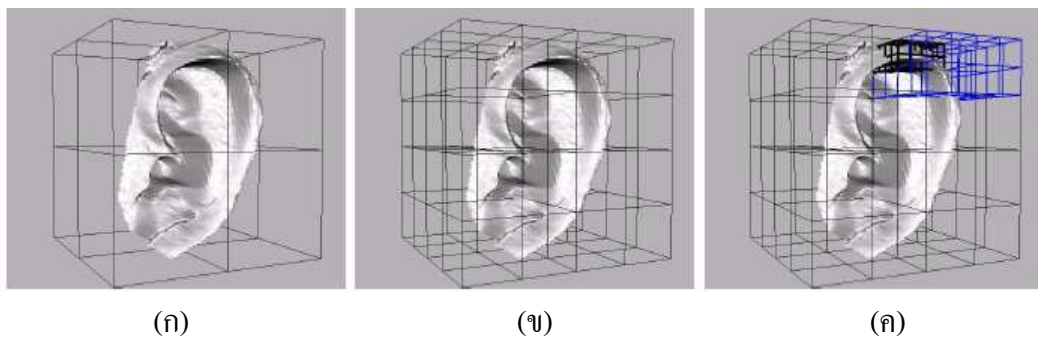
โดยหลักการคำนวณจะยึดหลักการแบบ ICP เดิมแต่ที่เพิ่มเข้ามาคือการค้นหาจุดที่ใกล้กันที่สุดได้เร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพ หลักการคิดก็คือ จากเดิมนั้นการค้นหาจุดบนวัตถุต้องไปค้นหาจุดบนวัตถุเป้าหมายทีละจุดซึ่งถ้าข้อมูลมีจุดมากก็จะทำให้การค้นหาจุดที่ใกล้กันมีความล่าช้ามาก ดังนั้นการค้นหาที่รวดเร็วจึงต้องมีการจำกัดขอบเขตที่แคบลงมา (ดังรูปสองมิติในรูปที่ 2.22) แต่ยังไม่ให้จุดที่ถูกคำนวณยังคงความถูกต้องอยู่เช่นเดิม สำหรับการทดลองนี้ได้จำกัดขอบเขตของจุด

ด้วยกล่องในจำนวนที่ต่างกันไป (ดังรูปที่ 2.23) การจำกัดขอบเขตการค้นหาจุดแบบกล่องสามารถจำกัดการค้นหาโดยการกำหนดกล่องที่จะค้นหาได้ ซึ่งหมายความว่าการทำงานกับจุดจะน้อยลง (Dennis Maier, Jürgen Hesser, Reinhard Männer, 2003) ดังรูปที่ 2.22 เป็นการกำหนดขอบเขตที่แคบลงโดยการตีกรอบแล้วพิจารณากรอบที่เหมือนกันแล้วจึงค้นหาจุดในกรอบนั้น

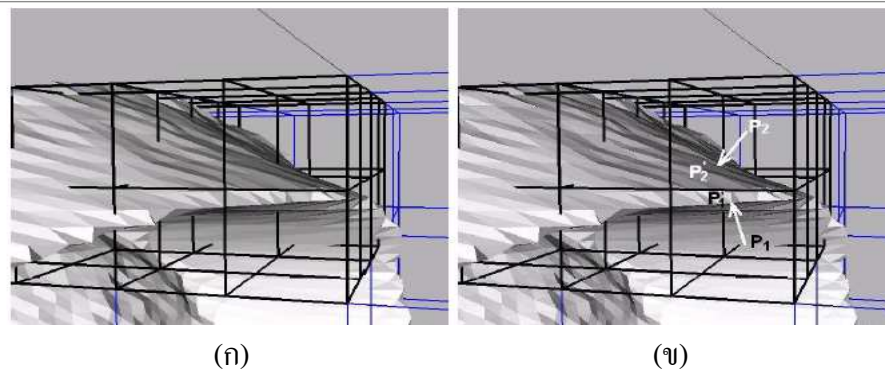


รูปที่ 2.22 การค้นหาจุดโดยการสร้างกรอบ

แต่ในสามมิติต้องสร้างกล่องภาพ (Voxels) หลังจากนั้นก็เปรียบเทียบจุดในแต่ละกล่องภาพนั้นซึ่งการทดลองนี้ได้ทดลองในกรณีที่กล่องภาพมีขนาดเท่ากันหมดแต่ขนาดของกล่องภาพแต่ละครั้งไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.23 ภาพการสร้างกล่องเพื่อการทดลองในขนาดที่ต่างกัน



รูปที่ 2.24 ภาพการค้นหาจุดในแต่ละกล่อง

สรุปการค้นหาโดยแบ่งออกเป็นกล่องก่อนค้นหาจุดนั้น ถ้าทำให้กล่องมีความเหมาะสมกับขนาดของวัตถุจะทำให้ประสิทธิภาพในการค้นหาดี ในขณะที่วัตถุเล็กจะทำให้ค้นหาได้รวดเร็ว แต่ขณะที่วัตถุใหญ่ประสิทธิภาพดีขึ้นแต่จะค้นหาได้ช้าลงเนื่องจากกล่องในการค้นหาที่จะใหญ่ตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีเดิมพบว่าการค้นหาแบบจำกัดขอบเขตเร็วกว่าเดิมเมื่อวัตถุมีขนาดใหญ่ขึ้น

## 2.6 งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการซ้อนทับกันของวัตถุที่ใช้ในการทดลองชิ้นนี้เป็นวัตถุต่างพื้นผิวกันคือพื้นผิวพื้นปโลมและพื้นผิวโครงสร้างพื้นของผู้ป่วย ดังนั้นการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันและคล้ายกันจึงเป็นเรื่องยาก วิธีหนึ่งที่จะช่วยให้การค้นหาจุดที่ใกล้กันและคล้ายกันได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นคือการค้นหาจุดที่มีลักษณะที่สอดคล้องกัน (Complementary) งานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้ความโค้งของพื้นผิวบอกลักษณะของพื้นผิวที่สอดคล้องกันเพื่อที่จะนำพื้นผิวที่สอดคล้องกันดังกล่าวไปหาจุดที่ใกล้กันและคล้ายกัน (หัวข้อ 2.5) ซึ่งความโค้งของพื้นผิวได้ถูกอธิบายไว้ดังนี้

ความโค้งของพื้นผิว (Curve of Surface) ในปริภูมิสามมิติเกิดจากการคำนวณด้วยอนุพันธ์อันดับสอง (สมการที่ 2.36) เพื่อตรวจสอบชนิดของความโค้งเมื่อเทียบกับแกน Z ซึ่งความโค้งแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ จุดนูนออก (Convex Points) จุดนูนเข้า (Concave Points) และจุดอานม้า (Saddle Points)

$$k_n = c'' \cdot V \quad (2.36)$$

โดยที่  $c''$  คือเวกเตอร์ความโค้ง (Curvature vector)

$V$  คือเวกเตอร์ตั้งฉาก (Normal vector)

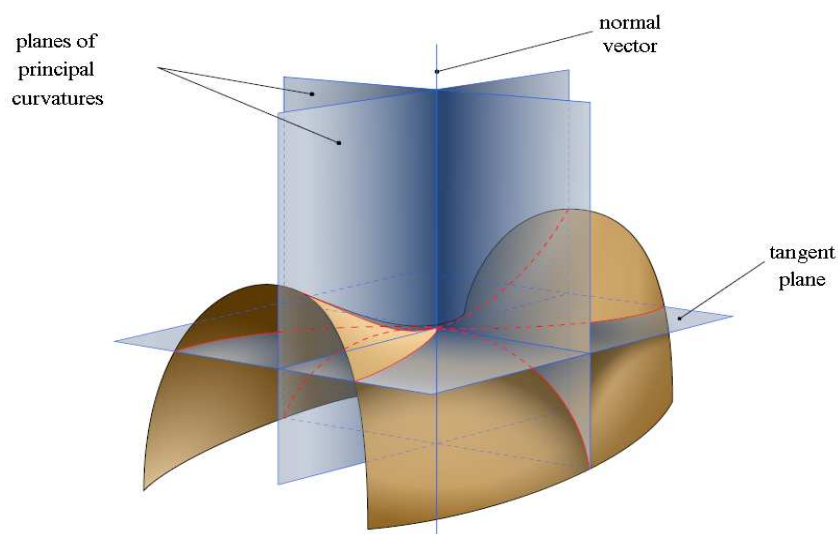
เช่นการหาความโค้งของฟังก์ชัน  $f(x) = y$

$$k_n = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad (2.37)$$

เช่นการหาความโค้งของฟังก์ชัน  $f(x, y) = z$

$$k_n = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} \quad (2.38)$$

กฎของความโค้ง (Principle Curve) ทุก ๆ ความโค้งของพื้นผิวจะประกอบด้วยเวกเตอร์ตั้งฉากและระนาบสัมผัส ณ ตำแหน่งบนพื้นผิวนั้น ซึ่งค่าความโค้งสามารถคำนวณได้จากระนาบของกฎความโค้ง (Planes of principle curvature) โดยระนาบดังกล่าวเกิดจากการตัดกันระหว่างเวกเตอร์ตั้งฉากกับระนาบสัมผัส (ดังรูป 2.25) จะได้ความโค้งที่อยู่บนหน้าตัดของระนาบของกฎความโค้งหรือที่เรียกว่า ความโค้งปกติ (Normal Curvature) คือ  $k_n$



รูปที่ 2.25 ภาพอธิบายองค์ประกอบในการหาความโค้ง

ความโค้งของเกาส์ (Gaussian Curvature) ถูกคิดค้นโดย Carl Friedrich Gauss ซึ่งความโค้งที่ได้เป็นความโค้งภายนอกของพื้นผิวในสามมิติ ค่าความโค้งของเกาส์สามารถคำนวณได้จากการคูณกันของความโค้งปกติที่สูงสุดและต่ำสุดดังสมการที่ 2.40 โดยสามารถแยกค่าความโค้งของเกาส์ที่คำนวณได้ดังนี้ ถ้าเครื่องหมายเป็นบวกหมายถึงความโค้งของพื้นผิวที่มีลักษณะนูนออกคล้ายทรงกลม (Sphere) เครื่องหมายเป็นลบหมายถึงความโค้งของพื้นผิวที่มีลักษณะเว้าคล้ายพาราโบลอยด์ (Paraboloid) และถ้าความโค้งของเกาส์มีค่าเป็นศูนย์จะหมายถึงพื้นผิวที่มีลักษณะแบนราบคล้ายระนาบ (Plane) โดยกำหนดให้

$$A_{p_0} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

โดยที่  $k_1, k_2$  คือค่าความโค้งสูงสุดและต่ำสุดของความโค้งปกติตามลำดับ

ทฤษฎีความโค้งของเกาส์ (Gaussian Curvature) ที่จุด  $P_0$

$$K(p_0) = \det(A_{p_0}) = \begin{vmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{vmatrix} = k_1 k_2 \quad (2.40)$$

ความโค้งเฉลี่ย (Mean Curvature) ถูกคิดค้นโดย Sophie Germain ในงานวิจัยของเขาเรื่อง ทฤษฎีความยืดหยุ่น (Elasticity Theory) ความโค้งเฉลี่ยคือค่าเฉลี่ยของค่าความโค้งปกติสูงสุดและต่ำสุดดังสมการที่ 2.41 เป็นการคำนวณความโค้งภายนอกของพื้นผิวในสามมิติ การจำแนกความโค้งเฉลี่ยแบ่งดังนี้ ถ้าค่าความโค้งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับศูนย์จะเป็นจุดต่ำสุดของพื้นผิว (Minimal Surface) ถ้าค่าความโค้งเฉลี่ยมีค่ามากกว่าศูนย์จะเป็นจุดนูนออก (Convex) และถ้าค่าความโค้งเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะเป็นจุดเว้าเข้า (Concave)

ทฤษฎีความโค้งเฉลี่ย (Mean Curvature) ที่จุด  $P_0$

$$H(p_0) = \frac{1}{2} \text{tr}(A_{p_0}) = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \quad (2.41)$$

โดยที่  $\text{tr}$  คือ ผลรวมของเส้นทแยงมุมของเมตริกซ์

การหาความโค้งของพื้นผิวมีวิธีในการคำนวณอื่น ๆ อีกมากมาย สำหรับงานวิจัยทันตกรรมรากฟันเทียมในการใส่ฟันปลอมได้ใช้ความโค้งของพื้นผิวด้วยวิธีเกาส์และค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการหาความโค้งของพื้นผิวในสามมิติ เพื่อทำการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวของโครงสร้างฟันผู้ป่วยกับพื้นผิวฟันปลอมต่อไป

## 2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดนั้นเป็นงานวิจัยซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในการประมวลผลภาพ และมีประโยชน์ต่องานวิจัยทันตกรรมรากฟันเทียมสำหรับการใส่ฟันปลอม โดยขั้นตอนวิธีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้แก่ การแยกองค์ประกอบภาพ ประกอบด้วยวิธี การประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ การเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ และการขยายพื้นที่ การสร้างรูปสามมิติด้วยวิธีการต่อกันของลูกบาศก์ การสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรและการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม การซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวด้วยวิธีทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด และการหาความโค้งประกอบด้วย ความโค้งของเกาส์ และความโค้งเฉลี่ย การแยกองค์ประกอบภาพถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเนื่องจากภาพสแกนฟันปลอมจากเครื่องสแกน CT มีองค์ประกอบของภาพที่นอกเหนือจากฟันประกอบด้วย ดินน้ำมัน และพื้นหลัง จึงต้องทำการแยกเฉพาะองค์ประกอบของฟันปลอมเพื่อนำไปสร้างรูปสามมิติต่อไป ซึ่งการสร้างภาพสามมิติ วิธีที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือการต่อกันของลูกบาศก์ (Marching cubes) เนื่องจากฟันปลอมในสามมิติที่ได้มีพื้นผิวที่หยาบ มีจำนวนจุดที่มาก และยากต่อการควบคุมจุดบนพื้นผิวฟันปลอม วิธีที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวคือการสร้างพื้นผิวเชิงตัวแปรบนทรงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยและตามด้วยการขยายจุดของพื้นผิวทรงกลม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นฟันปลอมที่ถูกขยายด้วยลำดับของอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งจะทำได้ฟันปลอมที่ใกล้เคียงกับลักษณะฟันปลอมแบบเดิม แต่จะมีพื้นผิวที่ราบเรียบขึ้น สามารถกำหนดจำนวนจุดได้ และสามารถควบคุมจุดบนพื้นผิวโดยอ้างอิงจากมุมบนทรงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย สำหรับความโค้งได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อคำนวณหาความโค้งที่เหมาะสมระหว่างพื้นผิวฟันปลอมกับพื้นผิวของโครงสร้างฟันรอบข้างของผู้ป่วย เพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวทั้งสองด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้ที่สุด ซึ่งขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดได้อธิบายไว้แล้วในบทถัดไป



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะทดสอบขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว (Surface Registration) โดยใช้ขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด (Iterative closest point) เพื่อนำไปใช้ในงานวิจัยที่ทำร่วมกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในหัวข้อเรื่อง ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองลักษณะ โครงสร้างฟันปลอมใน 3 มิติเพื่อใช้ในการงานทันตกรรมรากฟันเทียม (Computer-Assisted Tooth Simulation for Dental Implant) การทดสอบดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในการงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan) ซึ่งในบทนี้จะอธิบายขั้นตอนงานวิจัยทั้งหมดโดยแบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม (2) การสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT (3) ขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก

#### 3.2 ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนในการทำงานวิจัย

- 1) ศึกษาและรวบรวมสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) พัฒนาระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม
  - 2.1 ออกแบบหน้าที่ของแต่ละคลาสเพื่อเขียนแผนภาพคลาส (Class Diagram) ของระบบ
  - 2.2 ศึกษาเทคนิควิธีในการเขียนโปรแกรม
  - 2.3 ทดสอบระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม
- 3) การสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT
  - 3.1 เปรียบเทียบขั้นตอนวิธีการในการแยกองค์ประกอบภาพ
  - 3.2 สร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมด้วยวิธีการต่อกันของลูกบาศก์

- 4) ขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยขยายด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและความโค้งที่สัมพันธ์ (Real – Valued Spherical Harmonic Expansion and Curvature Relations)
  - 4.1 ปรับพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบสงวน (Surface Parameterization with Conformal Mapping)
  - 4.2 ขยายทรงกลมด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Spherical Harmonic Expansion) ในแต่ละลำดับ (order)
  - 4.3 คำนวณค่าความโค้งของพื้นผิวฟันปลอมและพื้นผิวของโครงสร้างฟันผู้ป่วยเพื่อหาค่าความโค้งของทั้งสองที่มีความสอดคล้องกัน
  - 4.4 ทำการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมที่ได้กับข้อมูลฟันจำลองด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด (Iterative Closest Point) โดยอ้างอิงจากความโค้งที่สอดคล้องกันกับการกำหนดช่วงของจุดบนพื้นผิวฟันปลอมที่ได้จากการขยายทรงกลมด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก
- 5) วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบระหว่างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมกับเทคนิคการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุดและสรุปผลการทดลอง

### 3.3 ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม

ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมเป็นส่วนหนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan) ซึ่งถูกวิจัยโดยหน่วยงาน National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) ของสำนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลลัพธ์อยู่ในรูปลักษณะของขั้นตอนวิธีสำหรับระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองลักษณะโครงสร้างของฟันปลอมในสามมิติเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม สำหรับหัวข้อนี้ได้นำเสนอระบบจำลองการใส่ฟันปลอมแบบเดิม โดยจัดทำเพื่อทดสอบและอธิบายถึงปัญหาในการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมแบบเดิม ซึ่งเป็นที่มาในการพัฒนาขั้นตอนวิธีแบบใหม่ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป สำหรับในหัวข้อนี้จะอธิบายการทำงานของระบบด้วยแผนภาพทางวิศวกรรมซอฟต์แวร์ (Software engineering) และเทคนิควิธีต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับระบบดังกล่าว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา

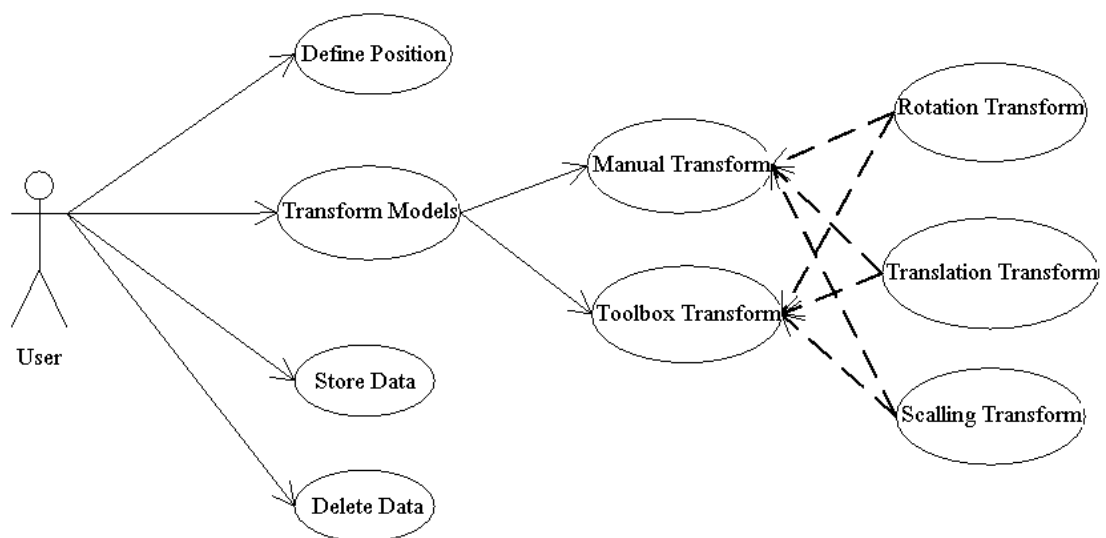
เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมเป็นส่วนหนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan) ซึ่งถูกพัฒนาไว้แล้วโดยใช้ภาษาจาวา (java) กับไลบรารี (Library) Visual Tool Kits (VTK) 5.5 บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีองค์ประกอบดังนี้ CPU Intel Core 2Duo 1.66GHz., 512 MB DDR2 of Ram.

### 3.3.2 โครงสร้างของระบบ

ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมมีโมดูลย่อยดังนี้

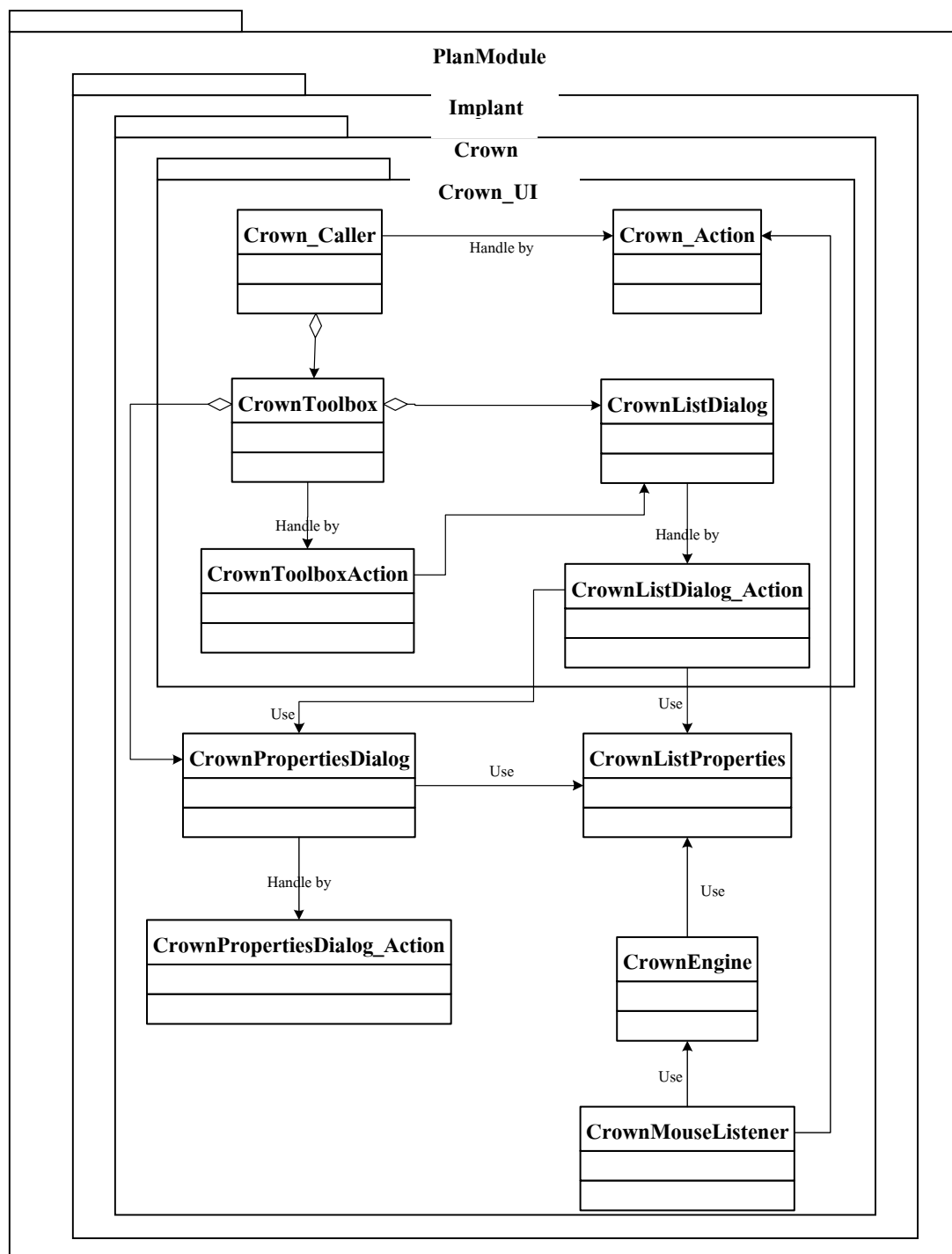
- 1) การแสดงฟันปลอมที่ต้องการและกำหนดตำแหน่งที่วางฟันปลอมในระบบ
- 2) การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ
  - การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยมือ (Manual editing)
  - การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยกล่องเครื่องมือ (Toolbox editing)
- 3) การเก็บข้อมูลของฟันปลอม
- 4) การลบข้อมูลของฟันปลอม

การทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมสามารถอธิบายด้วยแผนภาพการใช้ในแต่ละกรณี (Use case Diagram)



รูปที่ 3.1 แผนภาพการใช้ในแต่ละกรณี (Use case Diagram)

ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (Dentiplan) สามารถอธิบายด้วยแผนภาพของแต่ละคลาส (Class Diagram) ได้ดังนี้



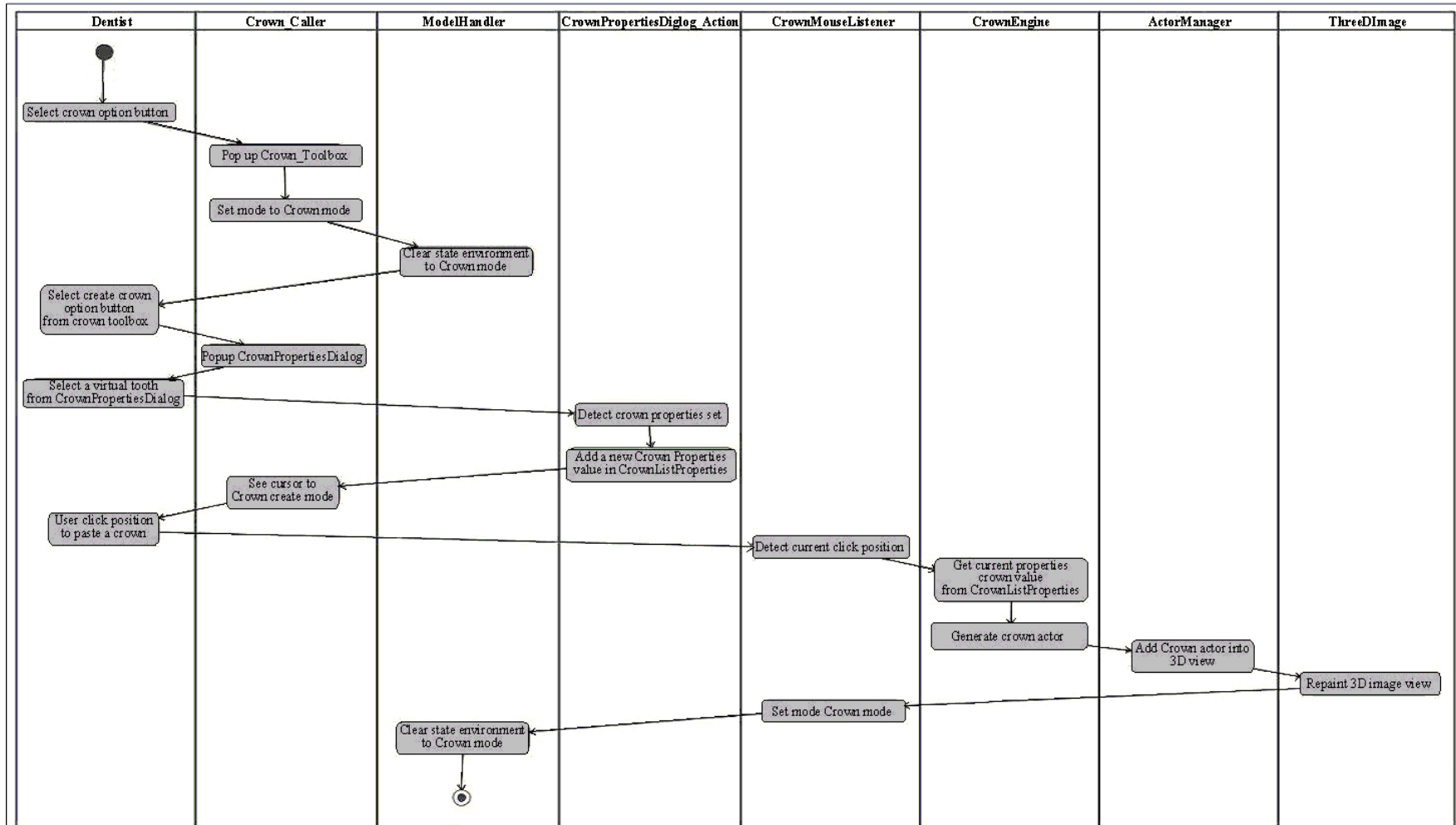
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงระบบทั้งหมดของโปรแกรม

อธิบายการทำงานของแต่ละคลาสในส่วนการใส่ฟันปลอม (Crown Function) จากรูปที่ 3.2 เป็นระบบการทำงานทั้งหมดของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (Dentiplan) ซึ่งเนื้อหาส่วนนี้ได้อธิบายการทำงานในแต่ละคลาสเฉพาะการใส่ฟันปลอม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

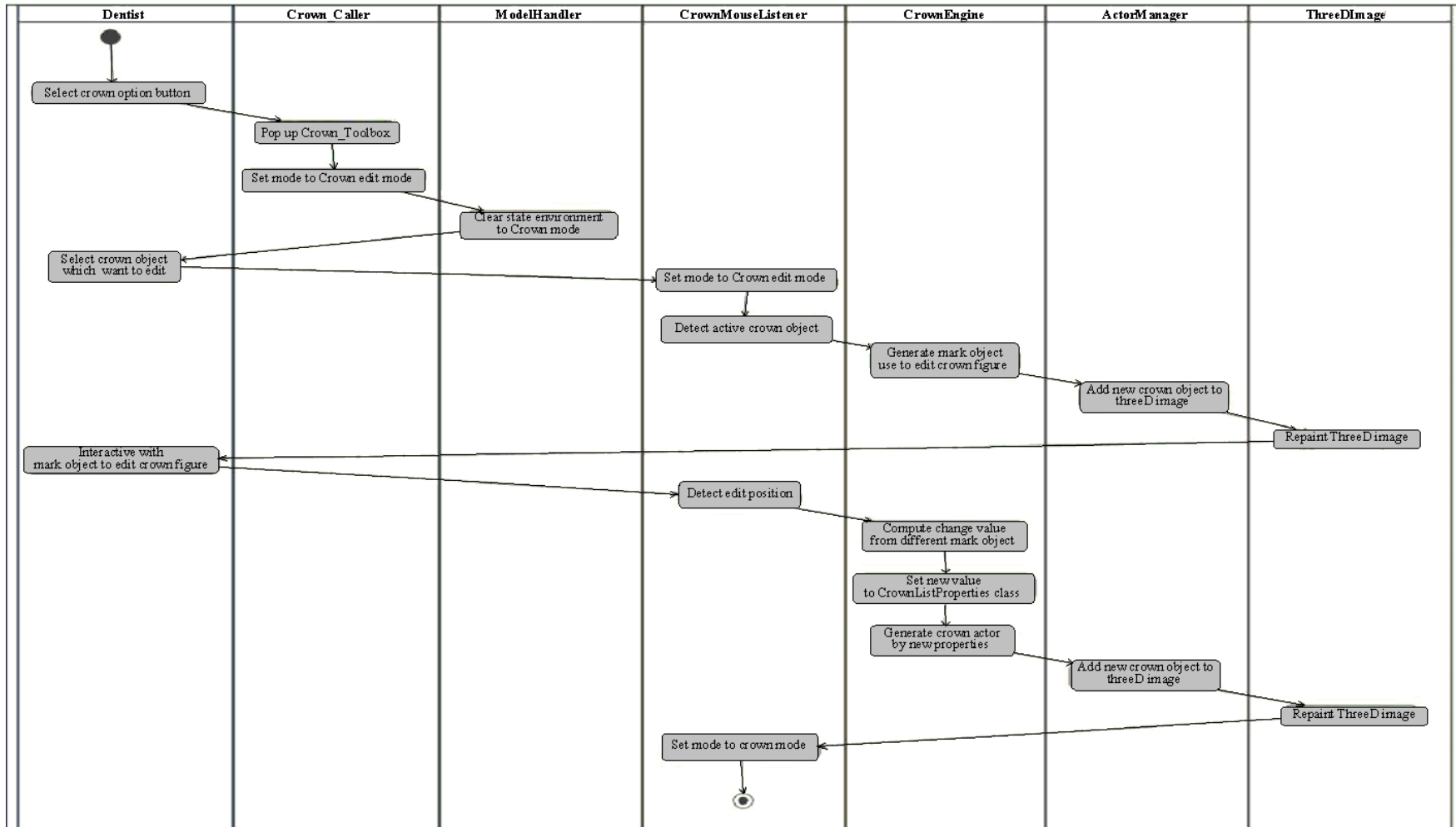
- 1) Crown\_Caller เป็นคลาสที่สร้างปุ่มแบบสลับ (Toggle Button) ไว้ให้ระบบภายนอกเรียกใช้ คลาสนี้ยังเป็นตัวกลางระหว่างระบบจำลองการใส่ฟันปลอมกับระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (Dentiplan)
- 2) Crown\_Action เป็นคลาสไว้จับเหตุการณ์ (Handle Event) ที่เกิดขึ้นในคลาส Crown\_Caller
- 3) Crown\_ToolBox เป็นคลาสที่ไว้สร้างหน้าต่างแบบกล่องเครื่องมือ (Tool Box) โดยจะสร้างปุ่ม 4 ปุ่ม ประกอบด้วย ปุ่มการสร้าง (Create Button) ปุ่มการปรับเปลี่ยนรูปร่างฟัน (Edit Button) ปุ่มลบข้อมูลฟันปลอม (Delete Button) และปุ่มแสดงรายละเอียด (List Button)
- 4) Crown\_ToolboxAction เป็นคลาสไว้จับเหตุการณ์ (Handle Event) ที่เกิดขึ้นในคลาส Crown\_ToolBox โดยมีเหตุการณ์เกิดขึ้น 3 เหตุการณ์ คือ
  - ติดต่อกับคลาส Crown\_PropertiesDialog โดยจะส่งค่าพารามิเตอร์ของโหมดไปด้วยซึ่งแบ่งเป็น 2 โหมด คือ สร้างฟันปลอม (Create) กับปรับเปลี่ยนรูปร่างฟันปลอม (Edit)
  - ติดต่อกับคลาส Crown\_listDialog ไว้สำหรับกรณีแสดงลิสต์ที่เก็บข้อมูลของฟันปลอมที่ถูกสร้างขึ้น
  - เมื่อมีการลบฟันปลอมออกจากระบบ จะทำการลบค่าต่าง ๆ ของฟันปลอมใน Vector และ คอยแก้ไขข้อมูลในลิสต์ทุกครั้งที่มีการลบฟันปลอม
- 5) CrownPropertiesDialog เป็นคลาสที่ไว้สร้างหน้าต่างย่อยไว้สำหรับเลือกฟันปลอมที่จะสร้างกับแก้ไขฟันปลอม
- 6) CrownPropertiesDialog\_Action เป็นคลาสไว้จับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในคลาส CrownPropertiesDialog ซึ่งไว้สำหรับเลือกฟันปลอมที่จะสร้างกับแก้ไขฟันปลอม โดยในการแก้ไขจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การปรับเปลี่ยนรูปร่าง และการแก้ไขสีของฟันปลอมดังนั้นจึงมี 2 เหตุการณ์หลักที่เกิดขึ้น คือ

- การสร้างฟลอปอม สำหรับเหตุการณ์นี้คลาสจะส่งตัวชี้ (Index) ไปยังคลาส Crown\_Model ซึ่งมีหน้าที่สร้างฟลอปอม เมื่อสร้างฟลอปอมเสร็จจะส่งข้อมูลของฟลอปอนั้นไปยังคลาส Crown\_listProperties เพื่อคอยเก็บข้อมูลต่าง ๆ ของฟลอปอมเหล่านั้น
  - การปรับเปลี่ยนฟลอปอม ในโหมดนี้จะทำการเรียกข้อมูลฟลอปตามตัวชี้จากข้อมูลในคลาส Crown\_listProperties เพื่อมาทำการปรับเปลี่ยนรูปร่าง (transform model) โหมดนี้จะรับค่าต่าง ๆ ที่ถูกเปลี่ยนแปลงมาจากคลาส Crown\_Propertie โดยทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงคลาสนี้จะเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงของฟลอปอมแต่ละชี้ไว้เพื่อการปรับเปลี่ยนครั้งต่อไป
- 7) CrownlistDialog เป็นคลาสที่ไว้สร้าง Dialog ในลักษณะตารางเพื่อไว้สำหรับดูข้อมูลของฟลอปอมที่ถูกสร้างขึ้นและคอยปรับปรุงข้อมูล (Update)
  - 8) CrownlistDialog\_Action เป็นคลาสไว้จับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในคลาส CrownlistDialog เมื่อทุกครั้งที่ฟลอปอมมีการปรับเปลี่ยนรูปร่าง จะมีการเรียกข้อมูลทั้งหมดจากคลาส CrownListProperties ส่งไปแสดงผลในคลาส CrownlistDialog อีกทั้งคลาสนี้ยังสามารถระบุตัวชี้ของฟลอปอมที่ถูกเลือกในตารางไปยังโหมดการแก้ไข และการลบฟลอปอมได้
  - 9) CrownListProperties เป็นคลาสที่มีตัวแปรชนิด Vector เป็นตัวแปรหลักในการเก็บข้อมูลของแต่ละฟลอปอมซึ่งจะเก็บข้อมูลทั้งหมด 3 ชนิดข้อมูลคือ ฟลอปอม กล่องครอบฟลอปอม (Box Widget) และ หมายเลขประจำตำแหน่งของแต่ละฟลอปอม โดยแต่ละข้อมูลจะมีหมายเลขชี้ของแต่ละฟลอปอมเป็นเลขตัวเดียวกัน
  - 10) Crown\_MouseListener เป็นคลาสที่รับ panel สำหรับการสร้างภาพ 3 มิติ และ panel axial มาจากคลาส Crown\_Caller เพื่อรอรับเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นกับเมาส์ (Event Mouse Listener) ซึ่งมีเหตุการณ์ที่สำคัญคือ การคลิก มืออยู่ 3 แบบคือ การคลิกเพื่อให้ฟลอปอมตอบสนองโดยใช้การคลิกเมาส์ซ้าย การคลิกเพื่อให้ฟลอปอมตอบสนองโดยใช้การคลิกเมาส์ขวา (โหมดแก้ไข และลบ) และการคลิกที่หน้าต่างโปรแกรมเพื่อกำหนดตำแหน่งของฟลอปอมที่จะแสดง

โดยสามารถอธิบายการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟลอปอมซึ่งแบ่งทั้งหมดเป็น 4 โมดูล ด้วยแผนภาพของแต่ละขั้นตอน (Sequence Diagram)

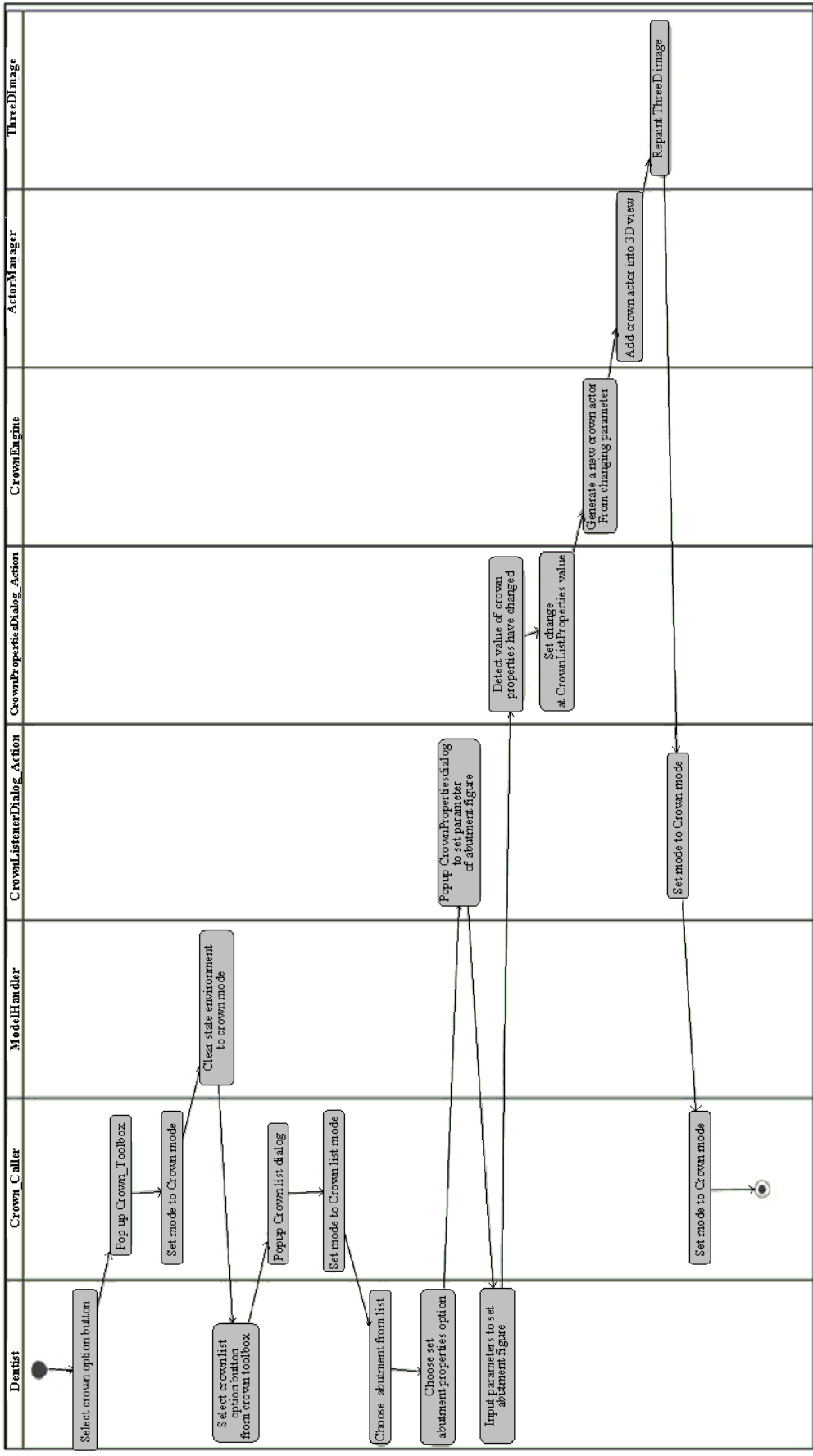


รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการทำงานทีละขั้นของการแสดงฟันปลอมที่ต้องการและกำหนดตำแหน่งที่วางฟันปลอมในระบบ

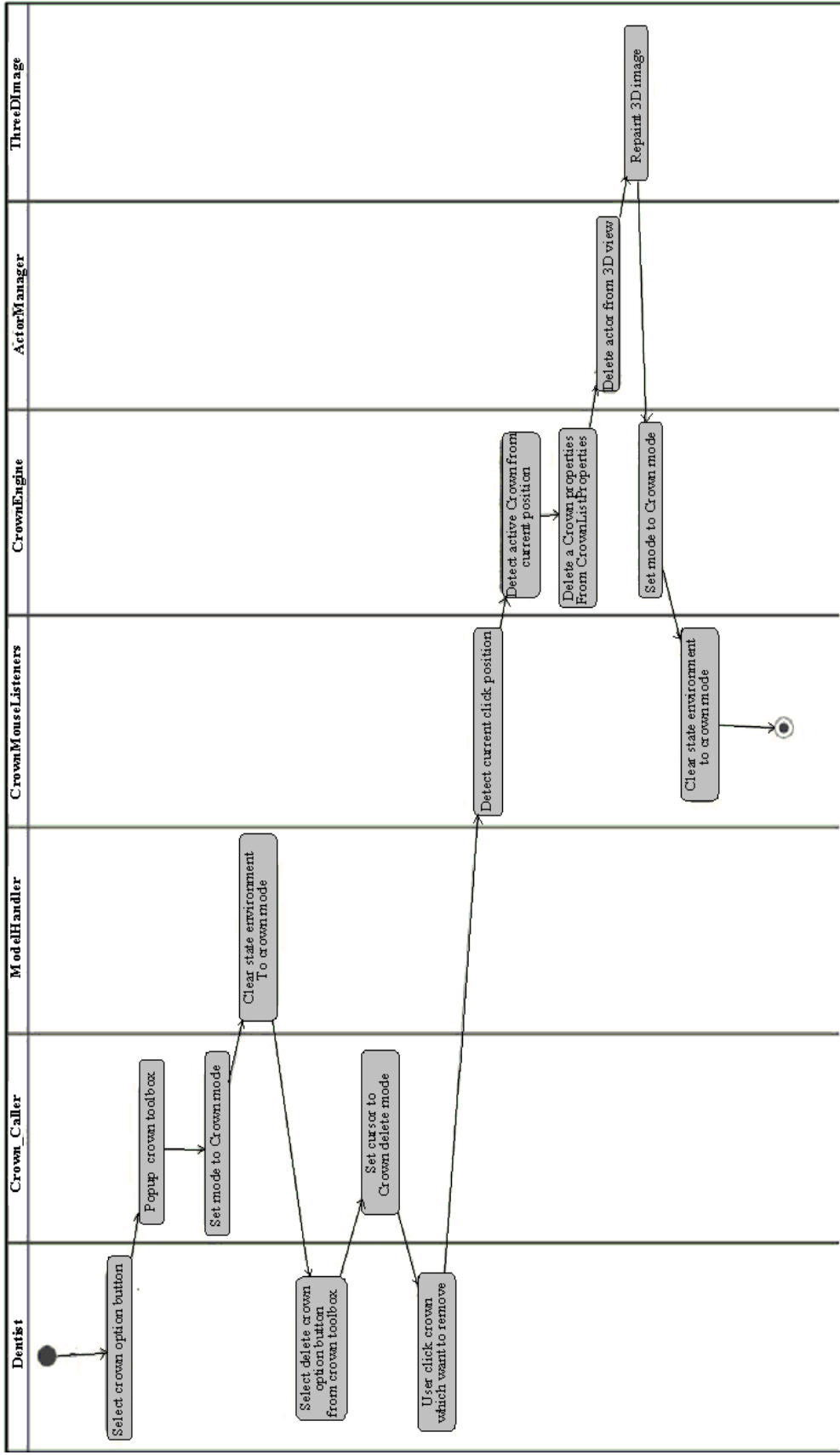


รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการทำงานทีละขั้นของโมดูลการปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยมือ





รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทำงานที่ละขั้นของโมดูลการปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยกล้อง



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการทำงานที่ละขั้นตอนของโมดูลการลบข้อมูลของฟันปลอมเครื่องมือ

เทคนิคการเขียนโปรแกรมสำหรับการปรับเปลี่ยนรูปร่างพื้นป्लอม เนื่องจากพื้นผิวของพื้นป्लอมในสามมิติไม่ได้มีจุดศูนย์กลางมวลอยู่ที่จุดกำเนิดบนพิกัดเชิงฉาก ดังนั้นต้องใช้เทคนิคในการปรับเปลี่ยนรูปร่างของพื้นผิวในสามมิติช่วย ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อมีการแก้ไขหรือปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นป्लอมด้วยกล่องเครื่องมือ ซึ่งการปรับขนาดของพื้นป्लอมแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การปรับด้วยการหมุน (Rotation) การปรับด้วยการเลื่อน (Translation) และการปรับด้วยขนาด (Scaling) การทำงานของการปรับเปลี่ยนรูปร่างด้วยกล่องเครื่องมือจึงเป็นไปดังต่อไปนี้

### 1) การปรับด้วยการหมุน (Rotation Transform)

เทคนิคที่ใช้จะเลื่อนพื้นป्लอมไปยังตำแหน่ง (0, 0, 0) แล้วทำการหมุนตามแกนต่าง ๆ เสร็จแล้วเลื่อนพื้นป्लอมกลับมายังตำแหน่งปัจจุบัน ซึ่งสามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงของพื้นป्लอมในรูปเมตริกซ์ (Matrix Transform) ดังนี้

$$T(-x, -y, -z) \cdot R(R_x, R_y, R_z) \cdot T(x, y, z) \quad (3.1)$$

### 2) การปรับด้วยการเลื่อน (Translation transform)

เทคนิคที่ใช้จะเลื่อนพื้นป्लอมไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยจะบวกค่าเพิ่มจากตำแหน่งปัจจุบันตามค่าที่ต้องการเลื่อนตามแกนต่าง ๆ ซึ่งสามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงของพื้นป्लอมในรูปเมตริกซ์ (Matrix Transform) ดังนี้

$$T(x + T_x, y + T_y, z + T_z) \quad (3.2)$$

### 3) การปรับด้วยขนาด (Scaling)

เทคนิคที่ใช้จะเลื่อนพื้นป्लอมไปยังตำแหน่ง (0, 0, 0) แล้วทำการปรับขนาดตามแกนต่าง ๆ เสร็จแล้วเลื่อนพื้นป्लอมกลับมายังตำแหน่งปัจจุบัน ซึ่งสามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงของพื้นป्लอมในรูปเมตริกซ์ (Matrix Transform) ดังนี้

$$T(-x, -y, -z) \cdot S(S_x, S_y, S_z) \cdot T(x, y, z) \quad (3.3)$$

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการสร้างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่พื้นป्लอม จะสามารถอธิบายขั้นตอนและปัญหาในการใช้งานของระบบการใส่พื้นป्लอมแบบเดิมได้ ซึ่งจะนำไปสู่ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอันเป็นจุดประสงค์ที่สำคัญสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ โดยขั้นตอนวิธีสำหรับการ

แก้ปัญหาก็ใช้ขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันของพื้นผิวด้วยการหาจุดที่ใกล้กันที่สุด ขั้นตอนดังกล่าวได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

### 3.4 การสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT

เนื่องจากข้อมูลที่น่ามาใช้งานวิจัยเป็นภาพสแกนฟันปลอมจากเครื่องสแกน CT ดังรูปที่ 3.7 จากรูปดังกล่าวพบว่ามีส่วนประกอบของภาพบางส่วนที่นอกเหนือจากฟันปลอม ดังนั้นจึงต้องทำการแยกองค์ประกอบของภาพเพื่อให้เหลือเพียงส่วนที่เป็นฟันปลอมเท่านั้น เพื่อนำไปสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอม ซึ่งวิธีที่นำมาทดสอบและเปรียบเทียบมีทั้งหมด 3 วิธี

- 1) การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ (Image Segmentation with Gaussian Mixture Model)
- 2) การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แก่แต่ละจุดภาพ (Image Segmentation with Relaxation Labeling)
- 3) การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่ (Image Segmentation with Region Growing)



รูปที่ 3.7 ภาพฟันปลอมจากเครื่องสแกน CT

ขั้นตอนการสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากการสแกน CT

- 1) เปรียบเทียบวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพจากทั้ง 3 วิธี
- 2) เมื่อแยกองค์ประกอบภาพแล้วสร้างภาพสามมิติด้วยการต่อกันของลูกบาศก์

ในการทดลองขั้นตอนการแยกองค์ประกอบภาพนั้นจะนำภาพสแกนของฟันปลอม (รูปที่ 3.7) มาทดลองเฉพาะบางแผ่นภาพเท่านั้น สำหรับการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้แผ่นภาพที่ 23 ในการทดลอง เนื่องจากเป็นภาพที่มีองค์ประกอบครบทั้งหมดประกอบด้วย ดินน้ำมัน ฟันปลอม และพื้นหลัง จึงเหมาะสมกับการทดลองในขั้นตอนนี้ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 วิธี คือ การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ และการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่ โดยขั้นตอนวิธีทั้งหมดอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์

สำหรับเทคนิคการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ส่วนขั้นตอนการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

- 1) สร้างกราฟของภาพสแกนฟันปลอมโดยกราฟจะแสดงความถี่ของความเข้มสำหรับแต่ละจุดภาพ (Histograms)
- 2) ประมาณกราฟที่แสดงความถี่ของความเข้มสำหรับแต่ละจุดภาพด้วยฟังก์ชันของเกาส์ตามสมการที่ (2.1) ซึ่งขั้นตอนการประมาณแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ประมาณการ (E Step) และปรับปรุงค่าความน่าจะเป็น (M Step)

จากรหัสเทียมขั้นตอนทั้งหมดของการประมาณด้วยฟังก์ชันความน่าจะเป็นของเกาส์เริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับค่าของ  $p_k, m_k$  และ  $\sigma_k$  หลังจากนั้นเริ่มทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็น  $P^{(i)}(k | n)$  โดยอ้างอิงขั้นตอนการคำนวณจากสมการที่ (2.2) ในขั้นตอนนี้มีการเรียกใช้ฟังก์ชันของเกาส์ในสมการที่ (2.1) ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวจะขึ้นกับค่าเฉลี่ยของความเข้มทุก ๆ จุดภาพในแต่ละองค์ประกอบ ( $m_k$ ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดภาพในแต่ละองค์ประกอบ ( $\sigma_k$ ) และความเข้มในแต่ละจุดภาพ ( $x_n$ ) ในขั้นตอนถัดมาเป็นการปรับปรุงค่า  $p_k, m_k$  และ  $\sigma_k$  สำหรับรอบถัดไป ขั้นตอนสุดท้ายเป็นเงื่อนไขสำหรับหยุดการทำซ้ำ (loop) ด้วยการหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นระหว่างรอบปัจจุบันกับรอบที่ผ่านมา ซึ่งจะหยุดการทำซ้ำก็ต่อเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งนั่นก็หมายความว่าความน่าจะเป็นของทั้งสองรอบจะมีค่าใกล้เคียงกัน ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์คือ จะได้กราฟแสดงความถี่ของความเข้มสำหรับแต่ละจุดภาพที่มีความราบเรียบขึ้นจนสามารถประมาณช่วงของความเข้มในแต่ละองค์ประกอบได้ และสุดท้ายภาพสแกนฟันปลอม

ที่ได้จากการประมาณช่วงค่าความเข้มดังกล่าวจะสามารถแยกองค์ประกอบของรูปภาพได้จนเหลือแต่องค์ประกอบของภาพที่มีเพียงแต่พื้นปโลม

รหัสเทียมของการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณด้วยฟังก์ชันความน่าจะเป็นเกาส์

$m_k^{(0)} \leftarrow$  ค่าเริ่มต้นของค่าเฉลี่ยของทุก ๆ จุดภาพในองค์ประกอบของ  $k$

$\sigma_k^{(0)} \leftarrow$  ค่าเริ่มต้นของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดภาพในองค์ประกอบของ  $k$

$p_k^{(0)} \leftarrow$  ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักในองค์ประกอบของ  $k$

$temp \leftarrow 0$

**loop**

$Sp \leftarrow 0$

**for**  $j \leftarrow 1 \dots k$

$Sp \leftarrow Sp + p_k^{(j)} \cdot FuncGauss(x_n, m_k^{(j)}, \sigma_k^{(j)})$

**End for**

$P^{(i)}(k | n) \leftarrow p_k^{(i)} \cdot FuncGauss(x_n, m_k^{(i)}, \sigma_k^{(i)}) / Sp$

$m_k^{(i+1)} \leftarrow$  ปรับปรุงค่า (Update)

$\sigma_k^{(i+1)} \leftarrow$  ปรับปรุงค่า (Update)

$p_k^{(i+1)} \leftarrow$  ปรับปรุงค่า (Update)

$error \leftarrow \left| \frac{P^{(i)}(k | n) - temp}{P^{(i)}(k | n)} \right| \cdot 100\%$

$temp \leftarrow P^{(i)}(k | n)$

**End loop** เมื่อ  $error <$  ค่าที่ยอมรับได้

$FuncGauss(x, m_k^{(i)}, \sigma_m^{(i)}) \leftarrow$  สมการที่ (2.1)

### 3.4.2 การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แก่จุดภาพ

เทคนิคนี้เป็นการเพิ่มความน่าจะเป็นของแต่ละจุดภาพนั้นจะเป็นกระบวนการทำหลังจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ สำหรับการเพิ่มความน่าจะเป็นทำได้โดยการอ้างอิงองค์ประกอบรอบข้างของจุดภาพที่พิจารณาดังรูปที่ 3.8 ซึ่งขั้นตอนวิธีทั้งหมดอธิบายได้ด้วยรหัสเทียม ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 ภาพตัวอย่างการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แก่แต่ละจุดภาพ

รหัสเทียมของการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แก่แต่ละจุดภาพ

$x_n \leftarrow$  จุดภาพที่พิจารณา

$k_l \leftarrow$  องค์ประกอบของจุดภาพ  $x_n$

**for**  $n \leftarrow 1 \dots N$

**for**  $m \leftarrow 1 \dots 8$  //จุดภาพรอบจุด  $x_n$  จำนวน 8 จุด

$q_m^{(i)}(x_n | k_l) \leftarrow 0$

**for**  $j \leftarrow 1 \dots K$  //  $K$  คือจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด

**if**  $k_j = k_l$  **then**  $r \leftarrow 1$

**else**  $r \leftarrow 0$

$q_m^{(i)}(x_n | k_l) \leftarrow q_m^{(i)}(x_n | k_l) + r \cdot P^{(i)}(X_m | k_j)$

**End loop for**  $j$

**End loop for**  $m$

**End loop for**  $n$

**for**  $n \leftarrow 1 \dots N$

**for**  $m \leftarrow 1 \dots 8$  //จุดภาพรอบจุด  $x_n$  จำนวน 8

$Q^{(i)}(x_n | k_l) \leftarrow 0$

$SumPQ \leftarrow 0$

**for**  $j \leftarrow 1 \dots K$

$Q^{(i)}(x_n | k_l) \leftarrow Q^{(i)}(x_n | k_l) + q_m^{(i)}(x_n | k_l)$

$SumPQ \leftarrow Q^{(i)}(x_n | k_l) \cdot P^{(i)}(x_n | k_l)$

**End loop for**  $j$

**End loop for**  $m$

$$\text{update } P^{(i+1)}(x_n | k_l) \leftarrow \frac{Q^{(i)}(x_n | k_l) \cdot P^{(i)}(x_n | k_l)}{\text{Sum}PQ}$$

**End loop for  $n$**

อธิบายขั้นตอนของรหัสเทียมได้ดังนี้ จากการแยกองค์ประกอบด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ ทุก ๆ จุดภาพจะมีค่าความน่าจะเป็นในแต่ละองค์ประกอบ ดังนั้นการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพจะเริ่มต้นจากการคำนวณ  $q_m^{(i)}(x_n | k_l)$  ซึ่งเป็นผลรวมของค่าความน่าจะเป็นจากรอบข้าง ( $X_m$ ) ของจุดภาพที่พิจารณา ( $x_n$ ) ในองค์ประกอบเดียวกัน แล้วคำนวณหา  $Q^{(i)}(x_n | k_l)$  ซึ่งหาได้จากผลรวมของ  $q_m^{(i)}(x_n | k_l)$  ในทุก ๆ จุดรอบข้างของจุดภาพที่พิจารณาค่า  $Q^{(i)}(x_n | k_l)$  ที่ได้จะเป็นค่าน้ำหนักของความน่าจะเป็นของจุดภาพในแต่ละองค์ประกอบโดยอ้างอิงกับจุดรอบข้าง ทำยสุดจึงทำการปรับปรุง (Update) ค่าความน่าจะเป็นโดยมีการคูณค่าน้ำหนัก  $Q^{(i)}(x_n | k_l)$  กับค่าความน่าจะเป็นเดิม หลังจากนั้นทำการ Normalize เพื่อให้ความน่าจะเป็นที่ได้มีค่าไม่เกิน 1 สำหรับการทดลองครั้งนี้ใช้จำนวนรอบเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองเป็น 1,5,15 และ 20 ตามลำดับโดยจะเลือกจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างภาพสามมิติต่อไป

### 3.4.3 การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่

การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่สามารถอธิบายได้ด้วยรหัสเทียมดังต่อไปนี้

**ฟังก์ชัน  $Seed(x_n)$**

**loop**

$x_n \leftarrow$  จุดภาพที่จะขยาย

**for  $i \leftarrow 1 \dots 8$**

**if  $|I(x_{n+i}) - \text{Mean}I(x_n)| < \sigma$**

$I(x_{n+1}) \leftarrow I(x_{n+1})$

$Seed(x_{n+i})$

**else**

$I(x_{n+1}) \leftarrow I(x_{n+i}) + 150$

**End if**

**End loop for**

**End loop**

สำหรับการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่นั้นเริ่มจากการกำหนดจุดภาพที่ต้องการขยาย (หัวข้อ 2 ของรหัสเทียม) แล้วตรวจสอบจากค่าความเข้มของจุดที่จะขยายกับค่า



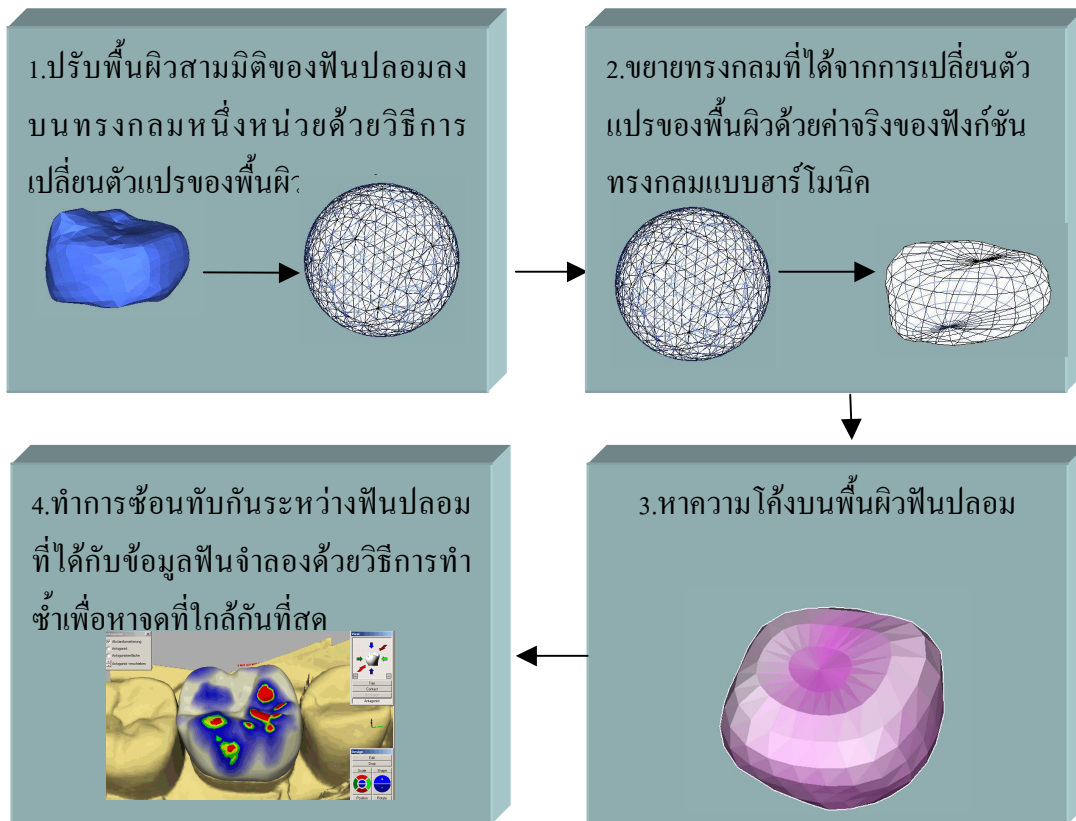
ความเข้มเฉลี่ยของจุดข้างเคียงที่ต้องการว่ามีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มเฉลี่ยหรือไม่ ถ้าใช่ให้ค่าของความเข้มมีค่าเท่าเดิม และจะขยายต่อไปโดยการกลับไปทำซ้ำกระบวนการเดิม แต่ถ้าไม่ใช่จะเพิ่มค่าความเข้มไปอีก 150 ซึ่งหมายความว่าเมื่อความเข้มเพิ่มขึ้นจะทำให้สีของจุดภาพจางลง

หลังจากการแยกองค์ประกอบภาพกับทั้ง 3 วิธี แล้วจะเปรียบเทียบผลด้วยการสร้างภาพสามมิติด้วยวิธีการต่อกันของกล่องลูกบาศก์ (Marching Cubes) ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากขั้นตอนนี้คือ ได้วิธีในการแยกองค์ประกอบภาพที่เหมาะสมที่สุดกับงานวิจัยนี้ และสามารถอธิบายเหตุผลของผลลัพธ์ในการแยกองค์ประกอบภาพในวิธีต่าง ๆ ได้ ท้ายสุดการแยกองค์ประกอบภาพที่ดีจะสามารถช่วยในการสร้างภาพสามมิติที่ดีได้

### 3.5 ขั้นตอนการใส่พื้นปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยใช้การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและการเปรียบเทียบความโค้ง (Surface Registration with Real Valued Spherical Harmonic Expansion and Curvature Matching)

สำหรับขั้นตอนการใส่พื้นปลอมในระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่พื้นปลอมยังใช้การปรับเปลี่ยนรูปร่างของพื้นปลอมด้วยมือ (Manual Editing) ซึ่งนำไปสู่ความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนรูปร่างอีกทั้งยังทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอขั้นตอนการใส่พื้นปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยใช้การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและการเปรียบเทียบความโค้งซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ปรับพื้นผิวสามมิติของพื้นปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบสแกน
- 2) ขยายทรงกลมที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก
- 3) หาความโค้งบนพื้นผิวพื้นปลอม
- 4) ทำการซ้อนทับกันระหว่างพื้นปลอมที่ได้กับข้อมูลพื้นจำลองด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด



รูปที่ 3.9 แผนผังขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว

จากรูป 3.9 เป็นขั้นตอนการนำเสนอขั้นตอนวิธีการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการปรับจุดของฟันปลอมและซ้อนทับกับฟันที่อยู่ข้างเคียงด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด (Iterative Closest Point) เพื่อให้ขั้นตอนดังกล่าวมีความรวดเร็ว แต่ยังคงความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ จึงมีการปรับเปลี่ยนพื้นผิวฟันปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบสวงวน (Surface Parameterization with Conformal Mapping) หลังจากนั้นจึงขยายทรงกลมที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Real-Valued with Spherical Harmonic Expansion) ผลลัพธ์ที่ได้ควรเป็นพื้นผิวฟันปลอมที่คงลักษณะเดิมไว้ สำหรับขั้นตอนถัดมาคือการคำนวณหาความโค้งของพื้นผิวฟันปลอมเพื่อหาความโค้งที่สัมพันธ์กับพื้นผิวฟันข้างเคียงของโครงสร้างฟันผู้ป่วย สุดท้ายเป็นขั้นตอนในการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวฟันปลอมกับพื้นผิวฟันข้างเคียงของโครงสร้างฟันผู้ป่วย ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดอธิบายได้ดังนี้

### 3.5.1 การปรับพื้นผิวสามมิติของพื้นปโลมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบสวงวน

การปรับพื้นผิวสามมิติของพื้นปโลมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบสวงวน เป็นขั้นตอนแรกในการปรับพื้นผิวพื้นปโลมให้ราบเรียบขึ้นและจุดน้อยลงแต่ยังคงรูปพื้นปโลมเดิมไว้ สำหรับขั้นตอนดังกล่าวได้ใช้เทคนิคการสร้างตัวแปรของพื้นผิวบนทรงกลมหนึ่งหน่วย (Surface Parameterization on unit sphere) ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4 โดยสรุปขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้

- 1) คำนวณหาพลังงานสปริงสะสมเริ่มต้น  $E_0$  จากสมการ 2.12
- 2) คำนวณหาเวกเตอร์อนุพันธ์  $D\bar{t}$  ของแต่ละจุดบนพื้นผิวโดยใช้ค่า  $k_{u,v}$  ค่าคงที่แบบสวงวนมุม (สมการที่ 2.26)
- 3) ปรับปรุงจุด  $\bar{t}(v)$  โดย  $\delta\bar{t}(v) = -D\bar{t} \times 0.001$ .
- 4) คำนวณหาพลังงานสปริงสะสม  $E$  อีกครั้ง
- 5) ตรวจสอบค่า  $E$  กับ  $E_0$  ว่าใกล้เคียงกันหรือยัง ถ้ายังไม่ใกล้เคียงให้กลับไปทำในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้งจนกว่าค่าทั้ง 2 จะใกล้เคียงกันจนยอมรับได้

### 3.5.2 การขยายทรงกลมด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก

จากขั้นตอนการปรับพื้นผิวสามมิติของพื้นปโลมบนทรงกลมหนึ่งหน่วย แล้วจะขยายทรงกลมดังกล่าวด้วยฟังก์ชันฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกดังสมการที่ 3.4

ฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Real-Valued Spherical Harmonic Function)

$$Y_l^m(\phi, \theta) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}} P_l^{|m|}(\theta) \Phi_m(\phi) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$\Phi_m(\phi) = \begin{cases} \sqrt{2} \cos m\phi, & m > 0 \\ 1, & m = 0 \\ \sqrt{2} \sin |m|\phi, & m < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

โดยที่ฟังก์ชันโพลีโนเมียล  $P$  จำแนกได้ดังนี้

$$P_0^0(\cos \theta) = 1 \quad (3.6)$$

$$P_m^m(\cos \theta) = (2m - 1) \sin \theta P_{m-1}^{m-1}(\cos \theta) \quad (3.7)$$

$$P_{m+1}^m(\cos \theta) = (2m + 1) \cos \theta P_m^m(\cos \theta) \quad (3.8)$$

$$P_l^m(\cos \theta) = \frac{(2l - 1) \cos \theta P_{l-1}^m(\cos \theta) - (l + m - 1) P_{l-2}^m(\cos \theta)}{l - m} \quad (3.9)$$

เมื่อขยายพื้นผิวพื้นปโลมในแต่ละระดับของอนุกรมฟูรีเยร์ (Order of Fourier series) ขึ้นตอนการทดลองจะแสดงพื้นผิวสามมิติที่ได้จากการขยายพื้นผิวพื้นปโลมในแต่ละระดับของอนุกรมฟูรีเยร์

### 3.5.3 การหาค่าความโค้งบนพื้นผิวพื้นปโลม

สำหรับการทดลองโดยการหาค่าความโค้งบนพื้นผิวพื้นปโลมแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือความโค้งของเกาส์ (Gaussian Curvature) ความโค้งเฉลี่ย (Mean Curvature) และความโค้งรวม (Total Curvature) ซึ่งรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

สูตรความโค้งของเกาส์

$$K = \frac{\Delta \theta}{A_n} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$\Delta \theta = 2\pi - \sum_i \theta_i \quad (3.11)$$

โดยที่  $\theta_i$  คือ มุมรอบจุด  $x_i$

$A_n$  คือ พื้นผิวที่รวมของตาข่ายสามเหลี่ยม (Mesh) ทั้งหมดรอบจุด  $x_i$

สูตรความโค้งเฉลี่ย

$$H_n = \left( \frac{1}{4A_n} \right) \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_j + \cot \beta_j) \overline{(x_j - x_i)} \quad (3.12)$$

โดยที่  $x_j$  คือ จุดรอบข้างจุด  $x_i$

$N(i)$  คือ จำนวนของตาข่ายสามเหลี่ยม (Mesh) ที่อยู่รอบจุด  $x_i$

$A_n$  คือ พื้นที่รวมของตาข่ายสามเหลี่ยม (Mesh) ทั้งหมดรอบจุด  $x_i$

ค่าความโค้งเฉลี่ยหาได้จาก

$$H = \langle H_n, \bar{n} \rangle \quad (3.13)$$

โดยที่  $\langle, \rangle$  คือ การคูณแบบจุด (Dot product)

การหาความโค้งที่สอดคล้องกันที่จุดเว้าลึก (Umbilic Point)

$$C = H^2 - K \quad (3.14)$$

โดยที่  $K$  คือ ความโค้งของเกาส์

$H$  คือ ความโค้งเฉลี่ย

### 3.5.4 การซ้อนทับกันระหว่างพื้นปโลมที่ได้กับข้อมูลพื้นจำลองด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด

การทดลองการซ้อนทับกันระหว่างพื้นปโลมที่ได้กับข้อมูลพื้นจำลองด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด สำหรับการทดลองครั้งนี้ได้เลือกวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุดแบบดั้งเดิม (หัวข้อที่ 2.5.1) ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) เปรียบเทียบขั้นตอนการซ้อนทับกันระหว่างพื้นปโลมเดิมกับพื้นปโลมที่ได้จากการขยายพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิคด้วยวิธีการทำ

ซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด เพื่อหาระดับ (Order) ที่เหมาะสมที่สุดกับขั้นตอนวิธีนี้

- 2) ทดสอบการซ้อนทับกันระหว่างฟีนปลอมที่ได้จากการขยายพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกกับข้อมูลพินข้างเคียงของโครงสร้างพินผู้ป่วย ด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด โดยอ้างอิงจากความโค้งที่สอดคล้องกันกับการกำหนดช่วงของจุดบนพื้นผิวฟีนปลอมที่ได้จากการขยายทรงกลมด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก

### 3.6 สรุปวิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น มีจุดประสงค์เพื่ออธิบายปัญหาและที่มาถึงการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างระบบคอมพิวเตอร์จำลองการใส่ฟีนปลอมกับเทคนิคที่จะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการใช้ระบบดังกล่าวคือการใส่ฟีนปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยใช้การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและความโค้งที่สัมพันธ์กัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะกล่าวถึงในบทถัดไป

## บทที่ 4

### การทดสอบและผลการทดสอบ

#### 4.1 กล่าวนำ

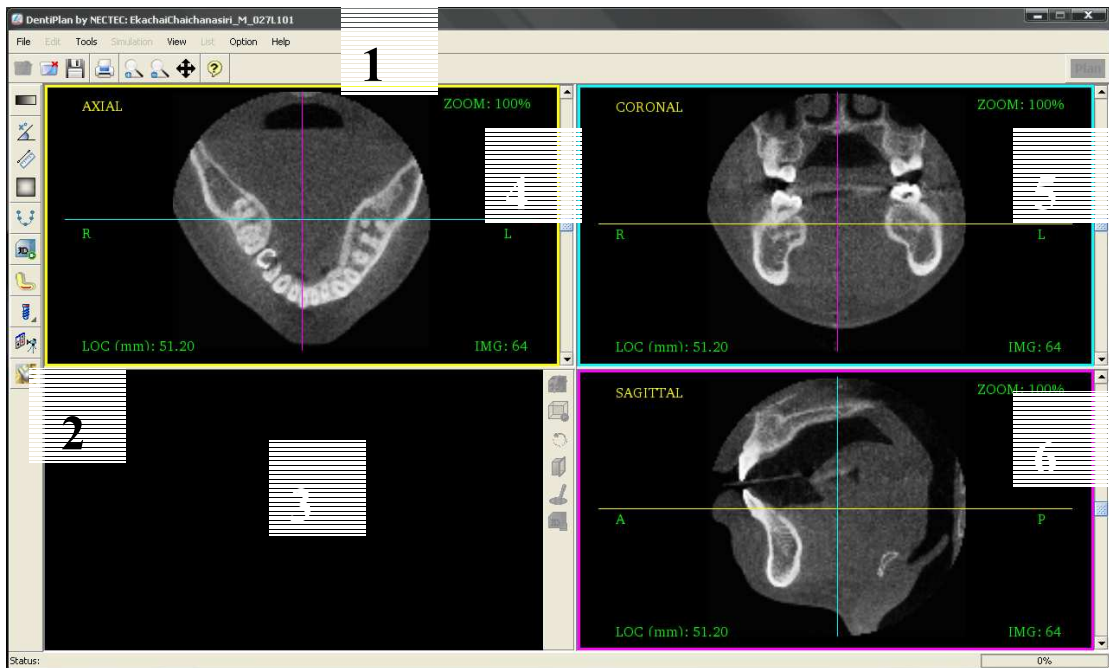
ในบทนี้จะอธิบายการทดสอบและผลการทดสอบของงานวิจัยทั้งหมดโดยแบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ส่วนคือ ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม การสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอม จากภาพสแกน CT และขั้นตอนการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยใช้การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและความโค้งที่สัมพันธ์กัน

#### 4.2 ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม

เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมเป็นส่วนหนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan) ผู้วิจัยจึงนำเสนอการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมและระบบที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่ได้อธิบายการทำงานทั้งหมดของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan)

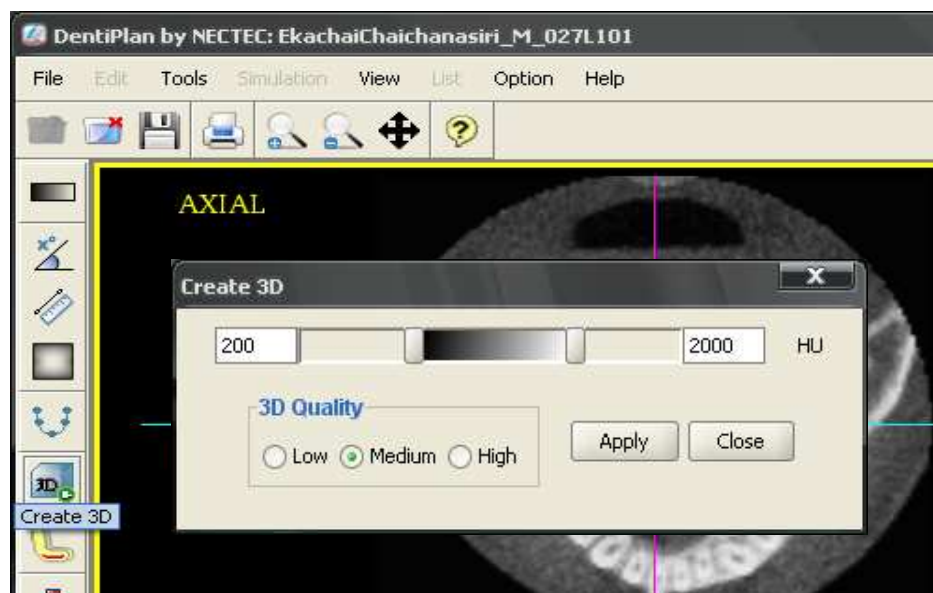
##### 4.2.1 ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan)

ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan) มีหน้าต่างหลักโดยประกอบด้วย (จากรูปที่ 4.1) ส่วนที่ 1 เมนูต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการวางแผนการผ่าตัดในงานทันตกรรมรากฟันเทียม เช่น การเปิดไฟล์ข้อมูลภาพสแกนฟันของผู้ป่วย การบันทึกข้อมูลของผู้ป่วยเมื่อวางแผนเสร็จ และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการวางแผน เป็นต้น ส่วนที่ 2 คือ กล่องเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการวางแผนการผ่าตัดในงานทันตกรรมรากฟันเทียม เช่น เครื่องมือการสร้างภาพสามมิติ เครื่องมือการใส่รากฟัน เครื่องวัดระยะทาง และเครื่องมือการใส่ฟันปลอม เป็นต้น ส่วนที่ 3 เป็นส่วนสำหรับการแสดงภาพสามมิติ ส่วนที่ 4, 5 และ 6 คือส่วนที่แสดงภาพสแกนคนไข้ในสองมิติ ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ด้านบน (Axial) ด้านหน้า (Coronal) และด้านข้าง (Sagittal) ซึ่งทั้งหมดสามารถอธิบายด้วยรูปที่ 4.1 - 4.2



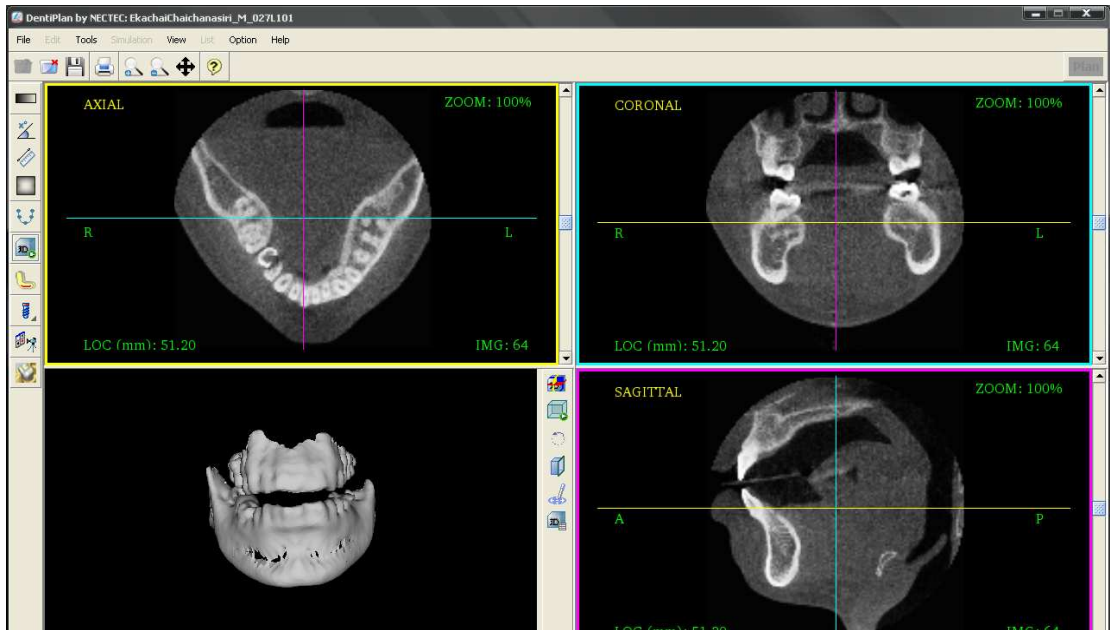
รูปที่ 4.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม

การสร้างภาพสามมิติจากภาพสแกนของคนไข้



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงการสร้างภาพสามมิติจากภาพสแกนของคนไข้  
โดยสามารถกำหนดช่วงของความเข้มที่จะแสดงได้

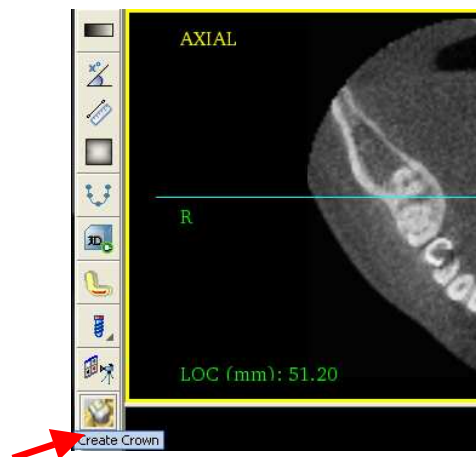




รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการแสดงผลภาพสามมิติ

#### 4.2.2 ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม

สำหรับระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมจะสามารถเริ่มใช้งานได้ก็ต่อเมื่อสร้างภาพสามมิติของคนไข้เรียบร้อยแล้ว โดยระบบจะเริ่มทำงานเมื่อกดปุ่มในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงปุ่มที่ใช้สำหรับเริ่มการทำงานของระบบ

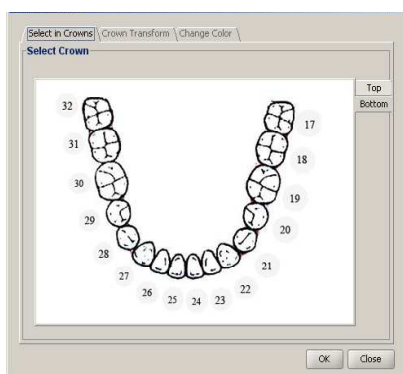
คอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม

ผู้จัดทำวิจัยจะขอเสนอการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมตามโครงสร้างระบบในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมด 4 โมดูล (Modules) ดังนี้

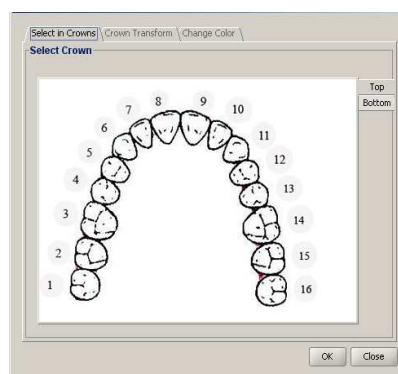
1. โมดูลการแสดงผลฟันปลอมที่ต้องการและกำหนดตำแหน่งที่วางฟันปลอมในระบบ

ขั้นตอนการแสดงผลฟันปลอมที่ต้องการและกำหนดตำแหน่งที่วางฟันปลอม

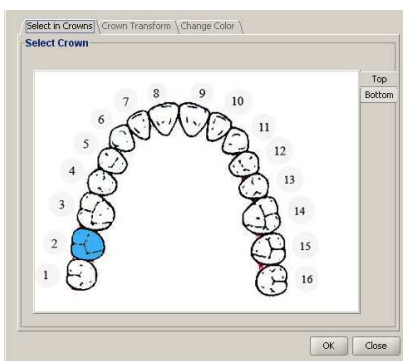
- เลือกฟันปลอมที่ต้องการตามตำแหน่งฟันที่สูญเสียไปของคนไข้
- เลือกตำแหน่งที่ต้องการให้ฟันปลอมไปแสดงยังส่วนของการแสดงผลสามมิติ
- แสดงภาพสามมิติของฟันปลอมได้ตามตำแหน่งที่กำหนด ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดอธิบายด้วยภาพดังนี้ เริ่ม โปรแกรม โดยการเลือกที่การสร้าง (Create) แล้วจะปรากฏหน้าต่างของการเลือกฟันปลอมซึ่งสามารถเลือกได้ทั้งฟันบนฟันล่าง ดังรูปที่ 4.5 (ก) และ 4.5 (ข) เมื่อเลือกฟันปลอมโดยกดไปยังรูปฟันที่ต้องการแล้วฟันชิ้นนั้นจะเปลี่ยนสีดังรูปที่ 4.5 (ค)



(ก)



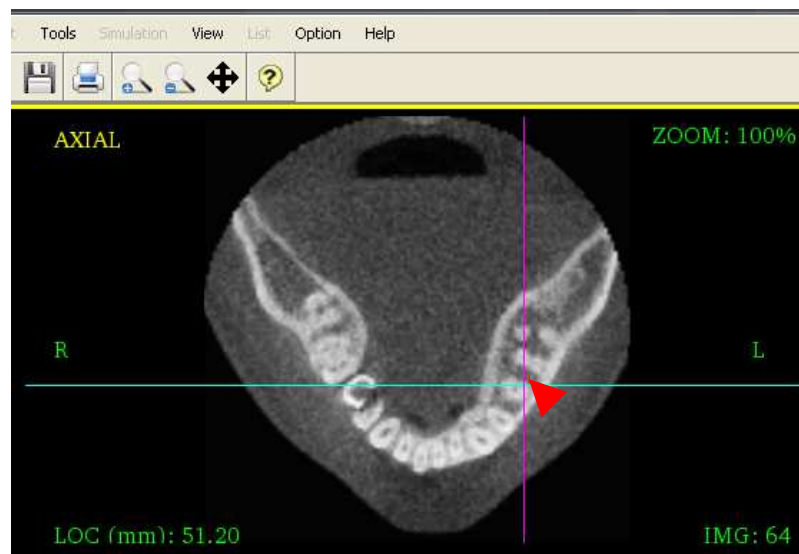
(ข)



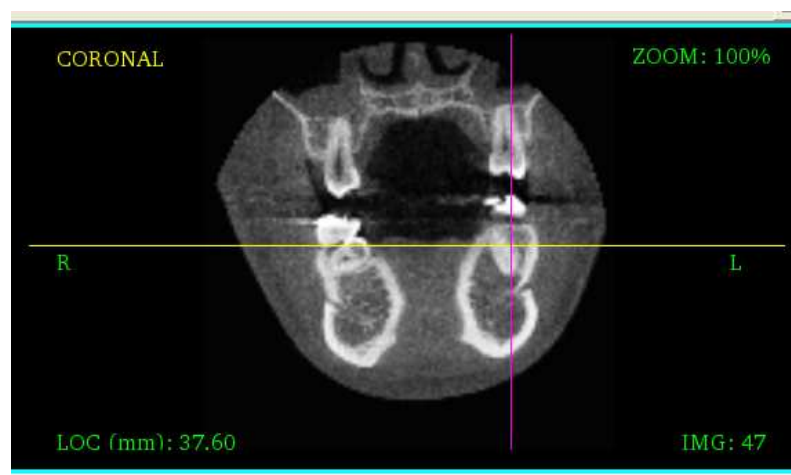
(ค)

รูปที่ 4.5 ภาพหน้าต่างการเลือกฟันปลอม

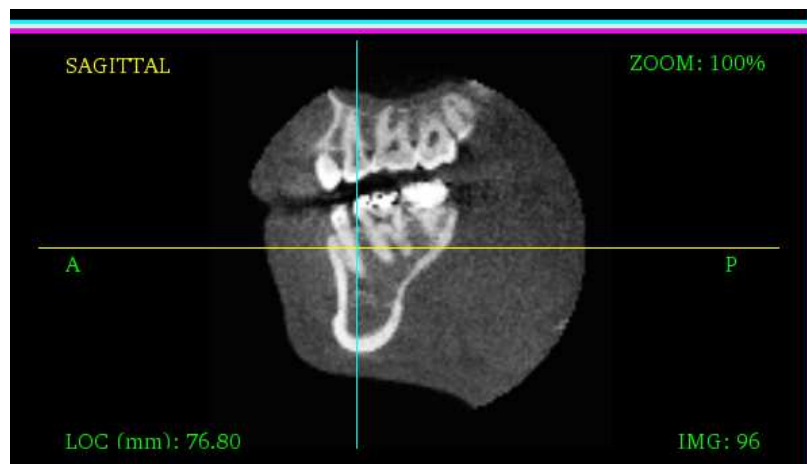
เมื่อเลือกฟันได้แล้วกดปุ่ม OK แล้วนำมาสไล้ไปคลิกบนหน้าต่างการแสดงผลภาพ 2 มิติด้านบน (Axial, รูปที่ 4.6) เพื่อเลือกตำแหน่งที่ฟันจะแสดง โดยสามารถอ้างอิงตำแหน่งความสูงและความลึกจากหน้าต่างการแสดงผลภาพ 2 มิติ ด้านหน้า (Coronal) และ ด้านข้าง (Sagittal) ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



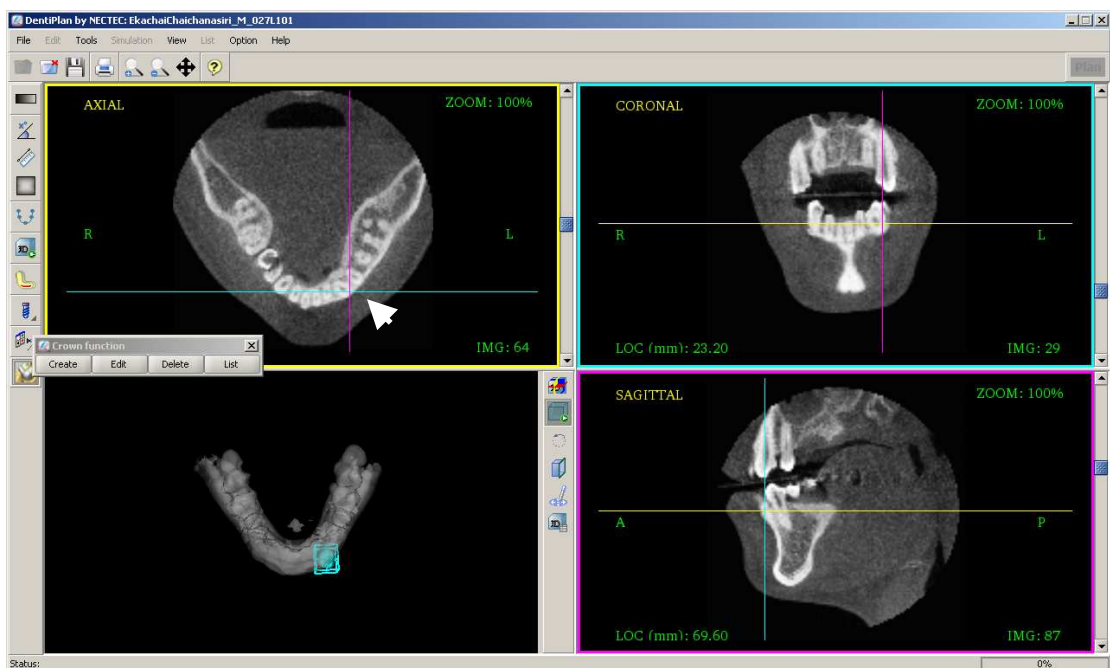
รูปที่ 4.6 ภาพการเลือกตำแหน่งที่ฟันจะแสดงบนหน้าต่าง Axial



รูปที่ 4.7 ภาพการเลือกตำแหน่งที่ฟันจะแสดงโดยอ้างอิงกับหน้าต่าง Coronal



รูปที่ 4.8 ภาพการเลือกตำแหน่งที่ฟันจะแสดงโดยอ้างอิงกับหน้าต่าง Sagittal



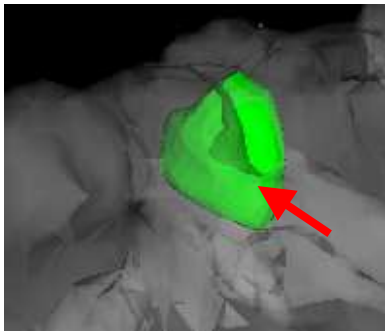
รูปที่ 4.9 โปรแกรมแสดงพื้นผิวฟันปลอมที่ถูกเลือก

## 2. โมดูลการปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอม (Editing Mode)

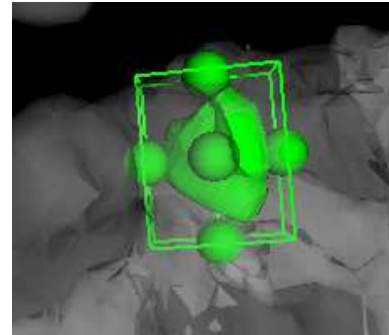
การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยมือ (Manual editing) สามารถทำได้โดยการคลิกเลือกฟันปลอมในหน้าต่างแสดงภาพสามมิติจนมีกล่องครอบฟันปรากฏขึ้น สามารถปรับรูปร่างของฟันได้ดังนี้ ปรับขนาดให้กด

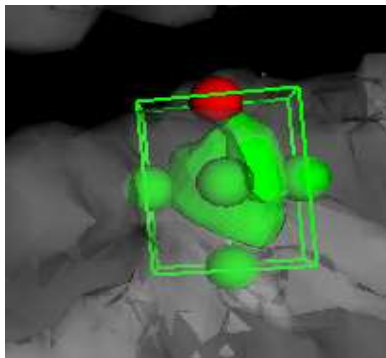
ที่ปุ่มทรงกลมข้างกล่องครอบฟันแล้วลากเมาส์ตามต้องการ ปรับตำแหน่ง โดยคลิกเมาส์กลางค้างไว้แล้วลากไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ปรับการหมุน ให้คลิกเมาส์ซ้ายที่กล่องครอบฟันค้างไว้ แล้วทำการหมุนตามที่ต้องการ ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดอธิบายได้ดังรูปต่อไปนี้



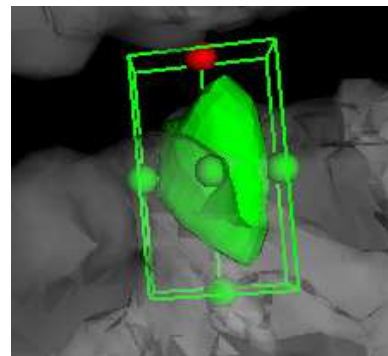
(ก)



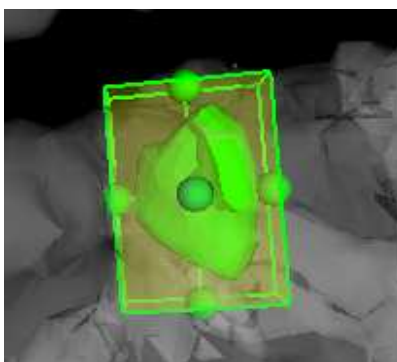
(ข)



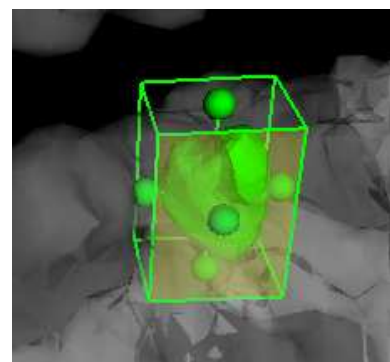
(ค)



(ง)



(จ)



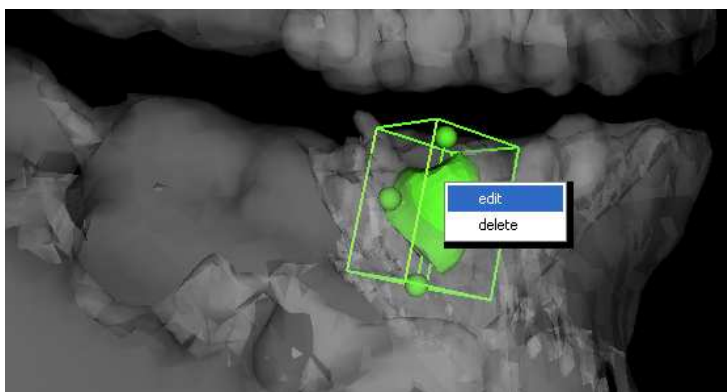
(ฉ)

รูปที่ 4.10 หน้าต่างแสดงภาพขั้นตอนการปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันด้วยมือในขั้นตอนต่าง ๆ

ขั้นตอนสำหรับการปรับขนาดของฟันปลอม เมื่อคลิกที่รูปฟันปลอม ดังรูปที่ 4.10 (ก) แล้วกล่องครอบฟันปลอมจะปรากฏขึ้นดังรูป 4.10 (ข) สำหรับการปรับขนาดด้วยมือทำได้โดยกดที่ปุ่มทรงกลมข้างกล่องครอบฟันปลอม แล้วปุ่มทรงกลมจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดงดังรูปที่ 4.10 (ค) เพื่อแสดงความพร้อมในการปรับขนาด หลังจากนั้นลากเมาส์เพื่อเพิ่มหรือลดขนาดตามความต้องการดังรูปที่ 4.10 (ง) โดยปรับขนาดได้ทั้งหมด 6 ด้าน สำหรับขั้นตอนการปรับตำแหน่งของฟันปลอม เริ่มจากคลิกที่รูปฟันปลอมแล้วกล่องครอบฟันปลอมจะปรากฏขึ้นดังรูป 4.10 (ก) แล้วทำการปรับตำแหน่งโดยคลิกเมาส์กลางค้ำงไว้ที่กล่องครอบฟันปลอมดังรูปที่ 4.10 (จ) แล้วลากไปยังตำแหน่งที่ต้องการ สุดท้ายสำหรับการปรับการหมุนของฟันปลอม เมื่อคลิกที่รูปฟันปลอม แล้วกล่องครอบฟันปลอมปรากฏขึ้นดังรูป 4.10 (ข) แล้วสำหรับการปรับการหมุนฟันปลอมทำได้โดยคลิกเมาส์ซ้ายที่กล่องครอบฟันปลอมแล้วกล่องจะเปลี่ยนสี ดังรูปที่ 4.10 (จ) แล้วลากเมาส์ไปยังมุมที่ต้องการดังรูปที่ 4.10 (ฉ)

## 2) การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยกล่องเครื่องมือ (Toolbox editing)

การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยเครื่องมือสามารถทำได้ 3 วิธีคือ  
 (ก) คลิกเลือกฟันปลอมในหน้าต่างสามมิติดังรูปที่ 4.10 (ก) จนกล่องครอบฟันปรากฏขึ้นดังรูปที่ 4.10 (ข) เมื่อต้องการเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมให้เลือกที่กล่องเครื่องมือหลัก โดยเลือกที่ปุ่ม Edit  
 (ข) คลิกขวาที่ฟันปลอมแล้วเลือกเมนู Edit ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ภาพการคลิกขวาเพื่อเข้าสู่การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอมด้วยกล่องเครื่องมือ

(ค) เลือกที่กล่องเครื่องมือหลักแล้วกดที่ปุ่ม List จะปรากฏหน้าต่างในรูปที่ 4.13 จากนั้นให้เลือกฟลักซ์ที่ต้องการจากตารางแล้วกดปุ่ม edit เมื่อเข้าสู่โหมดการปรับรูปร่างด้วยกล่องเครื่องมือ (Editing) จากทั้ง 3 วิธีแล้วจะปรากฏหน้าต่างเครื่องมือเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนรูปร่างดังรูปที่ 4.12 จากรูปประกอบด้วย

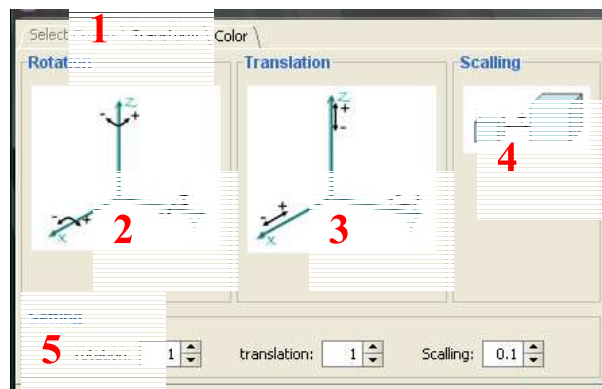
หมายเลข 1 เป็นแถบ (Tab) สามารถเลือกการปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟลักซ์ได้ 2 แบบ คือเปลี่ยนรูปร่าง (Transform) และเปลี่ยนสี (Color)

หมายเลข 2 คือการปรับเปลี่ยนรูปร่างด้วยการหมุนตามแกน x, y และ z ด้วยการคลิกที่ลูกศรตามแกนต่าง ๆ

หมายเลข 3 คือการปรับเปลี่ยนรูปร่างด้วยการเคลื่อนที่ตามแกน x, y และ z ด้วยการคลิกที่ลูกศรตามแกนต่าง ๆ

หมายเลข 4 คือการปรับเปลี่ยนรูปร่างด้วยการปรับขนาด โดยสามารถคลิกที่กล่องเล็กเพื่อเป็นการลดขนาด และคลิกที่กล่องใหญ่จะเป็นการเพิ่มขนาด

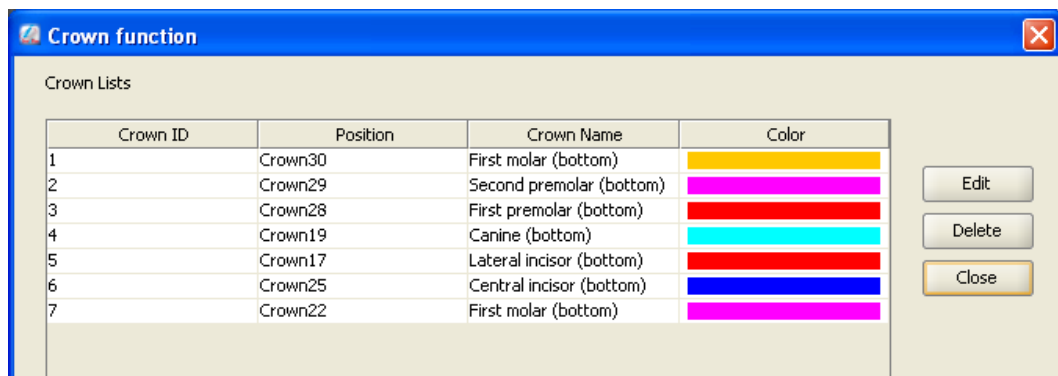
หมายเลข 5 เป็นส่วนของการตั้งค่า ซึ่งการปรับเปลี่ยนรูปร่างทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับค่าที่ตั้งค่า จากรูปที่ 4.19 สำหรับการหมุนค่าตั้งต้นอยู่ที่ 1 องศา (Degree) สำหรับการเคลื่อนที่ค่าตั้งต้นอยู่ที่ 1 จุดภาพ (Pixel) และสำหรับการปรับขนาดค่าตั้งต้นอยู่ที่ 0.1 เท่าของฟลักซ์ โดยค่าทั้งหมดสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของผู้ใช้งาน



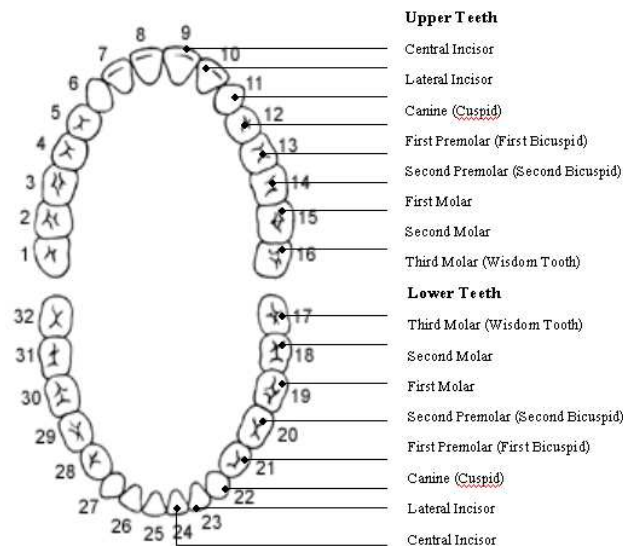
รูปที่ 4.12 หน้าต่างเครื่องมือเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนรูปร่าง

### 3. โมดูลการเก็บข้อมูลของฟันปลอม

ฟันปลอมแต่ละซี่ที่ถูกนำมาใช้งานในระบบ จะถูกเก็บข้อมูลในรูปแบบของเวกเตอร์และแสดงข้อมูลไว้ในลักษณะของตาราง โดยในตารางจะแสดงข้อมูลที่ประกอบด้วย รหัสของฟันปลอม (Crown ID) ตำแหน่ง (Position: อ้างอิงจากข้อมูลในรูปที่ 4.14) ชื่อฟันปลอม (อ้างอิงจากข้อมูลในรูปที่ 4.14) และสีของฟันปลอม (Color) ซึ่งการเข้าถึงข้อมูลทั้งหมดสามารถเลือกที่กล่องเครื่องมือหลัก โดยเลือกที่เมนู List แล้วจะปรากฏหน้าต่างข้อมูลดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 หน้าต่างข้อมูลของฟันปลอมที่อยู่ในระบบ



รูปที่ 4.14 ข้อมูลสำหรับชื่อของฟันปลอมในแต่ละตำแหน่ง



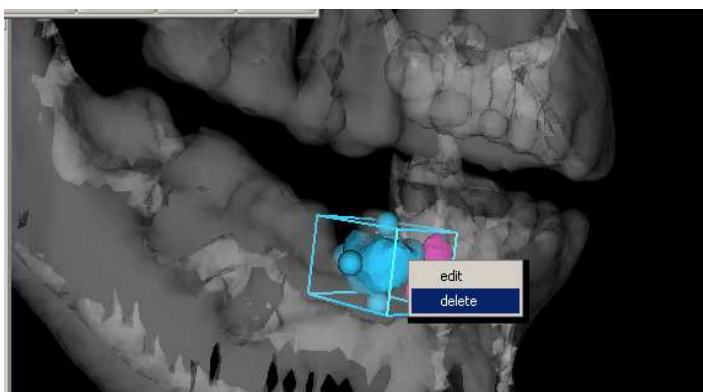
#### 4. โมดูลการลบข้อมูลของฟันปลอม

การลบข้อมูลของฟันปลอมทำได้ 3 วิธีคือ

1)

คลิกเลือกฟันปลอมในหน้าต่างสามมิติดังรูปที่ 4.10 (ก) จนกล่องครอบฟันปรากฏขึ้นดังรูปที่ 4.10 (ข) เมื่อต้องการลบข้อมูลของฟันปลอมให้เลือกที่กล่องเครื่องมือหลักโดยเลือกที่ปุ่ม delete

2) คลิกขวาที่ฟันปลอมที่ต้องการจะลบแล้วกดปุ่ม delete ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ภาพการคลิกขวาเพื่อลบข้อมูลของฟันปลอม

3)

คลิกที่กล่องเครื่องมือหลักแล้วกดที่ปุ่ม List จะปรากฏหน้าต่างเครื่องมือ จากนั้นให้เลือกฟันปลอมที่ต้องการลบจาดารางแล้วกดปุ่ม delete

จากการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมพบว่าขั้นตอนในการใส่ฟันปลอมเป็นไปด้วยความไม่สะดวกและค่อนข้างยุ่งยากจึงเป็นที่มาในการทดลองขั้นตอนต่อไป

### 4.3 การสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT

ขั้นตอนการสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT เริ่มจากการแยกองค์ประกอบภาพจากทั้ง 3 วิธี แล้วนำไปสร้างพื้นผิวสามมิติโดยทั้งหมดจะถูกเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลองจากการสร้างภาพสามมิติ ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

การแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation) เนื่องจากภาพฟันปลอมที่ใช้ในการทดลองนั้นได้มาจากเครื่องสแกน CT ทั้งหมด 60 แผ่นภาพ (Slice) โดยมีขนาด  $256 \times 256$  จุดภาพ (Pixels) สำหรับการทดลองนี้ได้เลือกแผ่นภาพท้าย ๆ ซึ่งองค์ประกอบของรูปจะมี ฟันปลอม ดินน้ำ

มัน และพื้นหลัง ดังนั้นรูปภาพที่จะใช้ในการทดลองเบื้องต้นจะใช้ภาพฟันในแผ่นภาพที่ 23 (รูปที่ 4.16) ในการทดลองการแยกองค์ประกอบของภาพ เพื่อความสะดวกและง่ายแก่การทดลอง ผู้วิจัยจึงทำการเปลี่ยนพื้นหลังให้อยู่ในรูปสีขาวดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ภาพฟันปลอมจากเครื่องสแกน CT ในแผ่นภาพที่ 23

1. การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ (*Image Segmentation with Gaussian Mixture Model*)

การทดสอบเริ่มจากการสร้างกราฟแสดงความถี่ของความเข้ม (Histogram) ของภาพ ดังรูปที่ 4.17



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 ภาพกราฟแสดงความถี่ของความเข้ม (Histogram) และภาพกราฟประมาณความถี่ของความเข้มด้วยฟังก์ชันรูปร่างผสมของเกาส์

จากกราฟในรูปที่ 4.17 (ก) สามารถแยกความเข้มเป็น 3 กลุ่มคือ พื้นหลัง ฟันปลอม และคินน้ำมัน เนื่องจากกราฟแสดงความถี่ของความเข้มที่ได้ยังคงไม่ราบเรียบจึงทำให้ไม่สามารถแบ่งทั้ง 3 กลุ่ม

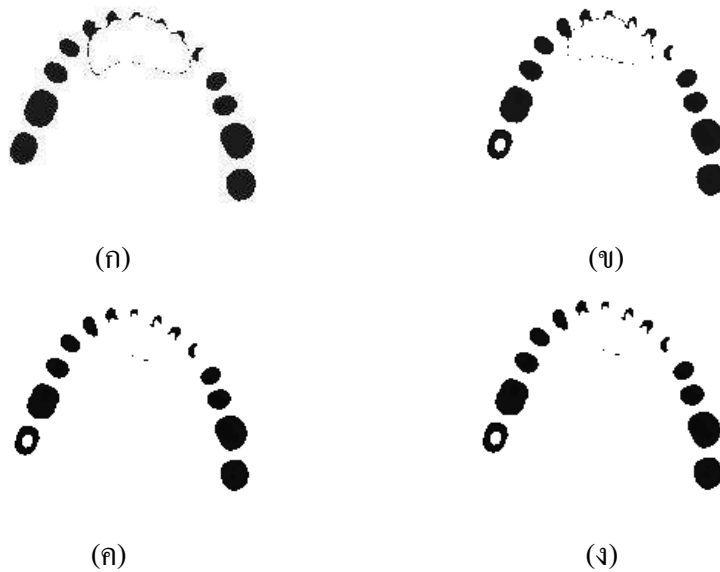
ออกจากกันได้ ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่าฟังก์ชันรูปร่างผสมของเกาส์ (Gaussian Mixture Model) ดังรูปที่ 4.17 (ข) ในขั้นตอนการประมาณค่าฟังก์ชันรูปร่างผสมของเกาส์ได้ตัดกลุ่มของพื้นหลัง (สีดำจากรูป 4.17 (ก)) ออกไปในขั้นตอนนี้เมื่อกราฟราบเรียบมากขึ้นแล้วจะทำให้ทราบค่าความเข้มที่แบ่งระหว่างทั้ง 3 กลุ่ม โดยดูจากจุดต่ำสุดของแต่ละกลุ่ม เมื่อแบ่งกลุ่มจากความเข้มที่ได้โดยเลือกเฉพาะกลุ่มของพื้นซึ่งผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ภาพกราฟแสดงผลลัพธ์ของรูปพื้นปลอมด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์

## 2. การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ (Image Segmentation with Relaxation Labeling)

เนื่องจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์ ยังมีส่วนประกอบของดินน้ำมันติดอยู่จึงต้องเพิ่มความน่าจะเป็นของจุดภาพด้วยวิธี Relaxation labeling ซึ่งขั้นตอนวิธีนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบในการคำนวณตามรูปที่ 4.19

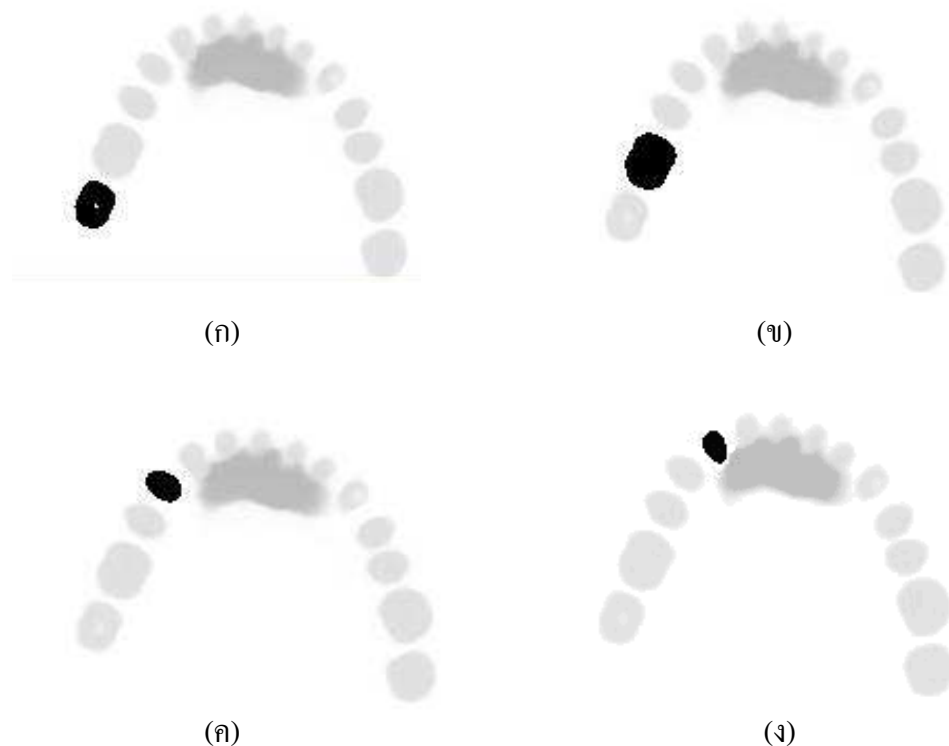


รูปที่ 4.19 การแยกองค์ประกอบด้วย Relaxation จำนวน 1, 5, 10 และ 20 รอบ ตามรูป (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.19 ทั้งหมดพบว่าเมื่อเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณมากแล้ว ภาพพื้นปลอมที่ได้จะยิ่งสูญเสียรูปทรง จึงได้นำเสนออีกวิธีคือการขยายพื้นที่

### 3. การแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่ (Image Segmentation with Region Growing)

การทดสอบด้วยการขยายพื้นที่ที่จะต้องกำหนดจุดเริ่มต้นของการขยาย โดยจุดเริ่มต้นจะกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งตรงที่พื้นปลอมอยู่ จากรูป 4.20 ได้กำหนดให้ความเข้มจุดภาพที่ถูกขยายเป็นสีเดิม (สีดำ) ส่วนพื้นที่อื่นให้ลดความเข้มลงเพื่อสะดวกในการสร้างภาพสามมิติ



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างการขยายพื้นที่ในพื้นปลอมที่ต่าง ๆ

หลังจากเลือกขั้นตอนในการแยกองค์ประกอบภาพแล้ว จากนั้นจะทดลองด้วยการสร้างพื้นผิวสามมิติจากภาพสแกน CT ด้วยวิธีการต่อกันของลูกบาศก์ (Marching Cube) ดังรูปที่ 4.21 สำหรับการทดลองนี้ได้แสดงการสร้างพื้นผิวจากทั้ง 3 กรณีในแต่ละการแยกองค์ประกอบภาพสุดท้ายสำหรับการทดสอบการสร้างพื้นผิวสามมิติ ผู้วิจัยจะเลือกภาพสามมิติที่เหมาะสมที่สุด โดยผลการทดลองแบ่งเป็น 3 กรณีดังนี้



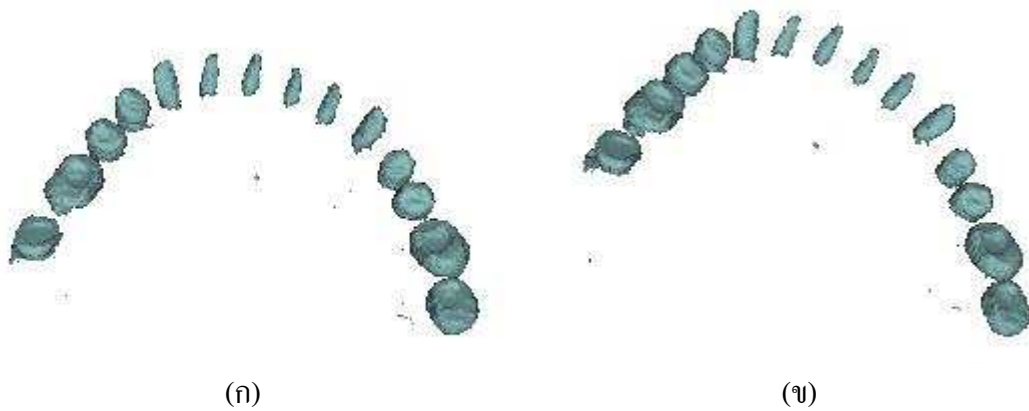
รูปที่ 4.21 รูปภาพสามมิติของภาพสแกนฟันปลอมกับดินน้ำมัน

การสร้างพื้นผิวสามมิติจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์



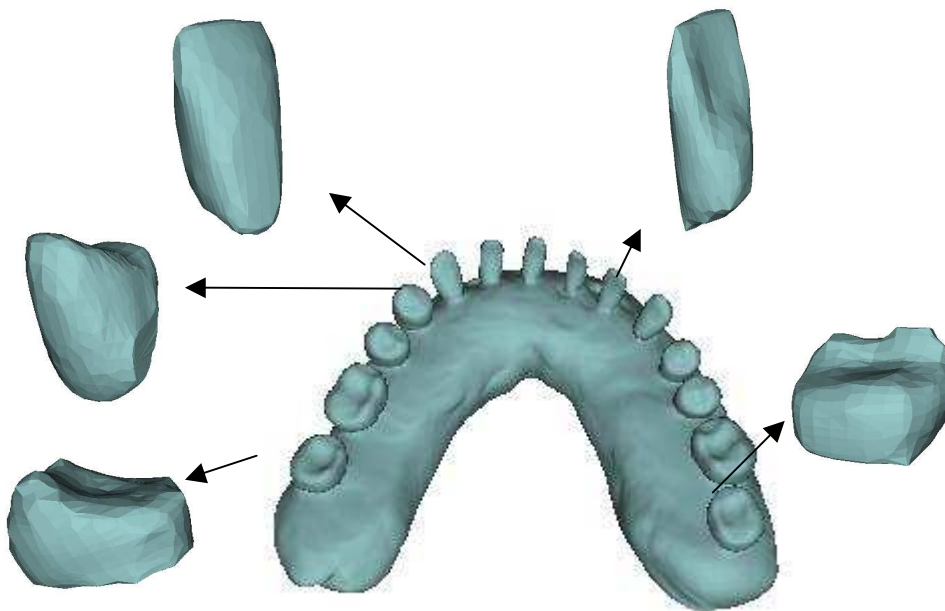
รูปที่ 4.22 ภาพ (ก) และ (ข) แสดงรูปภาพสามมิติของภาพสแกนฟันปลอมที่ผ่านการแยกองค์ประกอบด้วยการประมาณรูปร่างผสมของเกาส์

การสร้างพื้นผิวสามมิติจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้แต่ละจุดภาพ



รูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) แสดงรูปภาพสามมิติของภาพสแกนฟันปลอมที่ผ่านการแยกองค์ประกอบด้วยการเพิ่มความน่าจะเป็นของแต่ละจุดภาพ

การสร้างพื้นผิวสามมิติจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยการขยายพื้นที่  
ตัวอย่างภาพฟันปลอมสามมิติที่ได้จากการขยายพื้นที่



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างภาพสามมิติของภาพสแกนฟันปลอมที่ผ่านการแยกองค์ประกอบด้วยการขยายพื้นที่

จากการทดลองการสร้างพื้นผิวสามมิติจากภาพสแกนพื้นป्लอมด้วยการแยกองค์ประกอบภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ พบว่า การแยกองค์ประกอบภาพด้วยรูปร่างผสมของเกาส์ปรากฏว่ารูปสามมิติที่ได้ยังมีองค์ประกอบที่เป็นดินน้ำมันปนอยู่เล็กน้อยเนื่องจากการประมาณค่าด้วยการเลือกจุดต่ำสุดของแต่ละองค์ประกอบโดยฟังก์ชันเกาส์นั้นยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง จึงทำให้ภาพสามมิติของพื้นป्लอมยังคงมีองค์ประกอบของดินน้ำมันติดอยู่ ส่วนการเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับจุดภาพปรากฏว่าดินน้ำมันบางส่วนหายไปเหลือเพียงเล็กน้อยแต่รูปทรงของพื้นป्लอมยังคงสูญเสียรูปทรงไปมากเช่นกัน เนื่องจากวิธีนี้ใช้ความน่าจะเป็น โดยพิจารณาจากจุดรอบข้าง โดยจุดที่มีปัญหาคือจุดที่อยู่ระหว่างพื้นป्लอม (ขอบนอกพื้นป्लอม) และดินน้ำมัน ยกตัวอย่างจากรูปที่ 3.8 ถ้าจุดที่พิจารณาเป็นพื้นป्लอมแต่องค์ประกอบรอบข้างเป็นดินน้ำมันส่วนใหญ่ ดังนั้นจุดดังกล่าวก็จะมีเชื่อมั่นว่าเป็นดินน้ำมันนั่นเอง จึงเป็นผลเมื่อคำนวณด้วยจำนวนรอบมาก ๆ แล้วจุดที่เป็นขอบของพื้นป्लอมจะค่อย ๆ หายไป และวิธีสุดท้ายการขยายพื้นที่วิธีนี้ได้ผลดีที่สุดเนื่องจากสามารถกำหนดเงื่อนไขการหยุดขยายได้ จากค่าความเข้มเฉลี่ยที่อยู่ในช่วงขององค์ประกอบของพื้นป्लอม แต่ยังมี ความคลาดเคลื่อนในจุดที่เป็นขอบพื้นเพราะความเข้มของพื้นและดินน้ำมันใกล้เคียงกันมาก จากรูปที่ 4.24 ภาพสามมิติที่ได้จึงยังคงไม่ราบเรียบเท่าที่ควร แต่ยังคงรูปพื้นป्लอมไว้ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้พื้นป्लอมที่ได้จากการขยายพื้นที่ในงานทดลองต่อไป

#### 4.4 ขั้นตอนวิธีการไล่พื้นป्लอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยใช้การขยายพื้นผิวด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบและการเปรียบเทียบความโค้ง


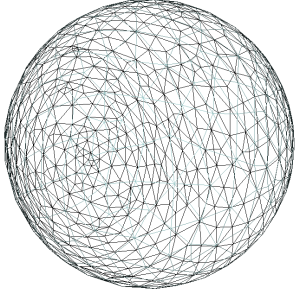
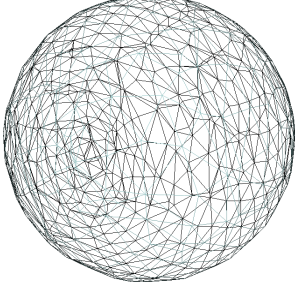

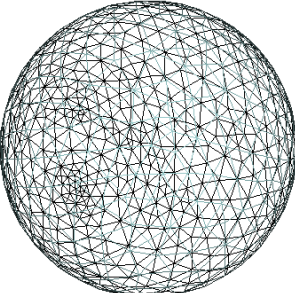
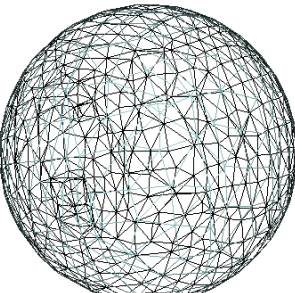

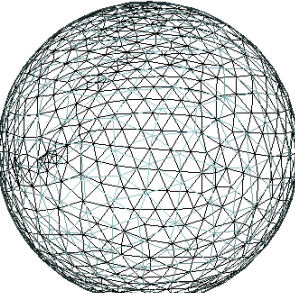
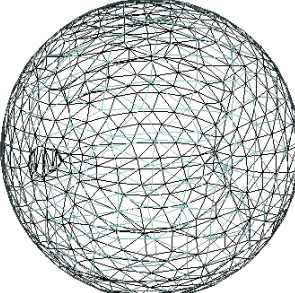
จากการทำงานของระบบจำลองการไล่พื้นป्लอมพบว่าการปรับเปลี่ยนรูปร่างของพื้นป्लอมเป็นไปด้วยความยากลำบากในการปรับเปลี่ยนพื้นป्लอมเพื่อให้เข้ากับพื้นรอบข้าง อีกทั้งผู้ใช้ยังต้องอาศัยความชำนาญในการปรับเปลี่ยนรูปร่างพื้นป्लอม จนอาจนำไปสู่ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนแบบดังกล่าว นั่นจึงเป็นที่มาของขั้นตอนการไล่พื้นป्लอมด้วยวิธีการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยขยายพื้นผิวด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก ซึ่งขั้นตอนนี้จะช่วยลดข้อผิดพลาดของผู้ใช้ และให้ผู้ใช้ใช้งานได้สะดวกขึ้น โดยขั้นตอนการทำงานทั้งหมดได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดสอบทั้งหมดเป็นดังนี้

##### 4.4.1 การปรับพื้นผิวสามมิติของพื้นป्लอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว (Surface Parameterization)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวของพื้นป्लอมสามมิติที่ได้จากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยวิธีการขยายพื้นที่ลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วย ซึ่งการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบจุดกระจายสม่ำเสมอ (Tutte Mapping, สมการที่ 2.30)


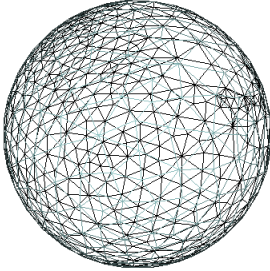
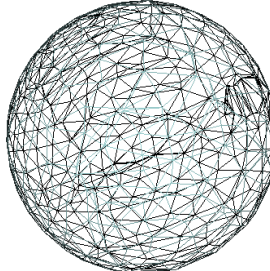

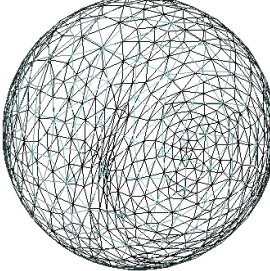
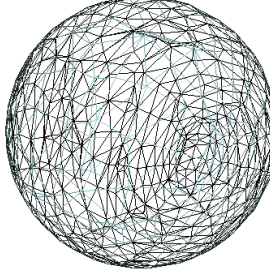

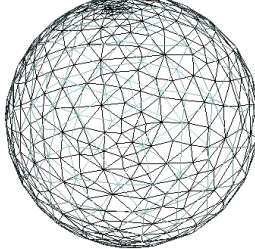
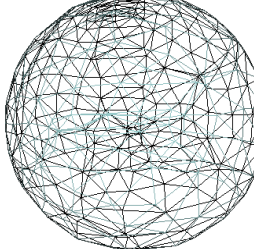

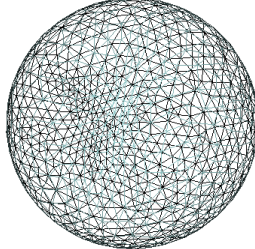
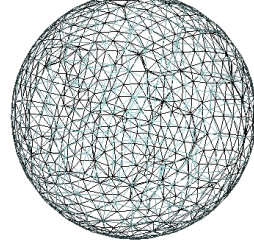

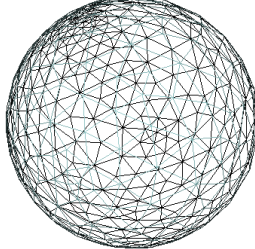
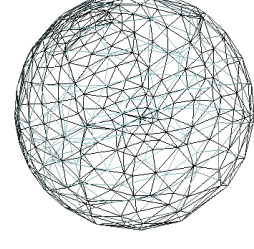
และการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวแบบสวางนมุม (Conformal Mapping: สมการที่ 2.26) ผลการทดลองกับพื้นปดอมต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการปรับพื้นผิวสามมิติของพื้นปดอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว

พื้นปดอมสามมิติ	การเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว	
	แบบจุดกระจายสม่ำเสมอ	แบบสวางนมุม
First Premolar 		
First Molar 		
Central Incisor 		

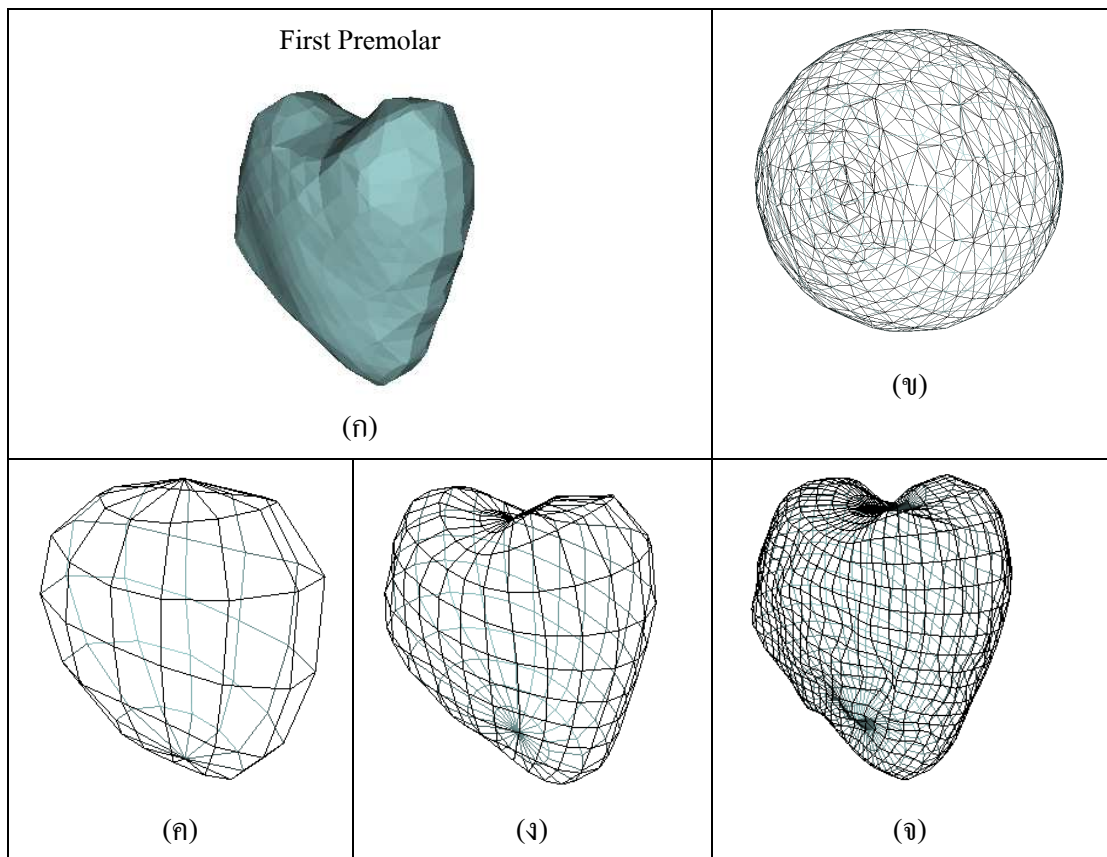


ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการปรับพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว (ต่อ)

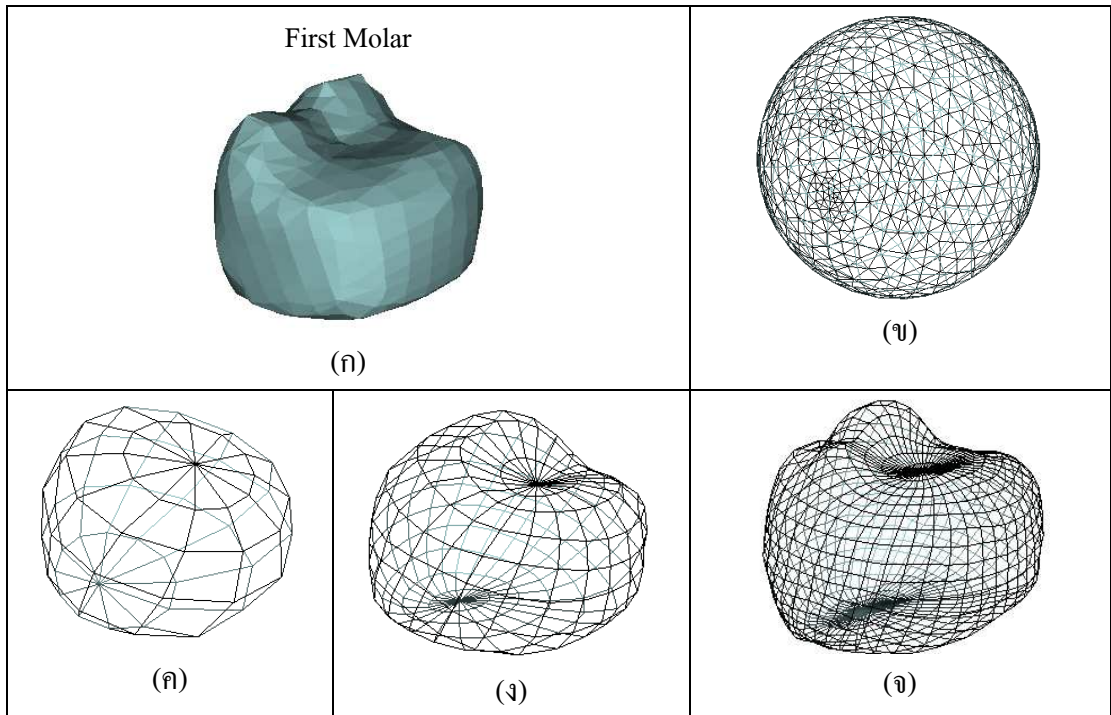
ฟันปลอมสามมิติ	การเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว	
	แบบจุดกระจายสม่ำเสมอ	แบบสงวนมุม
<p>Canine</p> 		
<p>First Premolar</p> 		
<p>Lateral Incisor</p> 		
<p>Lateral Incisor</p> 		
<p>Third Molar</p> 		

#### 4.4.2 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Spherical Harmonic Expansion) ในแต่ละลำดับ (order)

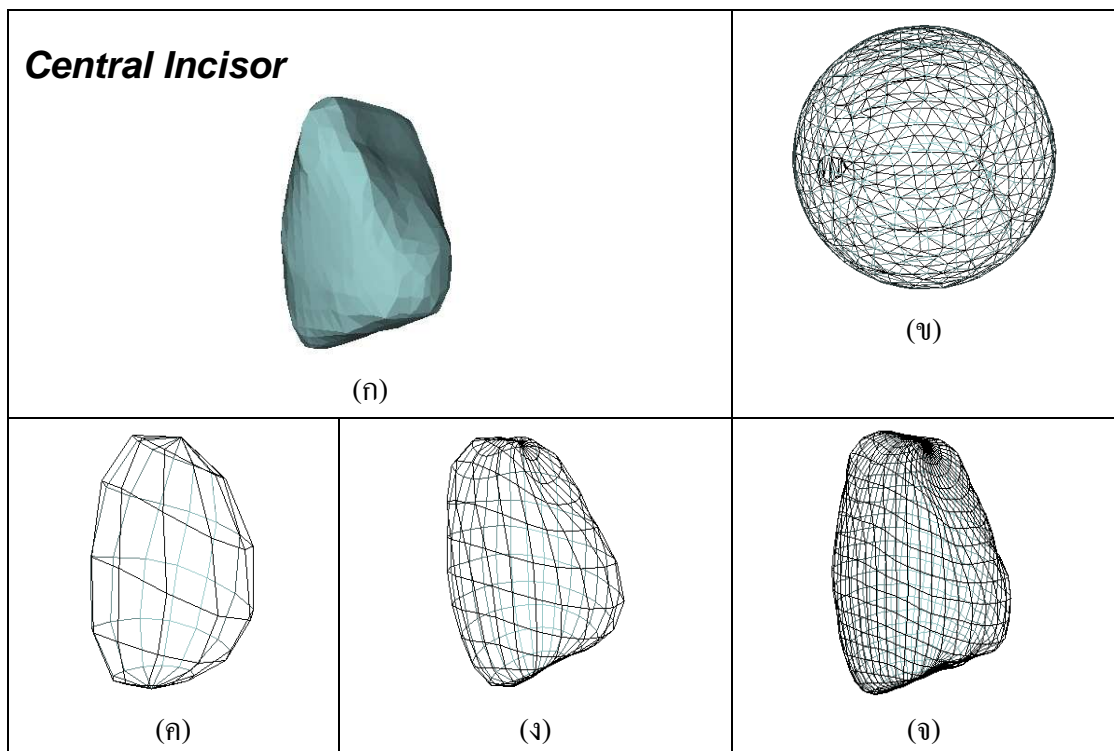
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการจุดขยายบนทรงกลมที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Real-Valued Spherical Harmonic Function, สมการที่ 3.4) สำหรับการขยายโดยใช้สมการดังกล่าวซึ่งอยู่ในรูปแบบฟูรีเยร์ (Fourier Transform) นั้นพื้นผิวสามมิติจะถูกขยายตามลำดับ (Order) ของรูปแบบฟูรีเยร์ ซึ่งความถี่ในการขยายขึ้นอยู่กับมุม  $\theta$  และ  $\phi$  บนทรงกลมหนึ่งหน่วย และผลการทดลองเป็นดังรูปต่อไปนี้ โดยในแต่ละรูปจะประกอบไปด้วยภาพ (ก) รูปพื้นป्लอดเดิม, ภาพ (ข) รูปพื้นป्लอดบนทรงกลม, ภาพ (ค) การเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวในลำดับที่ 4 ทุก  $\theta=30^\circ$  และ  $\phi=30^\circ$ , ภาพ (ง) การเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวในลำดับที่ 8 ทุก  $\theta=15^\circ$  และ  $\phi=15^\circ$  และภาพ (จ) การเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิวในลำดับที่ 16 ทุก  $\theta=7.5^\circ$  และ  $\phi=7.5^\circ$



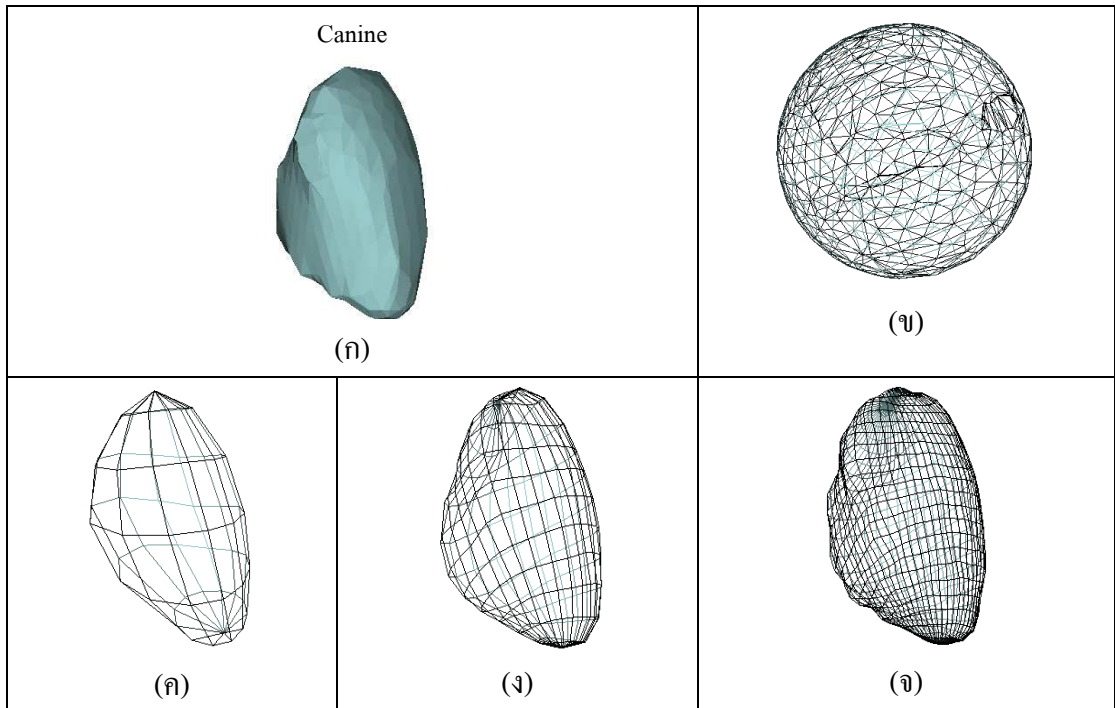
รูปที่ 4.25 ภาพตัวอย่างที่ 1 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก



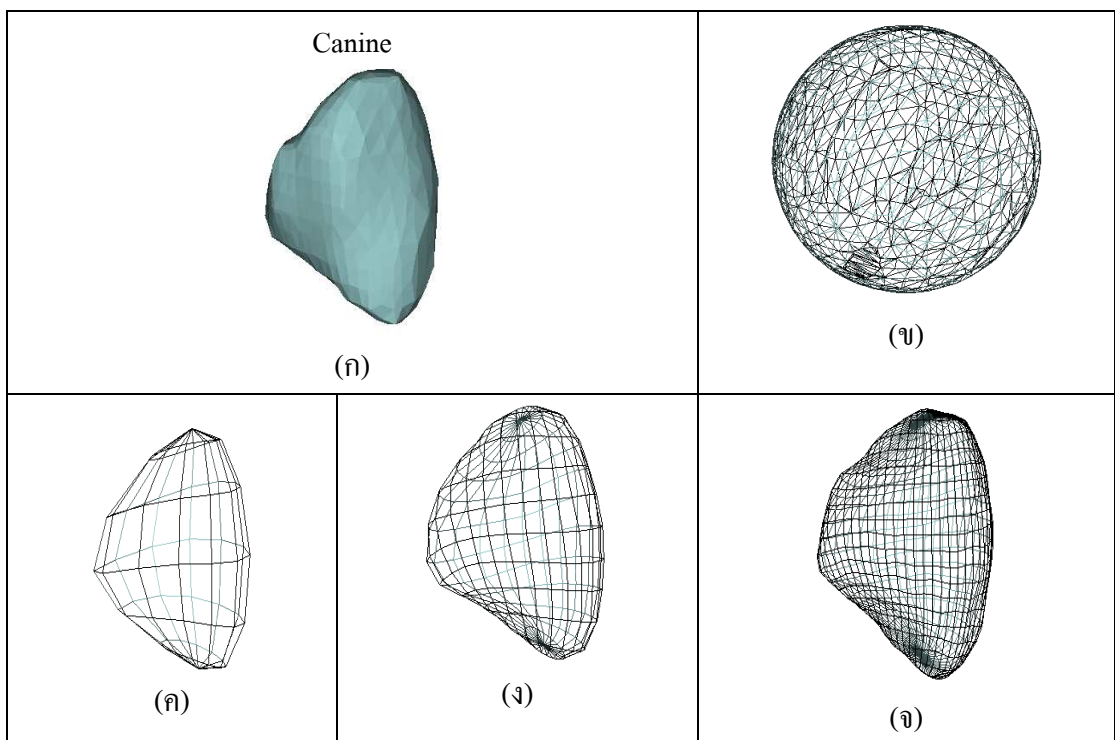
รูปที่ 4.26 ภาพตัวอย่างที่ 2 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก



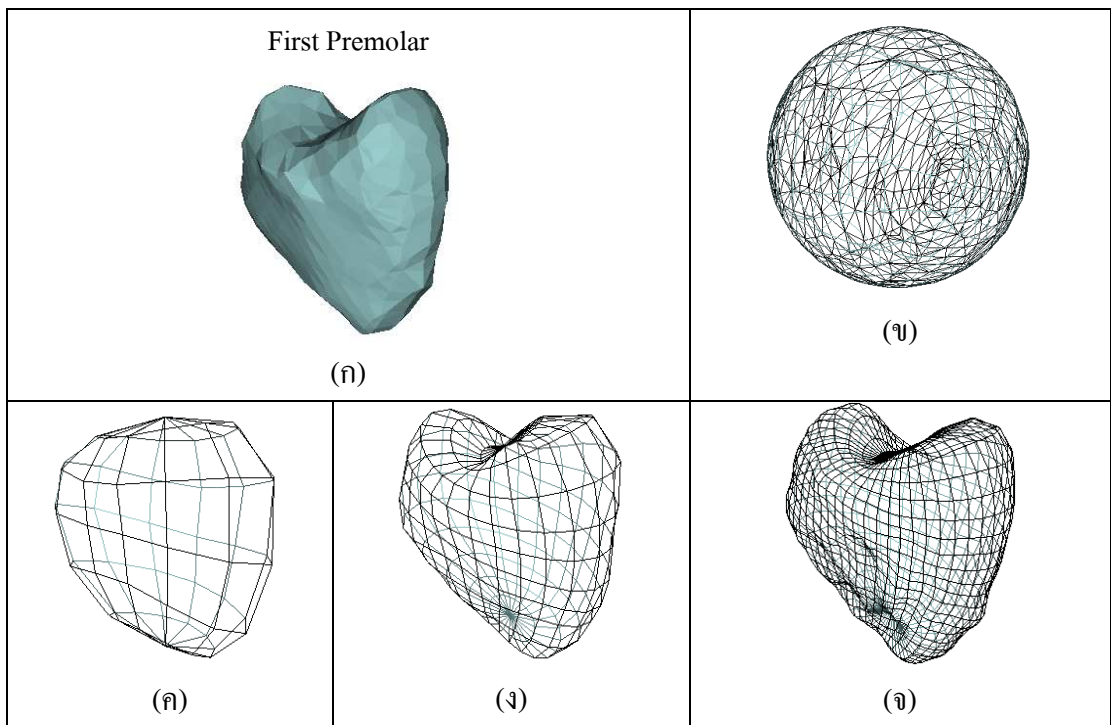
รูปที่ 4.27 ภาพตัวอย่างที่ 3 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก



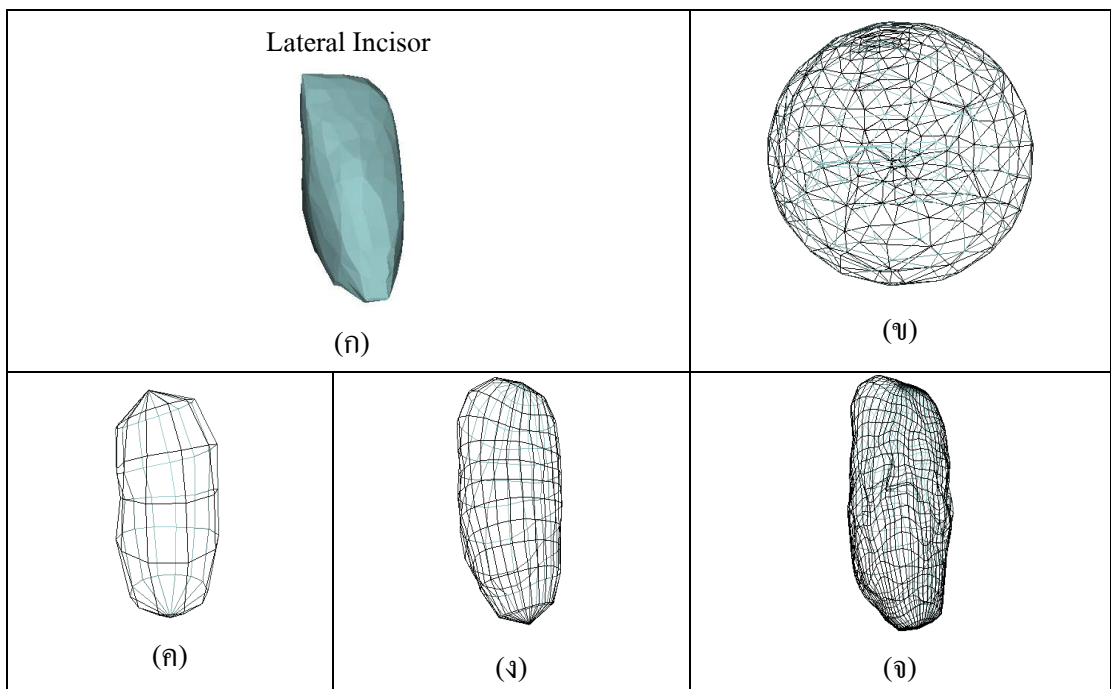
รูปที่ 4.28 ภาพตัวอย่างที่ 4 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก



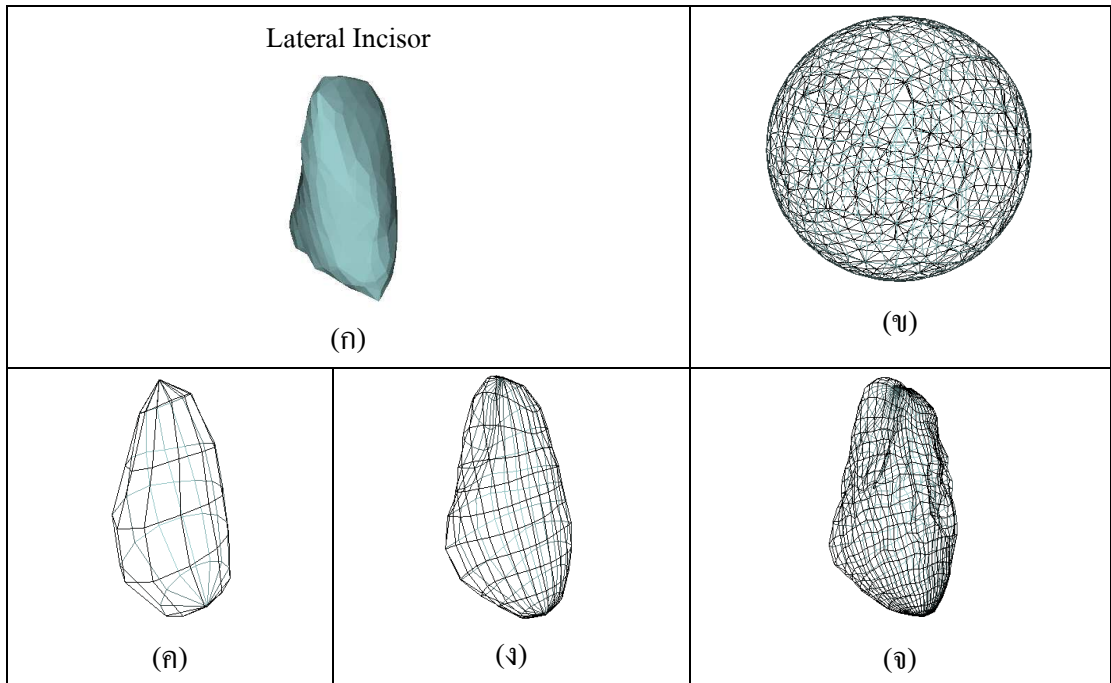
รูปที่ 4.29 ภาพตัวอย่างที่ 5 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก



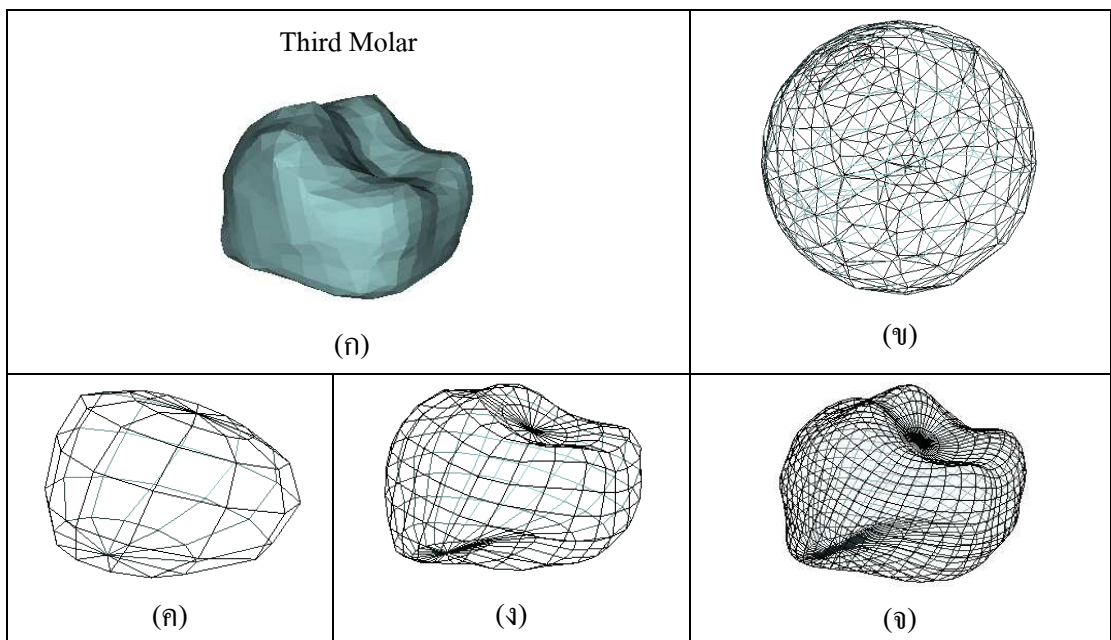
รูปที่ 4.30 ภาพตัวอย่างที่ 6 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก



รูปที่ 4.31 ภาพตัวอย่างที่ 7 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก



รูปที่ 4.32 ภาพตัวอย่างที่ 8 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก

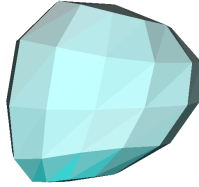
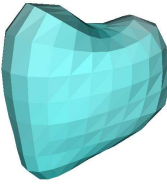
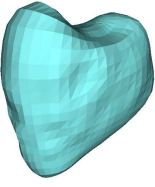


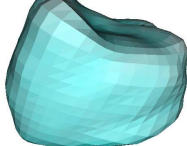









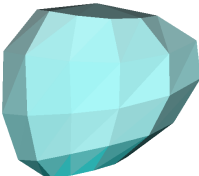




รูปที่ 4.33 ภาพตัวอย่างที่ 9 การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก







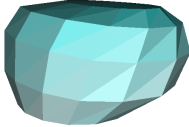

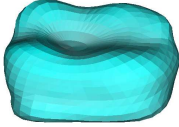
#### 4.4.3 การหาค่าความโค้งของพื้นผิว (Curvature of Surface)

สำหรับการทดลองการหาความโค้งของพื้นผิวได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ลักษณะคือ ความโค้งของเกาส์ ความโค้งเฉลี่ย และความโค้งรวม ซึ่งทดลองกับข้อมูลฟันปลอมทั้ง 4 แบบคือ ฟันปลอมเดิม และฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 4, 8 และ 16 การทดลองทั้งหมดเป็นดังนี้

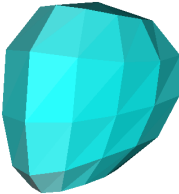
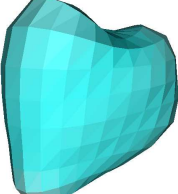
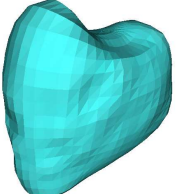
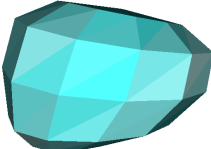

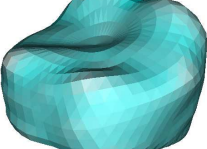



ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการหาค่าความโค้งเฉลี่ย

ชื่อ	ลำดับ 4	ลำดับ 8	ลำดับ 16
First Premolar			
First Molar			
Central Incisor			
Canine1			
Canine2			
First Premolar			

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการหาค่าความโค้งเฉลี่ย (ต่อ)







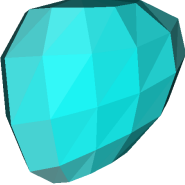
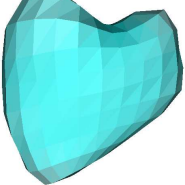
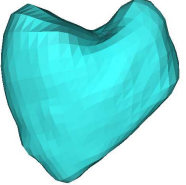






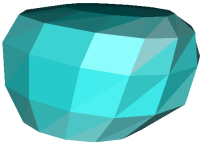


ชื่อ	ลำดับ 4	ลำดับ 8	ลำดับ 16
Lateral Incisor			
Lateral Incisor			
Third Molar			

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการหาค่าความโค้งของเกาส์

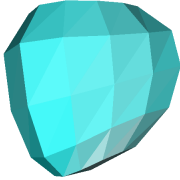
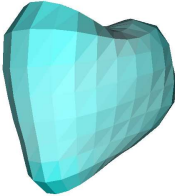
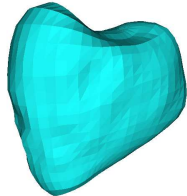
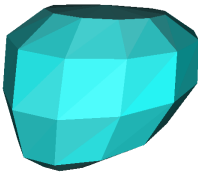
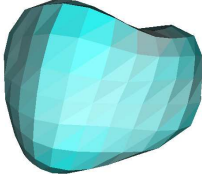
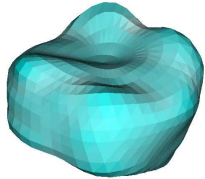


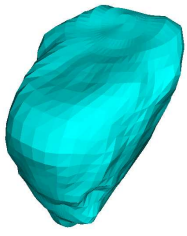






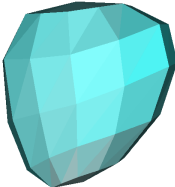

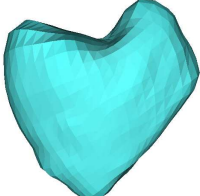
ชื่อ	ลำดับ 4	ลำดับ 8	ลำดับ 16
First Premolar			
First Molar			
Central Incisor			









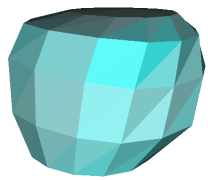
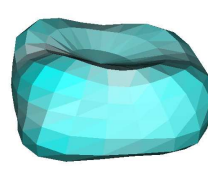
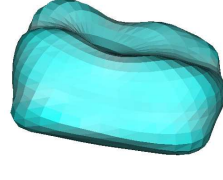
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการหาค่าความโค้งของเกาส์ (ต่อ)

ชื่อ	ลำดับ 4	ลำดับ 8	ลำดับ 16
Canine			
Canine			
First Premolar			
Lateral Incisor			
Lateral Incisor			
Third Molar			

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการหาความโค้งที่สอดคล้องกันที่จุดเว้าลึก (Umbilic Point)

ชื่อ	ลำดับ 4	ลำดับ 8	ลำดับ 16
First Premolar			
First Molar			
Central Incisor			
Canine			
Canine			
First Premolar			

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการหาความโค้งที่สอดคล้องกันที่จุดเว้าลึก (ต่อ)

ชื่อ	ลำดับ 4	ลำดับ 8	ลำดับ 16
Lateral Incisor			
Lateral Incisor			
Third Molar			

#### 4.4.4 การทดสอบการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด

การทดสอบการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุดแบ่งการทดลองเป็น 2 แบบ โดยผลการทดลองทั้งหมดเป็นดังนี้

- 1) เปรียบเทียบขั้นตอนการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมเดิมกับฟันปลอมที่ได้จากการขยายพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกกับข้อมูลฟันจำลองด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด เพื่อหาระดับ (Order) ที่เหมาะสมที่สุด โดยอ้างอิงผลการทดลองจากการเปรียบเทียบเรื่อง เวลา (วินาที) ความคลาดเคลื่อนในการหมุน(องศา) จากผลการทดลองในขั้นตอนนี้จะนำไปสู่ขั้นตอนการทดลองขั้นถัดไป ซึ่งผลการเปรียบเทียบทั้งหมดเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.5 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับฟันปลอมที่ถูกหมุน 30 องศา กับแกน  $x$

ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การหมุน(องศา)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อนหมุน(%)
1. First Premolar	618	29.62	102	1.26
2. First Molar	788	29.68	179	1.06
3. Central Incisor	647	29.68	128	1.06
4. Canine	673	29.49	108	1.70
5. Canine	547	29.58	74	1.40
6. First Premolar	598	29.53	90	1.56
7. Lateral Incisor	378	29.66	35	1.13
8. Lateral Incisor	366	29.79	32	0.70
9. Third Molar	924	29.81	254	0.63

ตารางที่ 4.6 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 4 หมุน 30 องศา กับแกน  $x$

ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การหมุน(องศา)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อนหมุน(%)
1. First Premolar	62	28.51	3	4.96
2. First Molar	62	28.86	4	3.80
3. Central Incisor	62	28.57	3	4.76
4. Canine	62	28.18	4	6.06
5. Canine	62	28.23	3	5.90
6. First Premolar	62	28.11	4	6.30
7. Lateral Incisor	62	28.24	3	5.86
8. Lateral Incisor	62	28.67	2	4.43
9. Third Molar	62	28.72	7	4.26

ตารางที่ 4.7 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับ  
ฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก  
ในลำดับที่ 8 หมุน 30 องศา กับแกน  $x$

ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การหมุน(องศา)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อน หมุน(%)
1. First Premolar	266	29.34	22	2.20
2. First Molar	266	29.22	24	2.60
3. Central Incisor	266	28.98	25	3.40
4. Canine	266	29.01	22	3.30
5. Canine	266	28.68	23	4.40
6. First Premolar	266	28.34	26	5.53
7. Lateral Incisor	266	28.61	20	4.63
8. Lateral Incisor	266	29.17	19	2.76
9. Third Molar	266	29.23	28	2.56

ตารางที่ 4.8 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิม  
กับฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก  
ในลำดับที่ 16 หมุน 30 องศา กับแกน  $x$

ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การหมุน(องศา)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อน หมุน(%)
1. First Premolar	1106	29.71	294	0.96
2. First Molar	1106	29.65	304	1.16
3. Central Incisor	1106	29.63	287	1.23
4. Canine	1106	29.41	285	1.96
5. Canine	1106	29.39	322	2.03
6. First Premolar	1106	29.41	317	1.96
7. Lateral Incisor	1106	29.21	294	2.36
8. Lateral Incisor	1106	29.35	282	2.16
9. Third Molar	1106	29.46	324	1.80

ตารางที่ 4.9 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิม  
กับฟันปลอมที่ถูกเลื่อน 10 จุดภาพกับแกน  $x$

ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การเคลื่อนที่ (จุดภาพ)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อนการ เคลื่อนที่(%)
1. First Premolar	618	9.86	135	1.4
2. First Molar	788	10.12	184	1.2
3. Central Incisor	647	9.76	151	2.4
4. Canine	673	9.8	162	2
5. Canine	547	9.84	103	1.6
6. First Premolar	598	10.25	119	2.5
7. Lateral Incisor	378	9.78	65	2.2
8. Lateral Incisor	366	9.85	64	1.5
9. Third Molar	924	9.82	291	1.8

ตารางที่ 4.10 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิมกับ  
ฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก  
ในลำดับที่ 4 เลื่อน 10 จุดภาพกับแกน  $x$

ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การเคลื่อนที่ (จุดภาพ)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อน หมุน(%)
1. First Premolar	62	10.68	5	6.8
2. First Molar	62	10.79	5	7.9
3. Central Incisor	62	9.01	5	7.9
4. Canine	62	9.09	6	7.1
5. Canine	62	10.96	5	7.6
6. First Premolar	62	9.03	6	7.7
7. Lateral Incisor	62	9.16	5	8.4
8. Lateral Incisor	62	10.77	4	7.7
9. Third Molar	62	9.1	11	6.7

ตารางที่ 4.11 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิม

กับฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก

ในลำดับที่ 8 เลื่อน 10 จุดภาพกับแกน x

ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การเคลื่อนที่ (จุดภาพ)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อน หมุน(%)
1. First Premolar	266	9.59	24	4.10
2. First Molar	266	9.60	25	4.00
3. Central Incisor	266	9.50	25	5.00
4. Canine	266	10.47	24	4.70
5. Canine	266	9.61	25	3.90
6. First Premolar	266	9.55	27	4.50
7. Lateral Incisor	266	9.60	24	4.00
8. Lateral Incisor	266	10.39	23	3.90
9. Third Molar	266	9.69	35	3.10

ตารางที่ 4.12 ตารางทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุดระหว่างฟันปลอมเดิม

กับฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิก

ในลำดับที่ 16 เลื่อน 10 จุดภาพกับแกน x

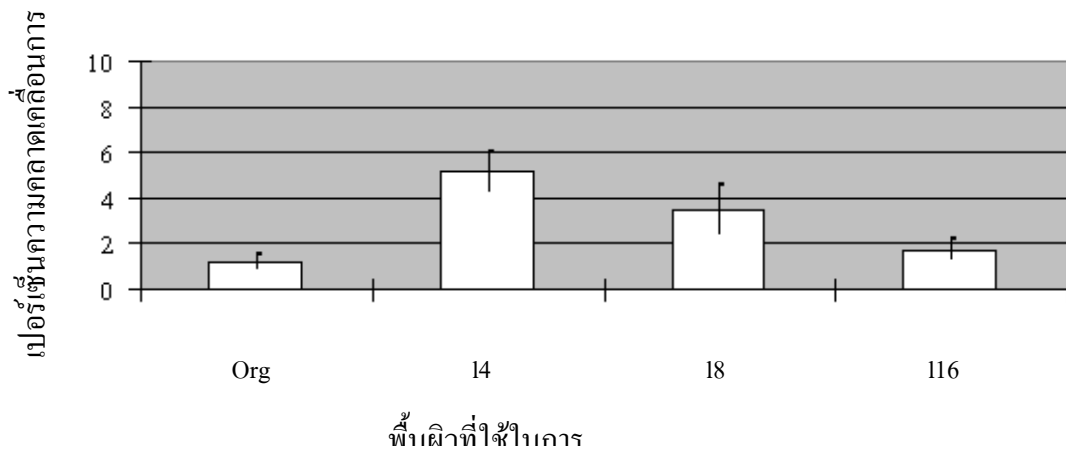
ชื่อ	จำนวนจุด	การคำนวณ		
		การเคลื่อนที่ (จุดภาพ)	เวลา(วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อน หมุน(%)
1. First Premolar	1106	9.73	354	2.70
2. First Molar	1106	9.71	367	2.90
3. Central Incisor	1106	9.70	345	3.00
4. Canine	1106	9.73	342	2.70
5. Canine	1106	10.24	413	2.40
6. First Premolar	1106	9.69	409	3.10
7. Lateral Incisor	1106	9.75	387	2.50
8. Lateral Incisor	1106	9.75	376	2.50
9. Third Molar	1106	9.80	438	2.00

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงรูปสำหรับการทดสอบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้เคียงที่สุด

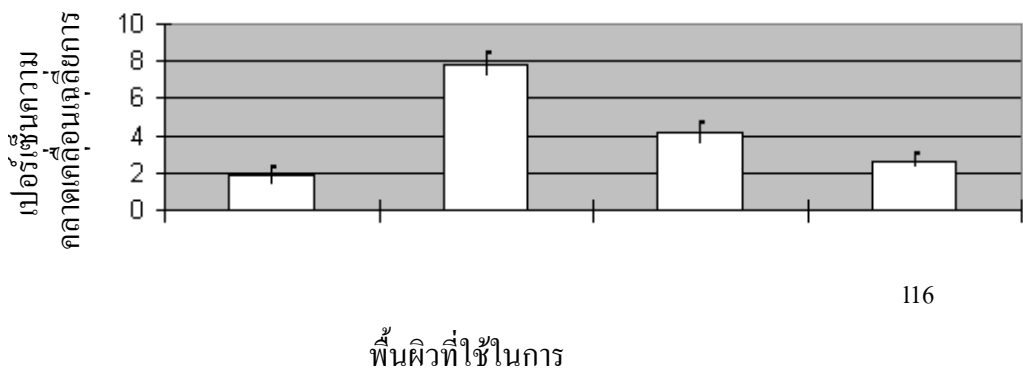
รูปก่อน ทดลอง	พื้นป्लอมเดิม	ลำดับ 4	ลำดับ 8	ลำดับ 16



เมื่อนำผลการทดลองขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันระหว่างฟีนปปลอมเดิมกับกลุ่มฟีนปปลอมตัวอย่าง (9 ซี่) ที่ได้จากการขยายพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกในระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ 4, 8, และ 16 ตามลำดับโดยใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้เคียงที่สุด เพื่อนำมาสร้างกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยการหมุนและการเคลื่อนที่ โดยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนคำนวณจากค่าที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าตั้งต้นที่กำหนด กราฟแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนการหมุน



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนการเคลื่อนที่

จากการทดสอบปรากฏว่าการซ้อนทับกันระหว่างฟีนปปลอมเดิมกับฟีนปปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 4 ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุดแต่ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งการหมุนและการเคลื่อนที่เฉลี่ยมีค่า

สูงที่สุด สำหรับการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมเดิมกับฟันปลอมกับฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 16 ใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุดและมากกว่าการซ้อนทับด้วยฟันปลอมเดิมอยู่มาก แต่ค่าคลาดเคลื่อน โดยเฉลี่ยแล้วน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับลำดับอื่น ๆ สำหรับการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมเดิมกับฟันปลอมกับฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 8 ใช้เวลาได้น้อยกว่าการซ้อนทับด้วยฟันปลอมเดิมอยู่มาก และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งจากการทดลองการซ้อนทับกันด้วยฟันปลอมที่ถูกขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 8 เป็นฟันปลอมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้และจะนำไปใช้ทดสอบในขั้นต่อไป

2) ทดสอบการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมที่ได้จากการขยายพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 8 กับข้อมูลฟันข้างเคียงของโครงสร้างฟันผู้ป่วยด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด โดยอ้างอิงจากความโค้งที่สอดคล้องกันกับการกำหนดช่วงของจุดบนพื้นผิวฟันปลอมที่ได้จากการขยายทรงกลมด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิก สำหรับการทดลองจะทำการเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างทดสอบค่าแปรผันสำหรับผู้สังเกต 1 ราย (Intra observer variability) กับทดสอบค่าแปรผันระหว่างกลุ่มผู้สังเกต (Inter observer variability) เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยการใช้ขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมที่ได้จากการขยายพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกกับข้อมูลฟันข้างเคียงของโครงสร้างฟันผู้ป่วยด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด โดยอ้างอิงจากความโค้งที่สอดคล้องกัน รายละเอียดการทดลองเป็นดังนี้

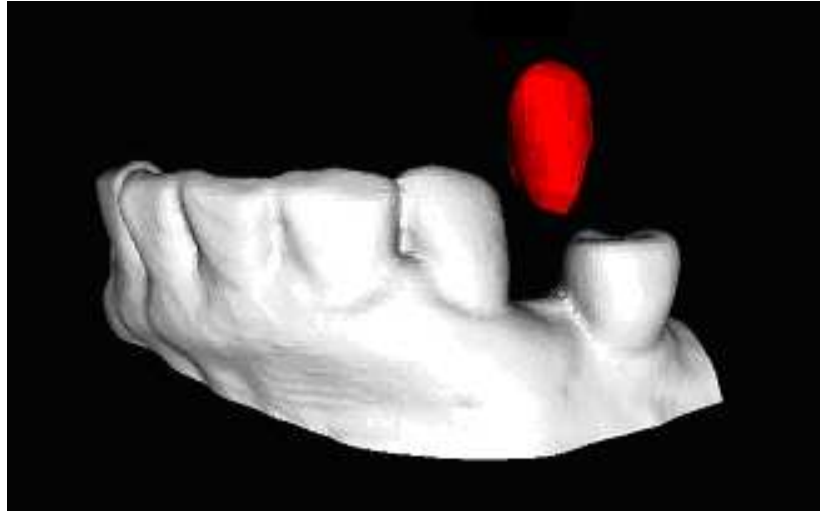
กำหนดให้ตำแหน่งฟันปลอมกับตำแหน่งของฟันผู้ป่วยอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน  
ทุกการทดลองดังรูปที่ 4.37

1. ทดสอบค่าแปรผันสำหรับผู้สังเกต 1 ราย (Intra observer variability)

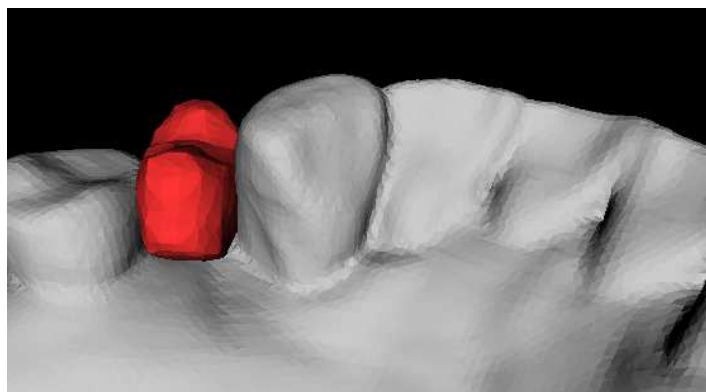
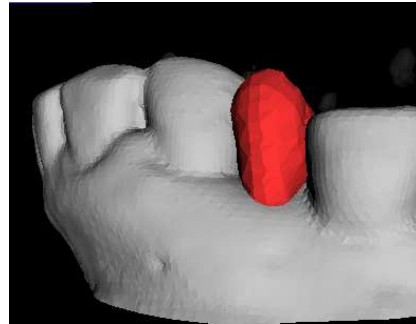
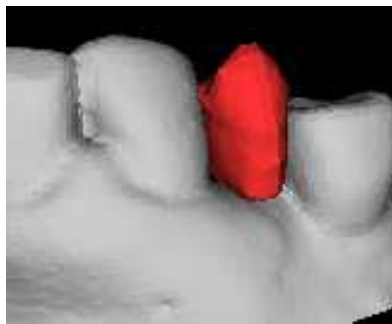
ให้ผู้ทดสอบ 1 รายทดลองโดยการปรับตำแหน่งของฟันปลอม แล้วบันทึกผลการปรับตำแหน่ง ทำการทดลองเช่นนี้ทั้งหมด 5 ครั้ง

2. ทดสอบค่าแปรผันระหว่างผู้สังเกต (Inter observer variability)

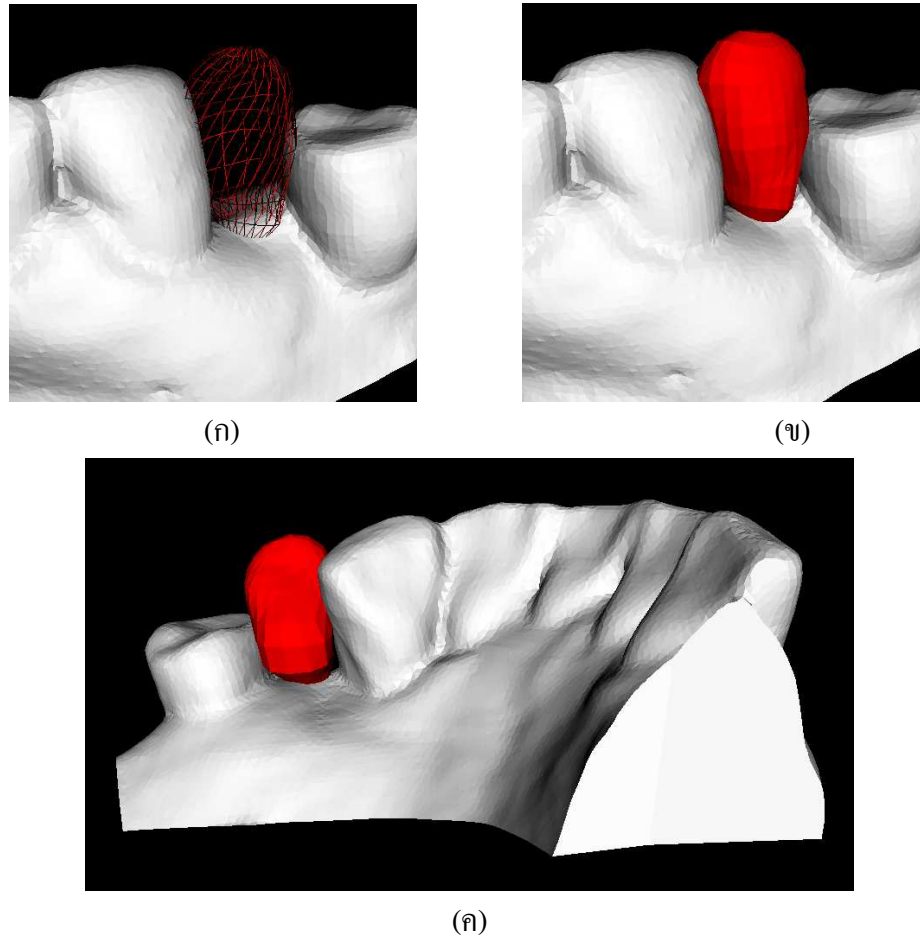
ให้ผู้ทดสอบ 5 รายทดลองโดยการปรับตำแหน่งของฟันปลอม แล้วบันทึกผลการปรับตำแหน่ง ทำการทดลองคนละครั้ง ผลการทดลองทั้งหมดเป็นดังนี้



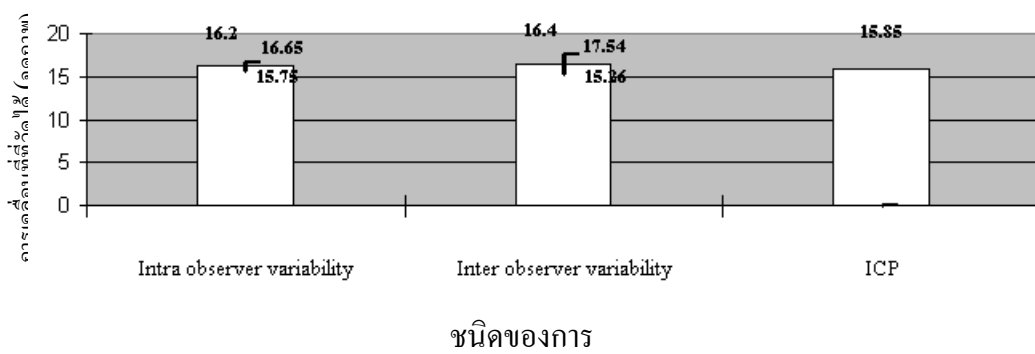
รูปที่ 4.36 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นก่อนการทดลอง



รูปที่ 4.37 แสดงผลการทดสอบด้วยผู้สังเกต 1 ราย



รูปที่ 4.38 แสดงผลการทดลองกับขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกัน



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมกับฟันข้างเคียง

ทับกันระหว่างฟันปลอมกับฟันข้างเคียง

สำหรับการทดลองจากข้อมูลฟันปลอมซึ่งเดียวกันและตำแหน่งเดียวกันดังรูปที่ 4.36 โดยผลการทดลองสำหรับทดสอบค่าแปรผันสำหรับผู้สังเกต 1 ราย (5 ครั้ง) ได้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ตามแกน x เท่ากับ 16.2 และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.44 ส่วนผลการทดลองสำหรับทดสอบค่าแปรผันระหว่างกลุ่มผู้สังเกต ได้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ตามแกน x เท่ากับ 16.4 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.14 ดังตัวอย่างผลการทดสอบดังรูป 4.37 (ก) – (ค) สำหรับค่าที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมกับฟันข้างเคียงคำนวณค่าการเคลื่อนที่ตามแกน x เท่ากับ 15.85 ดังรูปผลการทดลองในรูปที่ 4.38 (ก) – (ค) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวยังอยู่ในช่วงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดจากการทดสอบด้วยสำหรับผู้สังเกต 1 ราย และระหว่างกลุ่มผู้สังเกต โดยรายละเอียดข้อสรุปทั้งหมดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.5 การอภิปรายผล

ในบทนี้ได้ทำการสร้างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในงานทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan) โดยมีโมดูลหลัก ๆ คือ การกำหนดตำแหน่งการแสดงของฟันปลอมในสามมิติ การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอม การเก็บข้อมูลฟันปลอม และการลบข้อมูลฟันปลอม ซึ่งขั้นตอนนี้จะแสดงถึงความยุ่งยากในการใส่ฟันปลอมให้เข้ากับฟันข้างเคียง สำหรับขั้นตอนที่น่าเสนอเพื่อลดความยุ่งยากตรงนั้นลงไปคือการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมที่ได้จากการขยายพื้นผิวด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกกับข้อมูลฟันข้างเคียงของโครงสร้างฟันผู้ป่วยด้วยวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดที่ใกล้กันที่สุด เริ่มต้นจากการแยกองค์ประกอบภาพโดยเปรียบเทียบผลเพื่อเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างภาพสามมิติ ซึ่งผลก็คือวิธีการขยายพื้นที่ (Region growing) สำหรับการสร้างภาพสามมิติได้เลือกขั้นตอนวิธีการต่อกันของลูกบาศก์ (Marching Cubes) ขั้นตอนถัดมาเป็นการนำพื้นที่ได้ไปปรับพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว แล้วขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Spherical Harmonic Expansion) ในแต่ละลำดับ (order) ผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้คือพื้นผิวฟันปลอมในสามมิติที่มีลักษณะคล้ายกับพื้นผิวเดิม และสามารถควบคุมจุดของพื้นผิวได้ในแต่ละช่วงของมุมต่าง ๆ ขั้นตอนสุดท้ายคือการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวฟันปลอม ที่ได้จากการขยายด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกในแต่ละลำดับกับฟันปลอมเดิมเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำการซ้อนทับกัน ปรากฏว่าได้ฟันปลอมที่ได้จากการขยายด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกในลำดับ 8 เหมาะสมที่สุด

ในการทำการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมกับฟันข้างเคียงของโครงสร้างฟันผู้ป่วย โดยผลการทดลองจะถูกเปรียบเทียบกับผู้สังเกต 1 รายและระหว่างกลุ่มผู้สังเกต ในการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมเป็นส่วนหนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนการผ่าตัดเพื่อใช้ในการทันตกรรมรากฟันเทียม (DentiPlan) ซึ่งปรากฏว่าค่าที่คำนวณได้ยังอยู่ในช่วงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองด้วยผู้สังเกต 1 รายและระหว่างกลุ่มผู้สังเกต

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ระบบคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งที่หลากหลายสาขาอาชีพได้นำไปเป็นส่วนหนึ่งในความสะดวกต่องานที่เกี่ยวข้อง ทางการแพทย์ก็เช่นกันมีการนำระบบคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานทางด้าน การแพทย์ โดยเฉพาะงานทางด้านทันตกรรมรากฟันเทียมที่มีความนิยมในการนำระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์หรือวางแผนในงานทันตกรรมรากฟันเทียม ซึ่งต้องอาศัยการแสดงผลภาพในรูปแบบสามมิติ เพื่อช่วยให้มีความสะดวกแก่ผู้ใช้และได้เห็นภาพที่เสมือนจริง การใส่ฟันปลอมก็เป็นส่วนหนึ่งของงานทันตกรรมรากฟันเทียม โดยระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมจะช่วยวิเคราะห์และออกแบบฟันปลอมที่เหมาะสมกับผู้ป่วยเพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างฟันปลอมที่แท้จริง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือ เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคการประมวลผลภาพทางการแพทย์ในงานทันตกรรมรากฟันเทียมสำหรับการใส่ฟันปลอม

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแบ่ง 3 ส่วน โดยส่วนแรกคือระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม ซึ่งมีไว้ทดสอบเปรียบเทียบและอธิบายถึงที่มาของปัญหา ส่วนที่สองคือการสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT โดยเริ่มจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยวิธีต่าง ๆ แล้วเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างภาพสามมิติ และส่วนที่สามคือขั้นตอนการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวโดยใช้การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและความโค้งที่สัมพันธ์กัน เพื่อช่วยลดขั้นตอนในการใส่ปลอมในระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 สรุปผลการสร้างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม

ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมประกอบด้วยโมดูลอยู่ 4 โมดูล ได้แก่ การกำหนดตำแหน่งการแสดงผลของฟันปลอมในสามมิติ, การปรับเปลี่ยนรูปร่างของฟันปลอม, การเก็บข้อมูลฟันปลอม และ การลบข้อมูลฟันปลอม ซึ่งระบบทำงานได้จริงตามลำดับแผนภาพ (Sequence Diagram) ในแต่ละโมดูลการทำงาน แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในการปรับเปลี่ยนฟันปลอมเพื่อให้สอดคล้องกับฟันข้างเคียงของผู้ป่วย นั่นคือผู้ใช้ (User) ต้องมีความชำนาญในการใช้ระบบเป็น

อย่างสูง อีกทั้งยังเกิดความซับซ้อนในการปรับเปลี่ยนรูปร่างฟันปลอมซึ่งนำไปสู่ความยุ่งยากในการใช้งาน จึงเป็นที่มาในการใส่ฟันปลอมด้วยวิธีซ้อนทับกันระหว่างฟันผิวโดยใช้การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกและความโค้งที่สัมพันธ์กัน เพื่อช่วยลดขั้นตอนในการใส่ปลอมในระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอม

### 5.1.2 สรุปผลการสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT

สำหรับขั้นตอนการสร้างพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมจากภาพสแกน CT เริ่มจากการแยกองค์ประกอบภาพด้วยวิธีต่าง ๆ โดยวิธีที่เหมาะสมที่สุดในกรณีการนำไปสร้างพื้นผิวในสามมิติคือการขยายพื้นที่ (Region Growing) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถกำหนดช่วงของความเข้มในการขยายพื้นที่ได้ สำหรับวิธีการแยกองค์ประกอบภาพด้วยรูปร่างผสมของเกาส์ผลการทดลองปรากฏว่ารูปสามมิติที่ได้ยังมีองค์ประกอบที่เป็นดินน้ำมันปนอยู่เล็กน้อยเนื่องจากการประมาณค่าด้วยการเลือกจุดต่ำสุดของแต่ละองค์ประกอบโดยฟังก์ชันเกาส์นั้นยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง จึงทำให้ภาพสามมิติของฟันปลอมยังคงมีองค์ประกอบของดินน้ำมันติดอยู่ ส่วนการเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับจุดภาพ พบว่าดินน้ำมันบางส่วนหายไปเหลือเพียงเล็กน้อยแต่รูปทรงของฟันปลอมยังคงสูญเสียรูปทรงไปมากเช่นกัน เนื่องจากวิธีนี้ใช้ความน่าจะเป็นโดยพิจารณาจากจุดรอบข้าง โดยจุดที่มีปัญหาคือจุดที่อยู่ระหว่างฟันปลอม และดินน้ำมัน ดังนั้นสำหรับการสร้างพื้นผิวสามมิติด้วยวิธีการต่อกันของลูกบาศก์ (Marching Cubes) จึงเลือกวิธีการขยายพื้นที่ในการแยกองค์ประกอบภาพ

### 5.1.3 สรุปผลการขั้นตอนการใส่ฟันปลอมด้วยการซ้อนทับกันระหว่างฟันผิว

ขั้นตอนการใส่ฟันปลอมด้วยการซ้อนทับกันระหว่างฟันผิว เริ่มจากนำฟันปลอมในสามมิติมาปรับพื้นผิวสามมิติของฟันปลอมลงบนทรงกลมหนึ่งหน่วยด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว แล้วขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก (Spherical Harmonic Expansion) ในแต่ละลำดับ (order) แล้วนำฟันปลอมที่ได้จากขั้นตอนนี้ไปเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดเพื่อนำไปทดสอบการซ้อนทับกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ปรากฏว่าการขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 8 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการทดสอบด้วยฟันปลอมเดิมอยู่มากและมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ขั้นตอนสุดท้ายเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างขั้นตอนวิธีการซ้อนทับกันระหว่างฟันปลอมที่ได้การขยายด้วยค่าจริงของฟังก์ชันทรงกลมแบบฮาร์โมนิกในลำดับที่ 8 และมีความโค้งที่สัมพันธ์กัน กับการทดสอบระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการใส่ฟันปลอมด้วยผู้สังเกต 1 รายกับระหว่างกลุ่มผู้สังเกต ปรากฏว่าขั้นตอนการใส่ฟันปลอมด้วยการซ้อนทับกันระหว่างฟันผิวมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่วัดได้จากผู้สังเกต 1 รายและระหว่างกลุ่มผู้สังเกต ซึ่งหมายความว่าวิธีดังกล่าวจะช่วยลดขั้นตอนในการใส่ฟันปลอมได้อยู่ในระดับที่ดีและยอมรับได้



## 5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยสำหรับช่วยในงานทันตกรรมฝังรากฟันเทียมสำหรับการใส่ฟันปลอม ดังนั้นจึงข้อจำกัดดังนี้

- 1) ต้องกำหนดจุดของฟันปลอมที่จะทำการซ้อนทับให้ใกล้กับร่องฟันของผู้ป่วยมากที่สุด
- 2) การคำนวณในการซ้อนทับกันยังคงมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ ซึ่งหมายความว่าในขั้นตอนถัดไปจึงต้องมีการปรับรูปร่างฟันปลอมด้วยมือ

## 5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

สำหรับขั้นตอนในการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิวฟันปลอมกับโครงสร้างฟันข้างเคียงของผู้ป่วยนั้น ได้ใช้ขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ วิธีการเปลี่ยนตัวแปรของพื้นผิว การขยายทรงกลมด้วยฟังก์ชันค่าจริงทรงกลมแบบฮาร์โมนิก การทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กัน และการหาความโค้งที่สัมพันธ์กัน โดยแนวทางวิจัยที่จะพัฒนาต่อไปได้ก็คือ

- 1) ขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดนั้นยังใช้เวลาในการคำนวณอยู่มาก ยังมีขั้นตอนวิธีการทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันที่สุดวิธีอื่นที่เร็วกว่านี้ เช่น การทำซ้ำเพื่อหาจุดใกล้กันแบบเร็ว (Fast Iterative Closest Points) เป็นต้น
- 2) สามารถนำขั้นตอนการซ้อนทับกันประยุกต์ใช้กับงานศัลยกรรมต่างๆ

## รายการอ้างอิง

- Sarah F. F. Gibson and Brian Mirtich. (1997). **A survey of deformable modeling in computer graphics**. Mitsubishi Electric Research Lab, Cambridge.
- Thomas W. Sederberg. (1986). **Computer graphics method for changing the shape of a geometric model using free-form deformation**. United States Patent, Orem Utah.
- Cochrane T. (1989). **Medical electronics and physiological measurement**. Physics Education, vol. 24, no. 4, pp. 201-206.
- Klaus Steinbach, James Kuffner, Tamim Asfour and Ruediger Dillmann. (2006). **Efficient collision and self-collision detection for humanoids based on sphere tree hierarchies**. Humanoid Robots, 6th IEEE-RAS International Conference.
- José Gilvan Rodrigues Maia, Creto Augusto Vidal and Joaquim Bento Cavalcante-Neto. (2006). **Transformation semantics: An efficient approach for collision detection**. Computer Graphics and Image Processing, pp. 94-104.
- Kouki Taniyama. (2000). **Higher dimensional links in a simplicial complex embedded in a sphere**. Pacific Journal of Mathematics, vol. 194, no 2.
- Dennis Maier, Jürgen Hesser and Reinhard Männer. (2003). **Fast and accurate closest point search on triangulated surfaces and its application to head motion estimation**. citeseer 2003.
- Clarkson, K. (1988). **A randomized algorithm for closest-point queries**. SIAM\_JC(17), pp. 830-847.
- Kapoutsis, C.A., Vavoulidis, C.P. and Pitas, I. (1999). **Morphological iterative closest point algorithm**. IP(8), No. 11, pp. 1644-1646.
- M. A. Audette, F. P. Ferrie and T. M. Peters. (2000). **An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging**. Medical Image Analysis, vol. 4, no. 3, pp. 201-217.
- Gregory C., Lee, Sang W., Wehe and David K. (2002). **ICP registration using invariant features**. PAMI(24), No. 1, pp. 90-102.

- Wong NY, Huffer-Charchut H and Sarment DP. (2007). **Computer-aided design/computer-aided manufacturing surgical guidance for placement of dental implants**. *Implant Dent*, pp.123-130.
- W. E. Lorensen and H. E. Cline. (1987). **Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm**. *Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp 163-169.
- R. Adams and L. Bischof. (1994). **Seeded region growing**. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 6, pp. 641-647.
- J. Kittler and J. Illingworth. (1986). **Relaxation labelling algorithms-a review**. *Image and Vision Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 206-216.
- M. Hansen. (1993). **Interactive relaxation labeling for image segmentation**. Master's thesis, The Pennsylvania State University.
- T. Kanai, H. Suzuki, and F. Kimura. (1997). **3D geometric metamorphosis based on harmonic map**. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pp. 97-104.
- S. Haker, S. Angenent, A. Tannenbaum, R. Kikinis, G. Sapiro, and M. Halle. (2000). **Conformal surface parameterization for texture mapping**. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. vol. 6, no. 2, pp. 181-189.
- Xianfeng Gu, Yalin Wang, Tony F. Chan, Paul M. Thompson, and Shing-Tung Yau. (2004). **Genus zero surface conformal mapping and its application to brain surface mapping**. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 23, no. 8.
- Ch. Brechbuhler\_ G. Gerig and O. Kubler. (1996). **Parametrization of closed surfaces for 3D shape description**. Swiss Federal Institute of Technology (ETH).
- Eberhard M. and Vesna V. (2001). **On the Gaussian and Mean curvature of certain surfaces**. *Novi Sad J. Math*, vol. 31, No.1, 2001, pp.65-73.
- Sittichai Pomthong, Parmate Horkaew and Saowapak Sotthivirat. (2008)..**Multi-resolution ICP using real-valued spherical harmonic expansion and its application in computer-aided dental implants**. *The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering* pp. 360-365.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1) Sittichai Pomthong, Parmate Horkaew and Saowapak Sotthivirat. 2007. **Consistent Surface Parameterization for Tooth Modeling and Dental**. WACBE World Congress on Bioengineering 2007 Bangkok, THAILAND.

2) Sittichai Pomthong, Parmate Horkaew and Saowapak Sotthivirat. 2008. **Multi-resolution ICP using real-valued spherical harmonic expansion and its application in computer-aided dental implants**. The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering

## ประวัติผู้เขียน

นายสิทธิชัย ป้อมทอง เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 ที่ อ.เมือง จ.กาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนถาวรวิทยา สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนวิสุทธิรังษี จ. กาญจนบุรี และเข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2545 ที่สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2548 มีความถนัดในด้านการคำนวณ และการเขียน โปรแกรมเป็นอย่างยิ่ง ในขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้รับโอกาสเป็นผู้สอนพิเศษในหอพักนักศึกษาในวิชาแคลคูลัส ระหว่างปีการศึกษา 2546-2548 ในความชื่นชอบคณิตศาสตร์อยู่แล้วจึงเกิดแรงบันดาลใจให้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโทด้านการประมวลผลภาพ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549 ซึ่งได้รับเงินทุนสนับสนุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในหัวข้อวิจัยคือ ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองงานทันตกรรมฝังรากฟันเทียม ระหว่างศึกษาได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากคณาจารย์ในสาขา โดยได้รับวางใจให้เป็นผู้ช่วยสอนในวิชาการ โปรแกรมโดยยึดเหตุการณ์