

การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์  
โดยใช้การแปลงระยะทาง

SPEED-UP VOLUME RENDERING IN MEDICAL IMAGE  
BY USING DISTANCE TRANSFORM



วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร  
WORATHEP FAIBOONRATTANAKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-152-5

การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์  
โดยใช้การแปลงระยะทาง

SPEED-UP VOLUME RENDERING IN MEDICAL IMAGE  
BY USING DISTANCE TRANSFORM



วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร  
WORATHEP PAIBOONRATTANAKORN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 39634  
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ย. 2544

.b.....  
.i.....

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลข้างต้นลงสู่ระบบคอมพิวเตอร์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พศ. 2544

ISBN 974-648-152-5

SPEED-UP VOLUME RENDERING IN MEDICAL IMAGE  
BY USING DISTANCE TRANSFORM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 2001 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-648-152-5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

COPYRIGHT 2001

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้






SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์โดยใช้การแปลงระยะทาง  
SPEED-UP VOLUME RENDERING IN MEDICAL IMAGE BY USING DISTANCE TRANSFORM

ชื่อนักศึกษา นายวรเทพ ไพบุญรัตน์นการ  
รหัสประจำตัว 41061049  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มนัส ตั้งวรศิลป์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.กิติพล ชิตสกุล	
ดร.ยุทธนา คิดใจเดียว	
ผศ.ประภากร สุวรรณะ	
ผศ.ดร.สุรพันธุ์ เอื้อไพบูรณ์	
รศ.ดร.มนัส ตั้งวรศิลป์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 11 เมษายน 2544 เวลา 11.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง วันที่...17...เดือน...พฤษภาคม...พ.ศ. 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ โดยใช้การแปลงระยะทาง
นักศึกษา	นาย วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร
รหัสประจำตัว	41061049
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์

### บทคัดย่อ

การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ช่วยให้สามารถแสดงโครงสร้างอวัยวะที่เกี่ยวข้อง  
เนื้องอกกันได้ดี แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ก็คือการสร้างภาพในแต่ละมุมมองต้องใช้เวลาในการสร้างภาพ  
นานมาก ขั้นตอนหนึ่งที่มีผลทำให้เวลาในการสร้างภาพสูญเสียไปมากคือ การฉายแสงและรวม  
องค์ประกอบภาพผ่านบริเวณที่เป็นฉากหลังของภาพซึ่งปกติกำหนดให้เป็นวัตถุโปร่งใสโดย  
สมบูรณ์ เนื่องจากตามหลักการสร้างภาพแล้ววัตถุที่โปร่งใสโดยสมบูรณ์เมื่อถูกนำมาประกอบเข้า  
ไปในภาพจะไม่มีผลใดๆ กับคุณภาพของภาพที่สร้างขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพ  
ในแต่ละมุมมองสามารถทำได้โดยใช้การแปลงระยะทางสามมิติมาทำการสร้างปริมาตรระยะทาง  
ของฉากหลังกับวัตถุกึ่งโปร่งใสภายในภาพเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับให้แสงกระโดดข้ามบริเวณที่  
เป็นฉากหลังดังกล่าว ทำให้แสงเข้าถึงบริเวณที่เป็นวัตถุกึ่งโปร่งใสได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Speed-up Volume Rendering in Medical Image by Using Distance Transform
Student	Mr. Worathep Paiboonrattanakorn
Student ID.	41061049
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Manas Sangworasilp

### ABSTRACT

Volume rendering in medical image is used for displaying related structures of the human organs. However, this reconstruction method requires the long computation time for calculating an image in each view. One of such fruitless computation is ray casting and composition of the image in which the rays are in the background of the image completely transparent. In fact, the completely transparent object does not contribute to the quality of the resultant image whether it is included into a composition process or not. Therefore, to speed up the process, it is unnecessary to render the 3D image when rays pass through such an object. This technique proposed in this thesis applies the 3D distance transform to form the distance volume, the distance between the completely transparent background and the semitransparent object. Rays use this distance volume to skip the unnecessary steps within the background region. By using this method the rays can access the semitransparent object faster than the traditional method.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ผู้ซึ่งคอยให้การเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและโอกาสในการศึกษาเล่าเรียนตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ซึ่งคอยให้คำปรึกษา ความรู้ ความเข้าใจและโอกาสในหลายๆ ด้าน ตลอดระยะเวลาในการศึกษา รวมถึงการเอื้อเฟื้อสนับสนุนเครื่องมือเครื่องใช้และสถานที่ในการทำวิจัยอย่างพร้อมเพรียง ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาของท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. กิติพล ชิตสกุล ผศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์ และ ดร.ยุทธนา คิดใจเดียว ที่ให้คำแนะนำและแนวคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.นายแพทย์ ราเมศร์ วัชรสินธุ์ และ แพทย์หญิง จิรพร เหล่าธรรมทัศน์ จากภาควิชารังสีเทคนิค โรงพยาบาลรามาริบัติ ที่เอื้อเฟื้อชุดข้อมูลภาพซึ่งใช้ในการทำวิจัย และให้คำปรึกษาต่างๆ เกี่ยวกับแนวทางในการสร้างภาพทางการแพทย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

ขอขอบคุณ คุณสุพจน์ จันทรวีวัฒน์ ที่ช่วยสานแนวความคิดงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จออกมาได้

ขอขอบคุณ คุณพงศธร หมายดี คุณศิริชัย ปรีดิโตทกพร คุณสมศักดิ์ เขมวิวิธ คุณประพัศ ชุ่มชัยรัตน์ คุณประเสริฐ อัครรุ่งสกุล และ คุณพีระ เลี้ยวประเสริฐพร ที่ให้ความคิดและมุมมองต่างๆ ซึ่งช่วยในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณวิไลลักษณ์ โภคะกุล ที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือในการจัดเตรียมต้นฉบับวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณสกลธร กาญจนพิศาล ที่เอื้อเฟื้อเงินทุนสนับสนุนการในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้เงินทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัยและโครงสร้างของวิทยานิพนธ์ .....	2
บทที่ 2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวและการสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	4
2.1 บทนำ .....	4
2.2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิว .....	4
2.2.1 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยการฉายภาพตามทิศทางการมอง .....	4
2.2.1.1 การคำนวณค่าเวคเตอร์ปกติจากค่าเกรเดียนต์ระดับเทา .....	5
2.2.1.2 การคำนวณค่าเวคเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่า ของพิกัดรอบข้าง .....	6
2.2.2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีมาร์ชชิงคิวบ์ (Marching Cubes Algorithm) .....	7
2.2.3 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวจากคอนทัวร์สามระนาบ .....	9
2.3 การสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	11
2.4 สรุป .....	12
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการสร้างภาพสามมิติเบื้องต้น .....	13

เอกสารนี้เป็น 3.1 บทนำ ..... 13  
ไม่ว่ากรณีใดๆ 3.2 ข้อสรุปประกอบขึ้นพื้นฐานของข้อมูลเชิงปริมาตร ..... 13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ระบบพิกัด (Coordinate System) .....	14
3.4 การแปลงเรขาคณิตของข้อมูลภาพ .....	14
3.4.1 การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (Translation) .....	16
3.4.2 การหมุนวัตถุ (Rotation) .....	17
3.4.3 การสเกล (Scaling) .....	18
3.5 การฉายแสง (Ray Casting) .....	18
3.6 การส่องสว่างและการให้แสงเงา (Illumination and Shading) .....	20
3.6.1 เกรเดียนต์ (The Gradient) .....	20
3.6.1.1 ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ (The Central Difference Gradient Estimator) .....	21
3.6.1.2 เกรเดียนต์กับการสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	22
3.6.2 การให้แสงเงาแบบ Gouraud และ Phong (Gouraud And Phong Shading) .....	22
3.6.3 แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong (The Phong Illumination Model) .....	23
3.6.3.1 แสงแวดล้อม (Ambient Light) .....	23
3.6.3.2 การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse Reflection) .....	23
3.6.3.3 การสะท้อนแสงแบบกระจก (Specular Reflection) .....	25
3.6.4 ความแตกต่างของแบบจำลองการให้แสงเงาแบบ Gouraud และ Phong .....	26
3.6.5 การให้แสงเงากับการสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	28
3.7 สรุป .....	29
บทที่ 4 การประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับการสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	30
4.1 บทนำ .....	30
4.2 การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Classification) .....	30
4.2.1 ฮิสโทแกรม (Histogram) .....	31
4.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) .....	31

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การอินเทอร์โพลเลท (Interpolation) .....	34
4.3.1 การอินเทอร์โพลเลทแบบเน็ยเรสเนบอร์ (Nearest Neighbor) .....	35
4.3.2 การอินเทอร์โพลเลทแบบลิเนียร์ (Linear Interpolation) .....	36
4.3.3 การอินเทอร์โพลเลทแบบคิวบิคคอนโวลูชัน (Cubic Convolution Interpolation) .....	38
4.4 การรวมองค์ประกอบภาพ (Image Composition) .....	40
4.4.1 สมการการสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	40
4.4.2 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง (Front To Back Composition) .....	42
4.4.3 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้า (Back To Front Composition) .....	44
4.4.4 ค่าความโปร่งแสงและค่าความทึบแสง .....	45
4.5 สรุป .....	46
บทที่ 5 การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	47
5.1 บทนำ .....	47
5.2 การวัดระยะทาง (Distance Measurement) .....	47
5.2.1 ระยะทางแบบยูคลิเดียน (Euclidean Distance) .....	47
5.2.2 ระยะทางแบบซิติบล็อก (City Block Distance) .....	48
5.2.3 ระยะทางแบบเชสบอร์ด (Chessboard Distance) .....	49
5.2.4 ระยะทางแบบแชมเฟอร์ (Chamfer Distance) .....	49
5.3 การแปลงระยะทาง (Distance Transform) .....	50
5.4 การแปลงระยะทางสองมิติ .....	50
5.4.1 การแปลงระยะทางยูคลิเดียนสองมิติ .....	50
5.4.1.1 การแปลงครั้งที่ 1 .....	50
5.4.1.2 การแปลงครั้งที่ 2 .....	50
5.4.2 การแปลงระยะทางแชมเฟอร์สองมิติ .....	51
5.5 การแปลงระยะทางสามมิติ (3D Distance Transform) .....	53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5.1 การแปลงระยะทางยูคลิเดียนสามมิติ .....	53
5.5.1.1 การแปลงครั้งที่ 1 .....	53
5.5.1.2 การแปลงครั้งที่ 2 .....	53
5.5.1.3 การแปลงครั้งที่ 3 .....	53
5.5.2 การแปลงระยะทางแฮมเฟอ์สามมิติ .....	54
5.6 การใช้การแปลงระยะทางในการสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	54
5.7 สรุป .....	57
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง .....	58
6.1 บทนำ .....	58
6.2 การขยายปริมาตรตามแนวแกนสไลซ์ .....	58
6.3 การอินเทอร์โพลเลทข้อมูลตามแนวลำแสง .....	60
6.4 การสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้ข้อมูลจากการแปลงระยะทางแบบต่างๆ .....	65
บทที่ 7 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา .....	73
7.1 สรุปผลการทดลอง .....	73
7.2 แนวทางการพัฒนา .....	74
เอกสารอ้างอิง .....	75
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	77
ประวัติผู้เขียน .....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การสแกนชุดข้อมูลจากทิศทางการมอง .....	4
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ปกติและเวกเตอร์แหล่งกำเนิดแสง .....	5
2.3 จุดต่างๆ บนสไลซ์ซึ่งใช้สำหรับคำนวณค่าเกรเดียนต์ของระดับเทา .....	6
2.4 ภาพเชิงพื้นผิวซึ่งสร้างจากการใช้เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่าเกรเดียนต์ระดับเทา .....	6
2.5 การคำนวณหาเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวจากพิกัดรอบข้าง .....	6
2.6 ภาพเชิงพื้นผิวซึ่งสร้างจากการใช้เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่าของพิกัดรอบข้าง .....	7
2.7 ลูกบาศก์สมมติที่สร้างขึ้นจากข้อมูล 8 จุดของสไลซ์ที่อยู่ติดกัน .....	8
2.8 รูปแบบการจัดเรียงสามเหลี่ยมที่เป็นไปได้ภายในลูกบาศก์สมมติ .....	8
2.9 การเรียงลำดับมุมและขอบของลูกบาศก์สมมติ .....	9
2.10 ภาพเชิงพื้นผิวที่สร้างจากอัลกอริธึมมาร์ชชิงคิวบ์ .....	9
2.11 ก) ระนาบของคอนทัวร์ที่นำมาสร้างภาพ ข) การประกอบคอนทัวร์ .....	10
2.12 ภาพเชิงพื้นผิวที่สร้างจากคอนทัวร์สามระนาบ .....	10
2.13 ขั้นตอนการสร้างภาพเชิงปริมาตร .....	11
2.14 ภาพเชิงปริมาตร .....	12
3.1 ความแตกต่างระหว่างพิกเซลและว็อกเซล (ก) พิกเซล (ข) ว็อกเซล .....	14
3.2 ระบบพิกัด (ก) ระบบมือขวา (ข) ระบบมือซ้าย .....	14
3.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส .....	16
3.4 การย้ายตำแหน่งชุดข้อมูลไปที่จุดกำเนิด .....	17
3.5 การแปลงแบบหมุนรอบแกนต่างๆ .....	18
3.6 การฉายแสงเข้าไปภายในปริมาตร .....	19
3.7 ลักษณะของแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตร .....	19
3.8 องค์ประกอบการสะท้อนแสงแบบกระจาย .....	24
3.9 องค์ประกอบการสะท้อนแสงแบบกระจก .....	26
3.10 เวกเตอร์ปกติที่แต่ละมุมของโพลิกอน .....	26
3.11 (ก) การให้แสงเงาแบบ Gouraud (ข) การให้แสงเงาแบบ Phong .....	27
3.12 การให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตร (ก) การให้แสงเงาแบบ Phong .....	28
(ข) การให้แสงเงาแบบ Gouraud .....	28

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ฮีสโทแกรม .....	31
4.2 ตัวอย่างฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลสำหรับวัตถุเนื้อเดียว .....	32
4.3 ลักษณะโดยทั่วไปและการแบ่งแยกกลุ่มของว็อกเซลในชุดข้อมูล CT .....	33
4.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง .....	33
4.5 การอินเทอร์โพลแบบสามมิติ .....	35
4.6 (ก) เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลแบบเนียร์เนสเนบอร์ (ข) ลักษณะของการอินเทอร์โพลด้วยวิธีเนียร์เนสเนบอร์ .....	35
4.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการขยายภาพโดยใช้เนียร์เนสเนบอร์ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพที่ได้จากการขยาย 2 เท่า (ค) ภาพที่ได้จากการขยาย 5 เท่า .....	36
4.8 การกำหนดความสัมพันธ์ของจุดแซมเปิลในการอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์ .....	36
4.9 (ก) เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์ (ข) ลักษณะของการอินเทอร์โพล .....	37
4.10 ขั้นตอนการอินเทอร์โพลแบบไบลิเนียร์ .....	37
4.11 ผลลัพธ์ที่ได้จากการขยายภาพโดยใช้การอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพที่ได้จากการขยาย 2 เท่า (ค) ภาพที่ได้จากการขยาย 5 เท่า .....	38
4.12 เคอร์เนลการอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชัน .....	38
4.13 การอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชันที่จุด d .....	39
4.14 ผลลัพธ์ที่ได้จากการขยายภาพโดยใช้การอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชัน (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพที่ได้จากการขยาย 2 เท่า (ค) ภาพที่ได้จากการขยาย 5 เท่า .....	40
4.15 แสงที่พุ่งเข้าไปในปริมาตร .....	41
4.16 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง .....	42
4.17 ลักษณะของแสงซึ่งพุ่งทะลุผ่านพื้นผิวออกมา .....	43
4.18 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้า .....	45
5.1 ดิสก์ของระยะทางยูคลิเดียน .....	48
5.2 ดิสก์ของระยะทางแบบชิตีบลิค .....	48
5.3 ดิสก์ของระยะทางแบบเชสบอร์ด .....	49
5.4 ดิสก์ของระยะทางแบบแฮมเฟอริ .....	49
5.5 หน้ากากที่ใช้ในการพิจารณาแต่ละส่วน (ก) หน้ากากที่ใช้สแกนไปข้างหน้า (ข) หน้ากากที่ใช้สแกนย้อนกลับ .....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 หน้ากากสามมิติที่ใช้ในการแปลงไปข้างหน้า .....	54
5.7 ชั้นของระยะทางที่อยู่รอบวัตถุ .....	55
5.8 ดิสก์ของระยะทางแบบต่างๆ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) การแปลงระยะทางยูคลิเดียน (ค) การแปลงระยะทางซิติบลิค (ง) การแปลงระยะทางเซสพอร์ด (จ) การแปลงระยะทางแชมเฟอร์ .....	55
5.9 การเดินทางของแสงภายในปริมาตรระยะทาง .....	56
5.10 ขั้นตอนการสร้างปริมาตรของระยะทาง .....	56
5.11 หลักการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การแปลงระยะทาง .....	57
6.1 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการขยายปริมาตรรวมกับการอินเทอร์โพลเท แบบลิเนียร์ .....	59
6.2 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการขยายปริมาตรรวมกับการอินเทอร์โพลเท แบบคิวบิกคอนโวลูชัน .....	60
6.3 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเทข้อมูลตามแนวแสง แบบลิเนียร์ .....	61
6.4 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเทข้อมูลตามแนวแสง แบบคิวบิกคอนโวลูชัน .....	61
6.5 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเทข้อมูลตามแนวแสง แบบลิเนียร์และคิวบิกคอนโวลูชัน (ก) ชุดข้อมูลศึระะเด็ก (ข) ชุดข้อมูลศึระะผู้ใหญ่ .....	62
6.6 กราฟแสดงวงรอบการทำงานในสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเทข้อมูลตามแนวแสง แบบลิเนียร์และคิวบิกคอนโวลูชัน (ก) ชุดข้อมูลศึระะเด็ก (ข) ชุดข้อมูลศึระะผู้ใหญ่ .....	63
6.7 กราฟความแตกต่างทางวงรอบการทำงานและค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS ของการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเทข้อมูลตามแนวแสงด้วยการอินเทอร์โพลเท แบบลิเนียร์และคิวบิกคอนโวลูชัน (ก) ชุดข้อมูลศึระะเด็ก (ข) ชุดข้อมูลศึระะผู้ใหญ่ .....	64
6.8 กราฟความแตกต่างทางเวลาของการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเทข้อมูลตาม แนวแสงด้วยการอินเทอร์โพลเทแบบลิเนียร์และคิวบิกคอนโวลูชัน .....	65
6.9 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพโดยใช้ระยะทางแบบต่างๆ (ก) ภาพที่สร้างจากวิธีการปกติ (ข) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางยูคลิเดียน	

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ค) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางซีตึบล็อค (ง) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทาง เซลบอร์ต (จ) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางแชมเฟอร์ .....	66
6.10 กราฟแสดงวงรอบในการทำงานของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะเด็กด้วย ระยะทางแบบต่างๆ .....	67
6.11 กราฟแสดงวงรอบการทำงานที่ลดลงของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะเด็กด้วย ระยะทางแบบต่างๆ .....	67
6.12 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะเด็กด้วยระยะทางแบบต่างๆ .....	67
6.13 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะเด็กที่ลดลงเมื่อนำระยะทาง แบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ .....	68
6.14 กราฟแสดงความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS ในการสร้าง ภาพจากชุดข้อมูลศีรษะเด็กเมื่อนำระยะทางแบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ .....	68
6.15 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพโดยใช้ระยะทางแบบต่างๆ (ก) ภาพที่สร้างจากวิธีการปกติ (ข) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางยูคลิเดียน (ค) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางซีตึบล็อค (ง) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะ ทางเซลบอร์ต (จ) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางแชมเฟอร์ .....	69
6.16 กราฟแสดงวงรอบในการทำงานของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่ด้วย ระยะทางแบบต่างๆ .....	70
6.17 กราฟแสดงวงรอบการทำงานที่ลดลงของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่ ด้วยระยะทางแบบต่างๆ .....	70
6.18 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่ด้วยระยะทางแบบต่างๆ .....	70
6.19 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่ที่ลดลงเมื่อนำระยะทาง แบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ .....	71
6.20 กราฟแสดงความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS ในการสร้าง ภาพจากชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่เมื่อนำระยะทางแบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ .....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตภาพที่ใช้ทางการแพทย์ส่วนใหญ่เป็นภาพสองมิติ เช่นภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ ซึ่งให้รายละเอียดได้อย่างจำกัดและไม่เด่นชัด ต่อมาเมื่อได้มีการคิดค้นเครื่องเอกซเรย์แบบ CT (Computer Tomography) และเครื่อง MRI (Magnetic Resonance Imaging) ซึ่งใช้สำหรับถ่ายภาพตัดขวางของร่างกายมนุษย์ขึ้นก็ทำให้วงการแพทย์พัฒนาไปอย่างมากมาย แต่อย่างไรก็ตามภาพที่ได้จากเครื่องทั้งสองยังคงเป็นภาพในลักษณะสองมิตินั่นเอง ซึ่งในการใช้งานนั้นแพทย์ต้องทำการวิเคราะห์และใช้การจินตนาการจากชุดข้อมูลภาพเหล่านี้ซึ่งชุดหนึ่ง ๆ มีไม่ต่ำกว่าสิบภาพและอาจมากถึงร้อยภาพสำหรับผู้ป่วยบางกรณี ด้วยเหตุนี้เองจึงได้เกิดงานวิจัยในการนำชุดข้อมูลภาพที่ได้มาสร้างเป็นภาพสามมิติโดยแบ่งออกเป็นสองวิธีใหญ่ ๆ คือการสร้างภาพเชิงพื้นผิว (Surface Rendering) และการสร้างภาพเชิงปริมาตร (Volume Rendering)

การสร้างภาพเชิงพื้นผิวนั้นเป็นการนำรูปเรขาคณิตรูปเล็ก ๆ เช่น สามเหลี่ยม หลาย ๆ รูป มาทำการเรียงต่อกันเพื่อสร้างเป็นพื้นผิวของอวัยวะที่สนใจภายในชุดข้อมูล ซึ่งภาพต้นฉบับจะต้องผ่านการแยกแยะทางไบนารี (Binary Segmentation) มาก่อนเพื่อกำหนดขอบเขตที่แน่นอนของอวัยวะ ส่วนการสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้นเป็นการพิจารณาถึงค่าความทึบแสงของวัตถุภายในปริมาตรที่สนใจเพื่อนำมาสร้างภาพ ลักษณะโดยทั่วไปของการสร้างภาพเชิงปริมาตรจะเป็นภาพในลักษณะกึ่งโปร่งใส (Semi-transparent) ซึ่งข้อดีของภาพในลักษณะนี้คือ ใช้แสดงโครงสร้างที่เกี่ยวข้องเนื่องกันของอวัยวะที่สนใจและอวัยวะบางส่วนที่ไม่สามารถระบุขอบเขตที่แน่นอนได้ เช่น เนื้อเยื่อต่างๆ โดยทั่วไปแล้วการสร้างภาพเชิงพื้นผิวในแต่ละมุมมองสามารถทำได้ในเวลาอันรวดเร็ว ในขณะที่การสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้นทำได้ค่อนข้างช้าทั้งนี้เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่ต้องพิจารณาในการสร้างภาพแต่ละครั้งนั้นมีจำนวนมากเมื่อเทียบจากการสร้างภาพในชุดข้อมูลเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดีภาพเชิงพื้นผิวนั้นเป็นภาพที่ให้รายละเอียดของอวัยวะได้ค่อนข้างจำกัด ดังนั้นในหลายๆ กรณีจึงนิยมสร้างภาพด้วยการใช้การสร้างภาพเชิงปริมาตรมากกว่าแม้จะใช้เวลาในการสร้างภาพนานก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อพัฒนาให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรในแต่ละมุมมองสามารถทำได้รวดเร็วขึ้น โดยคงความถูกต้องเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมเดิมที่มีอยู่ไว้ให้มากที่สุด และศึกษาถึงความเหมาะสมของ

ระยะทางทางดิจิทัลแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้ในการเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร

### 1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สิ่งหนึ่งที่มีผลทำให้เวลาในการสร้างภาพสูญเสียไปมากคือ การฉายแสงและรวมองค์ประกอบภาพผ่านบริเวณที่เป็นฉากหลังของภาพ ซึ่งเป็นบริเวณที่กว้างโดยถ้าคิดเป็นอัตราส่วนของวัตถุในภาพต่อข้อมูลภาพทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 1:2 ถึง 1:3 แนวความคิดของงานวิจัยนี้คือ การพยายามเข้าถึงข้อมูลในส่วนที่เป็นวัตถุที่สนใจภายในภาพให้เร็วที่สุดโดยไม่นำส่วนที่เป็นฉากหลังเข้ามาช่วยในการสร้างภาพด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้้นำการแปลงระยะทาง 3 มิติ (3D Distance Transform) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการสร้างภาพเชิงปริมาตร โดยการแปลงระยะทางนั้นเป็นการคำนวณหาระยะทางที่น้อยที่สุดจากตำแหน่งที่เป็นฉากหลังไปยังตำแหน่งของวัตถุที่สนใจ

หลักการที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้เริ่มจากการนำชุดข้อมูลภาพทั้งหมดมาสร้างเป็นปริมาตร จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลภาพเพื่อสร้างตารางค่าความทึบแสงและกำหนดค่าสีของกลุ่มข้อมูล การกำหนดค่าความทึบแสงนี้จะกำหนดให้ค่าความทึบแสงของกลุ่มข้อมูลที่เป็นฉากหลังหรืออากาศมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่เดียวกันข้อมูลปริมาตรภาพจะถูกนำมาสร้างปริมาตรของระยะทาง (Distance Volume) โดยใช้การแปลงระยะทางสามมิติ โดยที่ภายในปริมาตรนี้จะมีข้อมูลของระยะทางที่น้อยที่สุดจากบริเวณฉากหลังหรืออากาศซึ่งกำหนดให้มีค่าความทึบแสงเป็นศูนย์ไปยังบริเวณที่เป็นวัตถุกึ่งโปร่งใส ในส่วนของการสร้างภาพเป็นการฉายแสงเข้าไปในปริมาตร (Ray Casting) เพื่อทำการคำนวณหาส่วนที่มองเห็นได้ แสงจะถูกสุ่ม (Sampling) เป็นระยะทางเท่าๆกัน และในการเดินทางของมันจะใช้ข้อมูลภายในปริมาตรของระยะทางเพื่อกระโดดข้ามข้อมูลส่วนที่เป็นฉากหลังไป ในการติดตามแสงแต่ละชั้นจะมีการคำนวณค่าเกรเดียนต์ เพื่อใช้คำนวณการให้แสงเงาร่วมกับสีที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะเป็นการรวมองค์ประกอบภาพโดยอาศัยข้อมูลจากค่าเกรเดียนต์ ความเข้มแสงที่คำนวณการให้แสงเงามาแล้วและค่าความทึบแสงเข้ามาประกอบกัน

### 1.4 ขอบเขตการวิจัยและโครงร่างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นที่การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การแปลงระยะทางแบบต่างๆ ซึ่งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาเป็น 7 บท และในแต่ละบทจะมีเนื้อหาที่สำคัญดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาตลอดจนวัตถุประสงค์ และขอบเขตของการวิจัย

บทที่ 2 แนะนำถึงหลักการและความแตกต่างของการสร้างภาพเชิงปริมาตร และอัลกอริธึมการสร้างภาพเชิงพื้นผิวแบบต่าง ๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างภาพสามมิติซึ่งใช้อ้างอิงในการสร้างภาพนั้นคือระบบพิกัด การแปลงเรขาคณิต (Affine Transformation) การฉายแสง (Ray Casting) สีและการให้แสงเงา

บทที่ 4 อธิบายถึงหลักการประมวลผลภาพเบื้องต้นที่จำเป็นในการสร้างภาพเชิงปริมาตร นั่นคือการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Classification) การอินเทอร์โพล (Interpolation) ชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ เช่น เนียเรสเนบอร์ (Nearest Neighbor Interpolation) ลิเนียร์ (Linear Interpolation) และคิวบิคคอนโวลูชัน (Cubic Convolution Interpolation) เป็นต้น นอกจากนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีการรวมองค์ประกอบภาพ (Image Composition) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งของการสร้างภาพเชิงปริมาตรในตอนท้ายของบทด้วย

บทที่ 5 กล่าวถึงนิยามและหลักการพื้นฐานของการแปลงระยะทางแบบต่างๆ ของการประมวลผลภาพดิจิทัล ตลอดจนการประยุกต์ใช้การแปลงระยะทางกับการสร้างภาพเชิงปริมาตร

บทที่ 6 เป็นผลการทดลองแสดงการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการประยุกต์ใช้การแปลงระยะทางแบบต่างๆ และเปรียบเทียบปริมาณวงรอบการทำงานในการสร้างภาพด้วยวิธีการตามปกติและวิธีที่ใช้การแปลงระยะทาง

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนาตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำวิจัยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# การสร้างภาพเชิงพื้นผิวและการสร้างภาพเชิงปริมาตร

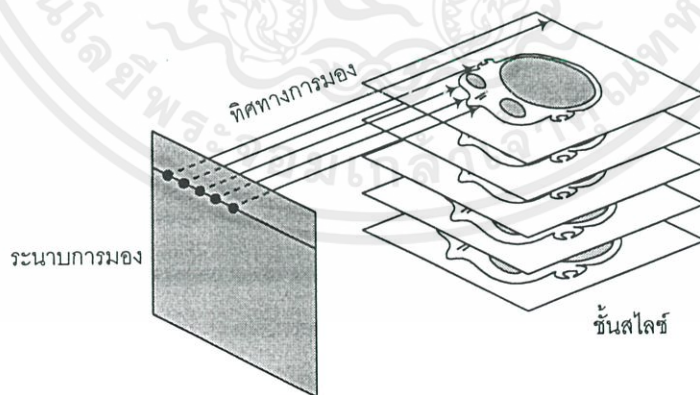
### 2.1 บทนำ

จากบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงลักษณะทั่วไปของภาพสามมิติทางการแพทย์ไปบ้างแล้ว เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนโดยรวมและทฤษฎีที่สำคัญต่างๆ ซึ่งใช้ในขั้นตอนการสร้างภาพ เนื้อหาหลักนั้นแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยในส่วนแรกจะเป็นการสร้างภาพเชิงพื้นผิวแบบต่างๆ และในส่วนที่สองจะเป็นการสร้างภาพเชิงปริมาตร ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างภาพมีเนื้อหาค่อนข้างมากซึ่งในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงอย่างคร่าวๆ ส่วนรายละเอียดนั้นจะอยู่ในบทถัดไป

### 2.2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิว

#### 2.2.1 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยการฉายภาพตามทิศทางการมอง

การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีนี้เป็นการฉายจุดข้อมูลภายในปริมาตรภาพลงมายังฉากของการมอง โดยในขั้นตอนแรกชุดข้อมูลที่ต้องการสร้างภาพจะถูกหมุนไปในทิศทางที่ต้องการก่อน ต่อจากนั้นจะมีการตั้งค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ขึ้นเพื่อเลือกแสดงอวัยวะส่วนที่สนใจ แล้วจึงทำการสแกนเข้าไปในชุดข้อมูลตามทิศทางการมองและตรวจสอบค่าระดับเทาของจุดข้อมูล ถ้ามีค่าสูงกว่าเทรชโฮลด์ก็จะถือว่าจุดนั้นเป็นขอบของอวัยวะที่ต้องการดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การสแกนชุดข้อมูลจากทิศทางการมอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เมื่อได้ขอบภาพแล้วต่อไปจะเป็นการคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว ซึ่งการคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติที่ให้ผลการสร้างภาพดีนั้นมี 2 วิธี คือการคำนวณจากเกรเดียนต์ของระดับเทาและการคำนวณโดยอาศัยค่าจากพิกัดรอบข้างซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

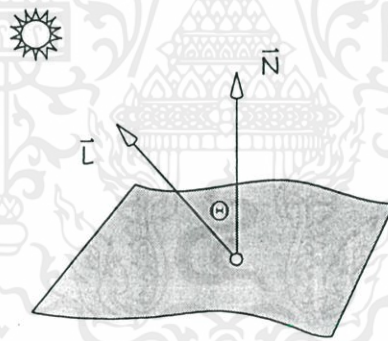
ในการคำนวณค่าแสงเงาของพื้นผิวนั้นทำได้โดยใช้กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ซึ่งใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่สะท้อนบนพื้นผิวและมุมของเวกเตอร์ปกติที่ทำกับแหล่งกำเนิดแสงดังนี้

$$I = L \cos \Theta \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I$  คือค่าความเข้มแสงบนพื้นผิว  $L$  เป็นค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงและ  $\Theta$  คือค่ามุมระหว่างเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวและทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้ผลคูณภายในของเวกเตอร์ นั่นคือ

$$\cos \Theta = \frac{\vec{I}_L \cdot \vec{N}}{|\vec{I}_L| |\vec{N}|} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\vec{I}_L$  คือเวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสงและ  $\vec{N}$  คือเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ปกติและเวกเตอร์แหล่งกำเนิดแสง

### 2.2.1.1 การคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติจากค่าเกรเดียนต์ระดับเทา [1]

เกรเดียนต์เป็นสิ่งที่ใช้บอกถึงขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับเทาภายในชุดข้อมูลซึ่งทิศทางนี้สามารถนำมาพิจารณาเป็นเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวได้ สำหรับการคำนวณค่าเกรเดียนต์เป็นดังสมการที่ (2.3) ถึง (2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

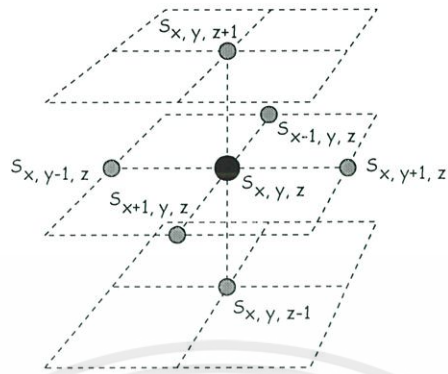
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อที่และตีพิมพ์หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_x = S_{x+1,y,z} - S_{x-1,y,z} \quad (2.3)$$

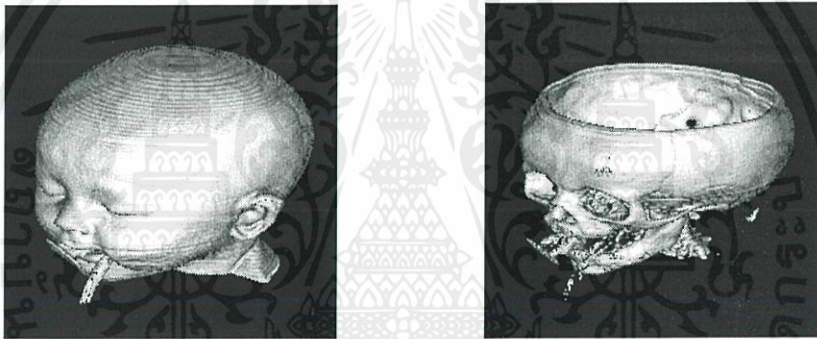
$$N_y = S_{x,y+1,z} - S_{x,y-1,z} \quad (2.4)$$

$$N_z = S_{x,y,z+1} - S_{x,y,z-1} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  คือองค์ประกอบเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวในแนวแกนต่างๆ และ  $S_{x,y,z}$  คือค่าระดับเทาภายในภาพ



รูปที่ 2.3 จุดต่างๆ บนสไลซ์ซึ่งใช้สำหรับคำนวณค่าเกรเดียนต์ของระดับเทา

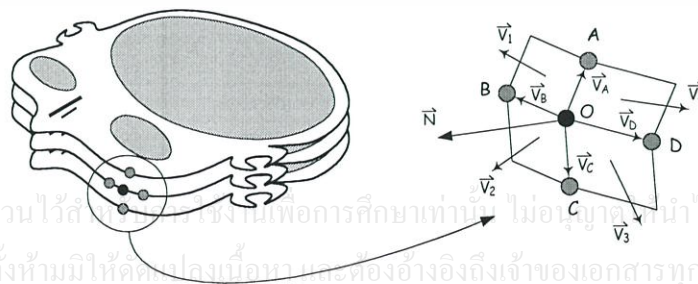


รูปที่ 2.4 ภาพเชิงพื้นผิวซึ่งสร้างจากการใช้เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่าเกรเดียนต์ระดับเทา

### 2.2.1.2 การคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่าของพิกัดรอบ

ข้าง [2], [3]

การคำนวณหาเวกเตอร์ปกติด้วยวิธีการนี้เป็นการนำค่าพิกัดของขอบวัตถุที่อยู่รอบข้างจุดที่ต้องการคำนวณมาประกอบกันเพื่อสร้างเป็นเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวดังรูปที่ 2.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหานี้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 การคำนวณหาเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวจากพิกัดรอบข้าง

จุดทั้ง 4 ที่อยู่รอบข้างจุดที่สนใจนั้นจะเสมือนกับเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ ล้อมรอบมันอยู่และในแต่ละชั้นจะมีเวกเตอร์ปกติของมันเอง ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้ผลคูณไขว้ของเวกเตอร์ (Cross Product) ดังนี้

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_A \times \vec{V}_B \quad (2.6)$$

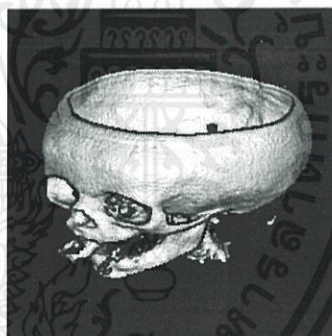
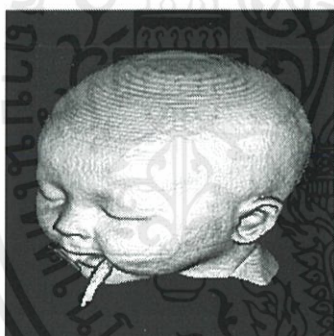
$$\vec{V}_2 = \vec{V}_B \times \vec{V}_C \quad (2.7)$$

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_C \times \vec{V}_D \quad (2.8)$$

$$\vec{V}_4 = \vec{V}_D \times \vec{V}_A \quad (2.9)$$

เวกเตอร์ปกติของจุดที่สนใจจะเกิดจากการนำทิศทางของเวกเตอร์เหล่านี้มาทำการเฉลี่ยกัน ซึ่งการเฉลี่ยนี้จะพิจารณาเพียงทิศทางโดยใช้การบวกแบบเวกเตอร์ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการหารเวกเตอร์ซึ่งได้จากการบวกนี้ด้วยขนาดของมัน

$$\vec{N} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 + \vec{V}_4 \quad (2.10)$$

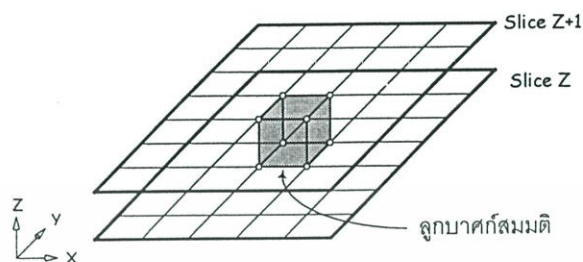


รูปที่ 2.6 ภาพเชิงพื้นผิวซึ่งสร้างจากการใช้เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่าของพิกัดรอบข้าง

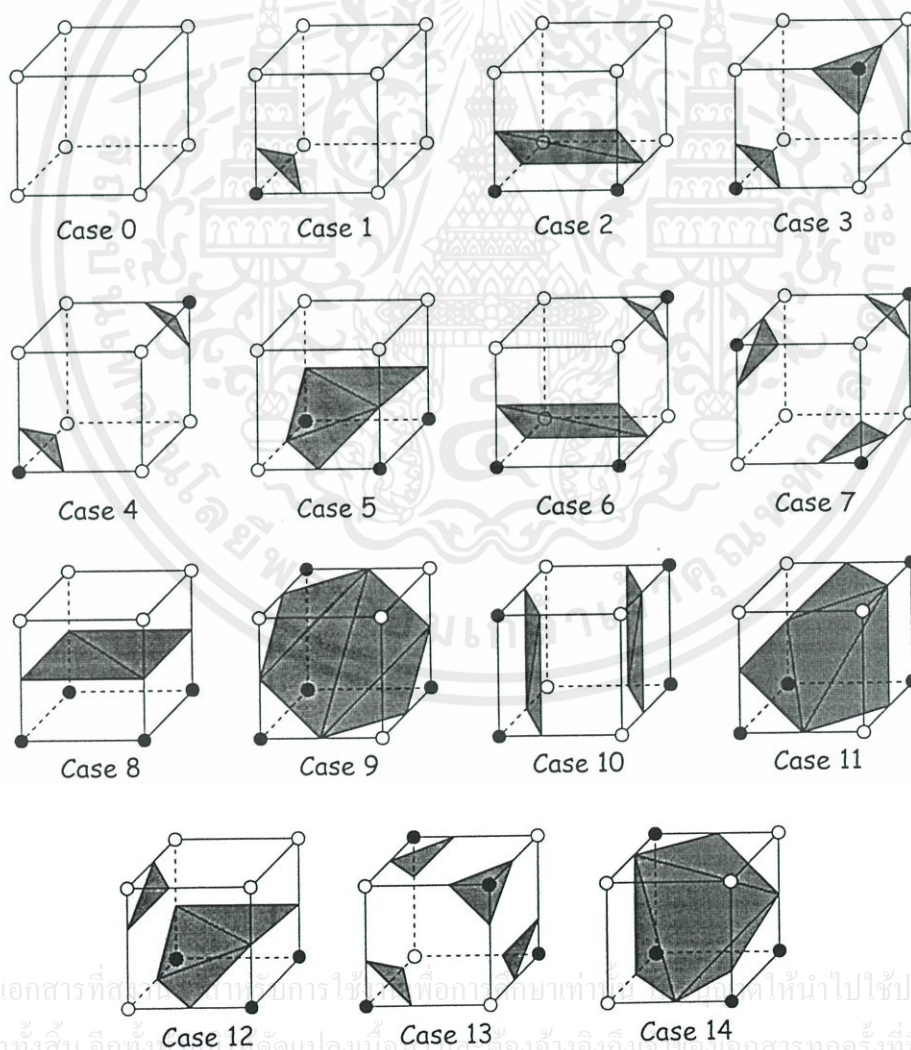
## 2.2.2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีมาร์ชคิวบ์ (Marching Cubes Algorithm) [4]

การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีการนี้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1987 โดย Lorensen, W. E. และ Cline, H. E. แนวความคิดของอัลกอริทึมนี้คือการนำข้อมูลของสไลซ์ที่ติดกัน 8 จุดแล้วสมมติให้แต่ละจุดเป็นมุมของลูกบาศก์ขนาดเล็กๆ ดังรูปที่ 2.7 ไปทำการเปรียบเทียบกับรูปแบบการจัดวางของสามเหลี่ยมแบบต่างๆ ที่เป็นไปได้เพื่อทำการสร้างเป็นพื้นผิวของวัตถุ รูปแบบการจัดวางรูปสามเหลี่ยมภายในลูกบาศก์นี้มี 256 รูปแบบ ซึ่งสามารถลดลงให้เหลือ 15 รูปแบบได้โดยใช้คุณสมบัติการสะท้อนและการหมุนดังรูปที่ 2.8 ในการสร้างภาพนั้นรูปแบบทั้ง 256

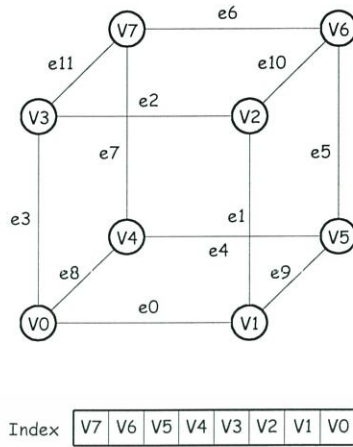
รูปแบบจะถูกนำมาสร้างเป็นตารางที่เก็บลำดับมุมของรูปสามเหลี่ยมซึ่งติดกับขอบของลูกบาศก์สมมติ โดยลักษณะการกำหนดลำดับของมุมและขอบของลูกบาศก์แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 ลูกบาศก์สมมติที่สร้างขึ้นจากข้อมูล 8 จุดของสไลซ์ที่อยู่ติดกัน

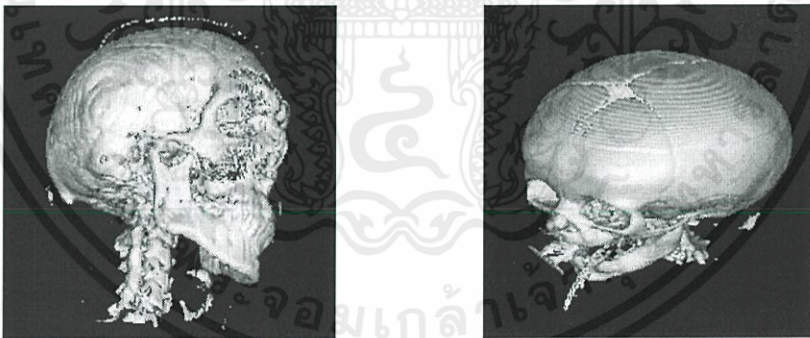


รูปที่ 2.8 รูปแบบการจัดเรียงสามเหลี่ยมที่เป็นไปได้ภายในลูกบาศก์สมมติ



รูปที่ 2.9 การเรียงลำดับมุมและขอบของลูกบาศก์สมมติ

ขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างภาพเริ่มจากการใช้อัลกอริทึมเพื่อทำการแยกแยะวัตถุที่สนใจออกมาให้อยู่ในลักษณะข้อมูลภาพแบบไบนารี จากนั้นจะเป็นขั้นตอนของการหารูปแบบการจัดวางสามเหลี่ยมที่เหมาะสมเพื่อใช้สร้างพื้นผิวของวัตถุโดยทำการพิจารณาข้อมูลครึ่งละ 8 จุดตามมุมของลูกบาศก์ขนาดเล็กซึ่งสมมติขึ้นเปรียบเทียบกับกับตารางที่เก็บลำดับมุมของสามเหลี่ยม และทำการสแกนต่อไปจนครบทั้งปริมาตร ผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมนี้จะเป็นลำดับมุมของสามเหลี่ยมซึ่งใช้แทนพื้นผิว



รูปที่ 2.10 ภาพเชิงพื้นผิวที่สร้างจากอัลกอริทึมมาร์ชชิงคิวบ์

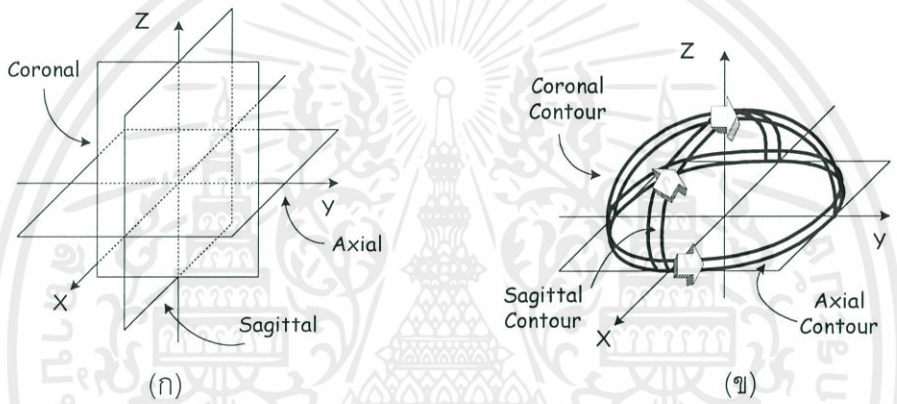
### 2.2.3 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวจากคอนทัวร์สามระนาบ [5]

การสร้างภาพสามมิติเชิงพื้นผิวโดยวิธีการนี้เป็นการใช้คอนทัวร์ของระนาบหลัก 3 ระนาบ

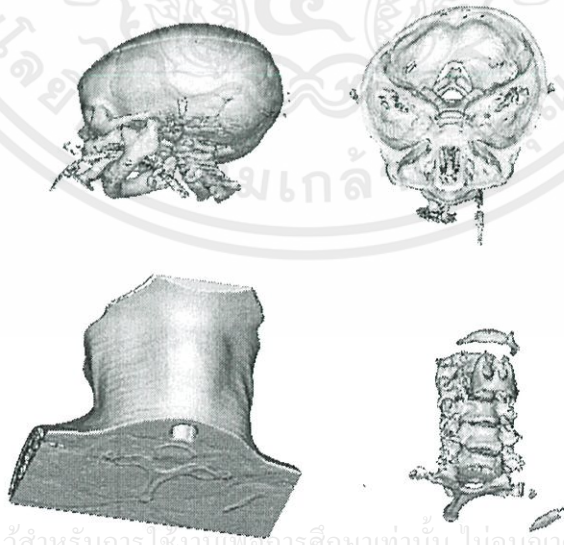
ซึ่งได้แก่ เอ็กเซียล (Axial) แซกกิทอล (Sagittal) และ โคโรนอล (Coronal) ดังรูปที่ 2.11ก มาประกอบกันเป็นผิววัตถุ แนวความคิดในการสร้างภาพคือการนำเส้นคอนทัวร์มาวาดในลักษณะที่เรียงซ้อนกัน นั่นคือกราฟิกพริมาทีฟ (Graphics Primitive) ที่ใช้จะเป็นเส้นแทนที่จะเป็นรูป

สามเหลี่ยม แต่ปัญหาก็คือพื้นผิวด้านบนของวัตถุจะเป็นผิวที่ไม่เต็ม ดังนั้นจึงต้องนำคอนทัวร์ในระนาบอื่นๆ มาวาดเข้าด้วยกันก็จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ สำหรับส่วนที่มีการซ้อนทับกันนั้นจะมีเวกเตอร์ปกติในทิศทางเดียวกันดังนั้นลักษณะความเข้มแสงที่พื้นผิวของวัตถุจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ขั้นตอนการสร้างภาพเริ่มจากการอ่านข้อมูลของสไลซ์ทั้งหมดเข้ามาเก็บไว้ในอะเรย์สามมิติแล้วใช้อัลกอริทึมการแยกแยะข้อมูลเพื่อเลือกอวัยวะส่วนที่สนใจมาสร้างเป็นข้อมูลภาพแบบไบนารี จากนั้นทำการอ่านข้อมูลในลักษณะของระนาบที่ต่างกัน 3 ระนาบ ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้นี้จะถูกนำมาคำนวณหาขอบภาพและลำดับของจุดเพื่อใช้วาดลงบนจอภาพดังรูปที่ 2.11 ข ส่วนภาพผลลัพธ์ของวิธีการนี้แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ก) ระนาบของคอนทัวร์ที่นำมาสร้างภาพ ข) การประกอบคอนทัวร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์ออกทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้ถูกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 ภาพเชิงพื้นผิวที่สร้างจากคอนทัวร์สามระนาบ

## 2.3 การสร้างภาพเชิงปริมาตร

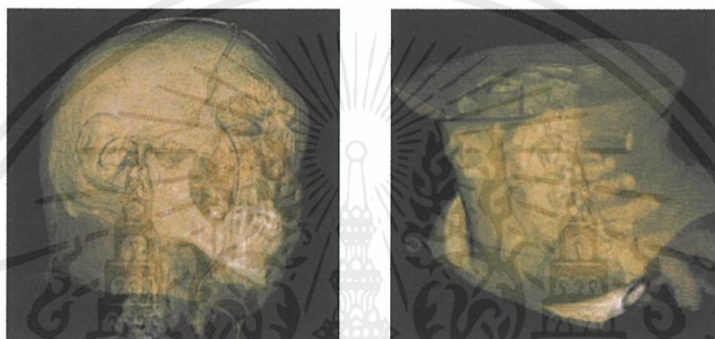
การสร้างภาพเชิงปริมาตรเป็นเทคนิคการสร้างภาพสามมิติ ซึ่งเป็นภาพในลักษณะกึ่งโปร่งใสทำให้สามารถมองเห็นโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับอวัยวะที่สนใจและอวัยวะบางส่วนที่ไม่สามารถระบุขอบเขตที่แน่นอนได้ เช่น เนื้อเยื่อต่างๆ จากงานที่ผ่านมา Drebin [6] และ Ney [7] นำเสนอวิธีการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้ค่าความเข้มแสงของภาพมาใช้กำหนดค่าความทึบแสง และการสร้างภาพแต่ละมุมมองจะต้องทำการแปลง (Transform) ให้ชุดสไลด์มาอยู่ในมุมมองที่ต้องการก่อนแล้วจึงทำการฉายภาพ (Projection) ลงมายังฉากของการมอง ซึ่งวิธีการนี้จะต้องใช้เวลาในการแปลงภาพและการจัดเก็บผลลัพธ์ค่อนข้างมาก เนื่องจากในการหมุนภาพแต่ละครั้งจะต้องมีการแก้อแลสซิง (Aliasing) ด้วย [8] ส่วนอีกงานหนึ่ง Levoy [9] ใช้วิธีการฉายแสงเข้าไปในปริมาตร (Ray Casting) แล้วทำการรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้า (Back to Front Composition) ด้วยวิธีการนี้การคำนวณภาพผลลัพธ์จะต้องติดตามแสงไปตลอดทั้งเส้นทำให้ใช้เวลาในการคำนวณนานมาก ต่างกับการสร้างภาพด้วยการรวมองค์ประกอบภาพจากหน้าไปหลัง [10] ซึ่งใช้การสะสมค่าความทึบแสงเพื่อหยุดการรวมองค์ประกอบภาพเมื่อค่าความทึบแสงมีค่าเข้าใกล้ 1.0 นั่นคือแสงที่ฉายเข้าไปในวัตถุกึ่งโปร่งใสถูกดูดกลืนโดยว็อกเซลที่อยู่ตามแนวลำแสงมากจนพิจารณาได้ว่าวัตถุนั้นทึบแสงโดยสมบูรณ์แล้ว

หลักการสร้างภาพเชิงปริมาตรที่ใช้อ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีพื้นฐานจากงานวิจัย [10] เนื่องจากการในการสร้างภาพในแต่ละมุมมองนั้นสามารถทำได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้หน่วยความจำชั่วคราวสำหรับการแปลงชุดสไลด์และยังหยุดการรวมองค์ประกอบภาพได้รวดเร็วอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการสร้างภาพเชิงปริมาตร

ขั้นตอนในการสร้างภาพเริ่มจากการนำข้อมูลภาพต้นฉบับมาทำการแบ่งกลุ่มตามค่าระดับเทา โดยใน CT แบ่งข้อมูลได้เป็น 4 กลุ่ม คือ อากาศ ไขมัน เนื้อเยื่อและกระดูก จากนั้นทำการกำหนดสีให้แต่ละกลุ่มข้อมูลแล้วทำการคำนวณตารางค่าความทึบแสง ในขณะเดียวกันจะทำการฉายแสงเข้าไปในปริมาตรเพื่อคำนวณหาส่วนที่มองเห็นได้ แสงที่ฉายเข้าไปจะถูกสุ่ม (Sampling) ออกเป็นระยะเท่าๆ กัน และในการติดตามแสงแต่ละชั้นจะมีการคำนวณค่าเกรเดียนต์เพื่อใช้คำนวณการให้แสงเงาร่วมกับสีที่กำหนดไว้ ส่วนขั้นตอนสุดท้ายเป็นการรวมองค์ประกอบภาพโดยใช้การคำนวณแบบหน้าไปหลัง (Front to Back Composition) ซึ่งจะอาศัยข้อมูลจากค่าเกรเดียนต์ ความเข้มแสงที่ผ่านการให้แสงเงามาแล้วและค่าความทึบแสงมาคำนวณ



รูปที่ 2.14 ภาพเชิงปริมาตร

## 2.4 สรุป

ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของหลักการสร้างภาพเชิงปริมาตรและการสร้างภาพเชิงพื้นผิว ในการใช้นั้นการสร้างภาพเชิงพื้นผิวในแต่ละมุมมองสามารถทำได้เร็วกว่าการสร้างภาพเชิงปริมาตรมาก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่ต้องคำนวณในแต่ละมุมมองนั้นเป็นเพียงแค่ตำแหน่งของจุดในตำแหน่งใหม่ที่ต้องการแสดงเท่านั้น แต่การสร้างภาพเชิงปริมาตรในแต่ละมุมมองนั้นจำเป็นต้องคำนวณองค์ประกอบต่างๆ เช่น ขนาดของเกรเดียนต์ ค่าความทึบแสง และการรวมองค์ประกอบภาพ ซึ่งต้องกระทำกับข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ภายในปริมาตร ดังนั้นการคำนวณจะใช้เวลานานมากแต่ข้อดีของภาพเชิงปริมาตรที่สามารถแสดงความเกี่ยวเนื่องกันของอวัยวะเป็นสิ่งที่ดี ดึงดูดให้มีการปรับปรุงความเร็วสร้างภาพในแต่ละมุมมองให้ทำได้รวดเร็วขึ้นซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ทฤษฎีและหลักการสร้างภาพสามมิติเบื้องต้น

### 3.1 บทนำ

การสร้างภาพทางการแพทย์ไม่ว่าจะเป็นการสร้างภาพเชิงพื้นผิว (Surface Rendering) หรือการสร้างภาพเชิงปริมาตร (Volume Rendering) นั้นล้วนแล้วแต่จำเป็นต้องใช้พื้นฐานและทฤษฎีทางคอมพิวเตอร์กราฟิกบางประการมาประยุกต์ใช้ เช่น การอ้างอิงระบบพิกัด การแปลงวัตถุที่อยู่ในปริภูมิ และแบบจำลองการให้แสงเงา เป็นต้น

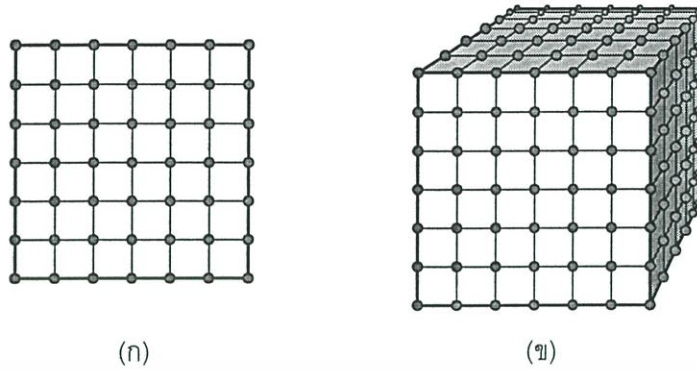
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทางคอมพิวเตอร์กราฟิกต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างภาพทางการแพทย์ โดยเริ่มจากการองค์ประกอบขั้นพื้นฐานของข้อมูลเชิงปริมาตรก่อนเป็นประการแรก จากนั้นจะกล่าวถึง การอ้างอิงระบบพิกัด การแปลงวัตถุในปริภูมิ และการให้แสงเงา

### 3.2 องค์ประกอบขั้นพื้นฐานของข้อมูลเชิงปริมาตร

ตามปกติภาพดิจิทัลจะประกอบไปด้วยอะเรย์สองมิติขององค์ประกอบข้อมูลที่แสดงสีหรือความเข้มแสง ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เรียกว่า "พิกเซล" (Pixel) หรือก็คือองค์ประกอบภาพนั่นเอง ในทำนองเดียวกัน ข้อมูลเชิงปริมาตรนั้นสามารถนำมาแสดงได้โดยการใช้อะเรย์สามมิติของค่าความเข้มแสงหรือสีเช่นกัน ซึ่งค่าเหล่านี้ถูกเรียกว่า "ว็อกเซล" (Voxel) นิยามของว็อกเซลนั้นมีอยู่ 2 อย่างที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3.1 นิยามแรกนั้นพิจารณาว่าว็อกเซลคือลูกบาศก์ซึ่งมีขนาดเล็กๆ ในขณะที่อีกนิยามหนึ่งกำหนดให้ว็อกเซลคือจุดในปริภูมิสามมิติซึ่งไม่มีขนาด ซึ่งเป็นนิยามที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ว็อกเซลนั้นเปรียบได้กับรูปเรขาคณิตที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานในการสร้างภาพหรือกราฟิกพริมาทีฟ (Graphic Primitive) ในคอมพิวเตอร์กราฟิกแบบดั้งเดิม ซึ่งอาจมองได้ว่าว็อกเซลก็คือเครื่องมืออีกอย่างหนึ่งในการสร้างภาพนั่นเอง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้คำว่าว็อกเซลอ้างอิงถึงชุดข้อมูลต้นฉบับ และเมื่อจุดข้อมูลถูกทำการสุ่มซ้ำ (Resampling) โดยการอินเทอร์โพล (Interpolate) ว็อกเซลเหล่านี้จะถูกอ้างอิงถึงในชื่อของจุดแซมเปิล (Sample) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

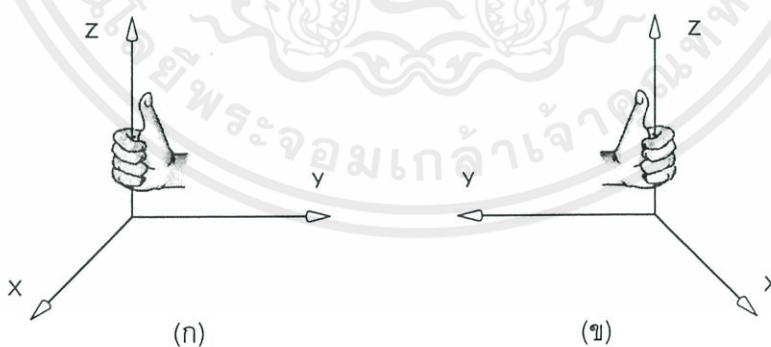


รูปที่ 3.1 แสดงความแตกต่างระหว่างฟิสิกเซลและว็อกเซล (ก) ฟิสิกเซล (ข) ว็อกเซล

### 3.3 ระบบพิกัด (Coordinate System)

ระบบพิกัดเป็นสิ่งที่ใช้อ้างอิงถึงตำแหน่งของวัตถุต่างๆ ที่อยู่ภายในปริภูมิ (Space) ในระบบพิกัดสองมิติใช้แกนหลักในการอ้างอิง 2 แกน นั่นคือแกน  $x$  และแกน  $y$  ส่วนในระบบพิกัดสามมิติจะใช้  $z$  ในการอ้างอิงเพิ่มเติมขึ้นมาอีกหนึ่งแกน การกำหนดทิศทางของแกน  $z$  มี 2 ระบบ คือ ระบบพิกัดมือขวาและระบบพิกัดมือซ้ายดังรูปที่ 3.2

ระบบพิกัดมือขวามักนิยมใช้ในงานทางคณิตศาสตร์ ระบบภูมิศาสตร์ และการอ้างอิงตำแหน่งของวัตถุโดยทั่วไป ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระบบมือขวาเป็นหลัก แต่สำหรับระบบคอมพิวเตอร์กราฟิกแล้วมักนิยมใช้ระบบพิกัดมือซ้ายซึ่งกำหนดให้ระยะความลึกเข้าไปในจอภาพนั้นมีค่าพิกัด  $z$  เป็นบวก และจอภาพคือระนาบ  $xy$



รูปที่ 3.2 ระบบพิกัด (ก) ระบบมือขวา (ข) ระบบมือซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.4 การแปลงเรขาคณิตของข้อมูลภาพ ไม่ว่าการแปลงใดๆ ที่สมมติขึ้นก็ตามให้ผลลัพธ์เสมอๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกนั้น บ่อยครั้งอาจมีความจำเป็นที่จะเคลื่อนย้ายภาพไปยังตำแหน่งใหม่หรือในบางกรณีอาจต้องการหมุนภาพไปในทิศทางต่างๆ เพื่อให้ได้มุมมองของ

ภาพที่ดีขึ้น การกระทำเหล่านี้สามารถทำได้โดยการใช้การแปลงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

ในการพิจารณาการแปลงนั้นอาจพิจารณาได้ว่าเป็นการแปลงจุดในปริภูมิสามมิติโดยในที่นี้กำหนดให้เป็นจุด  $P$  มีพิกัดเป็น  $(x, y, z)$  ใดๆ เมื่อต้องการแปลงจุดนี้ไปยังตำแหน่งใหม่ซึ่งในที่นี้คือจุด  $P'$  ที่พิกัด  $(x', y', z')$  ก็ทำได้โดยนำพิกัด  $P$  ไปคูณกับเมตริกซ์การแปลง  $T$  ดังนี้

$$P' = PT = [x \ y \ z] \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

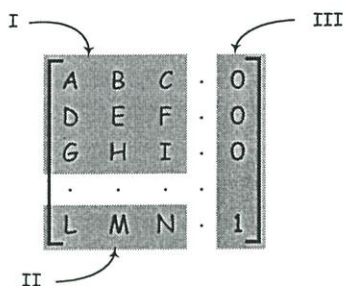
ซึ่งเมตริกซ์การแปลงดังกล่าวข้างต้นจะใช้กับการแปลงเรขาคณิตต่อไปนี้ คือ การสเกล การหมุน และการสะท้อน เป็นต้น โดยการเลือกว่าจะเป็นการแปลงชนิดใดนั้นจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งหมดภายในเมตริกซ์ของการแปลง แต่ในกรณีที่ต้องการย้ายตำแหน่งของจุด  $P$  ไปยังพิกัดใหม่คือ  $P'$  นั้นสามารถแสดงเมตริกซ์ของการแปลงได้ดังนี้

$$P' = P + T = [x \ y \ z] + [T_x \ T_y \ T_z] \quad (3.2)$$

ในการเคลื่อนย้ายตำแหน่งนั้นจะแตกต่างจากการแปลงแบบอื่นๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว (การแปลงแบบอื่นๆ จะใช้การคูณ) และสำหรับการแปลงเรขาคณิตในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกนั้นโดยปกติแล้วจะประกอบไปด้วยการแปลงหลายๆ ชนิดประกอบกันซึ่งการคำนวณต่างๆ จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจะเป็นการยากในการคำนวณถ้าเมตริกซ์เหล่านั้นมีรูปแบบที่แตกต่างกัน และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจะมีข้อจำกัดมากมาย

ระบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate System) เป็นสิ่งที่นำมาใช้แก้ปัญหาของการที่เมตริกซ์การแปลงมีรูปแบบที่แตกต่างกัน ในระบบพิกัดนี้จุด  $(x, y, z)$  จะถูกแทนด้วย  $(x, y, z, h)$  โดย  $h$  เป็นค่าแผลคูณสเกลที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์และจุดดังกล่าวจะถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalized) เป็น  $(x/h, y/h, z/h, 1)$  โดยทั่วไปแล้ว  $h$  มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นจุด  $(x, y, z)$  ใดๆ จะมีค่าในระบบพิกัดโฮโมจีเนียสเป็น  $(x, y, z, 1)$  ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบพิกัดโฮโมจีเนียสแสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส

จากรูปเมตริกซ์ย่อย I เป็นส่วนที่ใช้กำหนดว่าเป็นการแปลงแบบใด เช่น การสเกล การหมุน หรือการสะท้อน เป็นต้น ส่วนเมตริกซ์ย่อย II ใช้ในการเคลื่อนย้ายตำแหน่งแบบเชิงเส้น และเมตริกซ์ย่อย III เป็นส่วนที่ใช้ในการรวมระหว่างการเคลื่อนย้ายพิกัดและการแปลงแบบอื่นๆ ในรูปของการคูณ ซึ่งจะมีรายละเอียดของการแปลงแบบต่างๆ ดังนี้

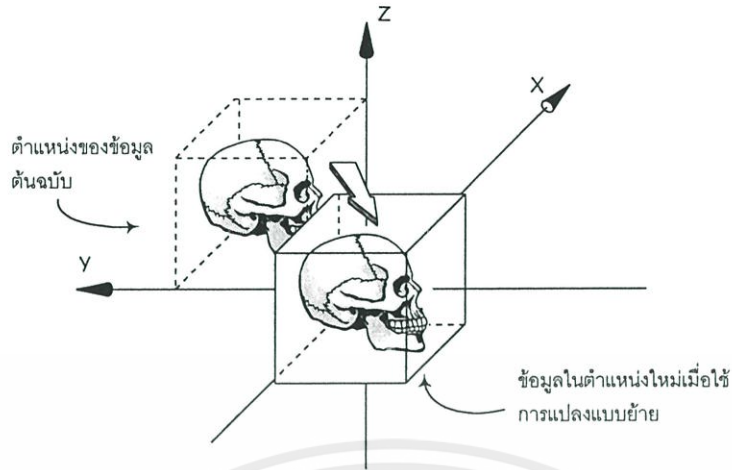
#### 3.4.1 การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (Translation)

การแปลงแบบย้ายตำแหน่งมีเมตริกซ์การแปลงแสดงดังสมการที่ 3.3 [11]

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดยที่ค่าของ  $T_x$ ,  $T_y$ , และ  $T_z$  แสดงถึงระยะทางที่ต้องการเคลื่อนย้ายไป โดยเป็นระยะที่เทียบกับแกน x แกน y และแกน z ตามลำดับ การแปลงแบบย้ายตำแหน่งนี้มีความสำคัญในการสร้างภาพทางคอมพิวเตอร์กราฟิกมาก เนื่องจากข้อมูลภาพที่นำมาใช้จะมีตำแหน่งอยู่เพียงเฉพาะด้านบวก ดังนั้นในการสร้างภาพที่มุมมองต่างๆ จำเป็นต้องมีการย้ายพิกัดของชุดข้อมูลให้จุดกึ่งกลางมาอยู่ที่จุดกำเนิดก่อนดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การย้ายตำแหน่งจุดข้อมูลไปที่จุดกำเนิด

### 3.4.2 การหมุนวัตถุ (Rotation)

สำหรับการหมุนวัตถุรอบแกนต่างๆ จะอ้างอิงจากการมองออกจากจุดกำเนิดไปตามแนวแกน ซึ่งเมตริกซ์การแปลงของการหมุนวัตถุมีดังนี้ [11]

การหมุนรอบแกน z ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาคือ

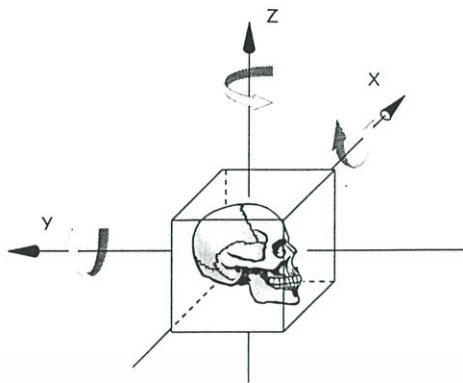
$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \Phi & \sin \Phi & 0 & 0 \\ -\sin \Phi & \cos \Phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

สำหรับการหมุนรอบแกน x และ y ก็มีสมการคล้ายกับสมการ (3.4) ซึ่งเมตริกซ์การแปลงแบบหมุนรอบแกน x คือ

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ 0 & -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

เมตริกซ์การแปลงแบบหมุนรอบแกน y คือ

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \Psi & 0 & -\sin \Psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \Psi & 0 & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.5 การแปลงแบบหมุนรอบแกนต่างๆ

### 3.4.3 การสเกล (Scaling)

การสเกลเป็นการแปลงเพื่อปรับเปลี่ยนขนาดของวัตถุที่ต้องการ เมตริกซ์การแปลงแบบสเกลแสดงดังสมการที่ 3.7 [11]

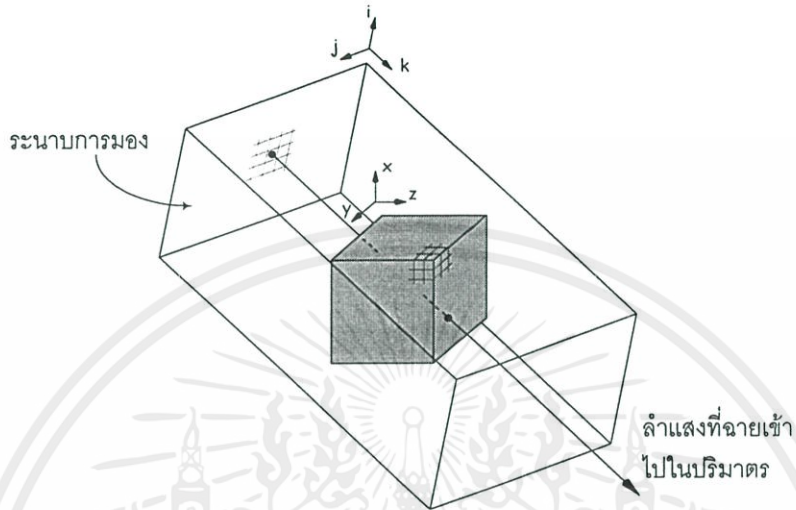
$$S = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยที่  $S_x$ ,  $S_y$  และ  $S_z$  คือ แฟคเตอร์การสเกลสำหรับพิกัด  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ

### 3.5 การฉายแสง (Ray Casting)

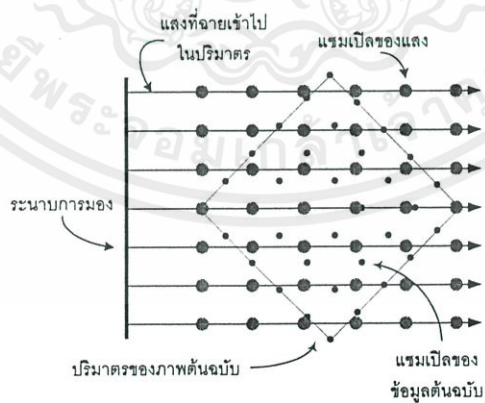
การแสดงผลของวิวอกเซลซึ่งเป็นองค์ประกอบแบบสามมิติลงบนจอภาพนั้นจำเป็นต้องมีการแปลงและฉายวิวอกเซลเหล่านั้นลงบนฉากการมองสองมิติ แต่การกระทำเหล่านี้ตามปกติก่อให้เกิดปัญหาในการแสดงผลขึ้นนั่นคือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการกระทำทางคณิตศาสตร์ของการแปลงและการฉายนั้นมักมีค่าเป็นทศนิยม ซึ่งจะต้องมีการปัดค่าเหล่านี้ให้เป็นจำนวนเต็มก่อนเนื่องจากการอ้างอิงตำแหน่งของวิวอกเซลจะอยู่ในลักษณะเลขจำนวนเต็มหน่วย ทำให้การส่งจุดของวิวอกเซลในบางตำแหน่งเกิดการซ้อนทับกัน ดังนั้นภาพที่ฉายจากปริมาตรลงไปยังฉากของการมองจะเกิดจุดดำเนื่องจากข้อมูลบางตำแหน่งขาดหายไป การฉายแสงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการพิจารณาจากระนาบการมองย้อนกลับไปทีปริมาตรภาพโดยใช้เมตริกซ์การแปลงผกผันดังรูปที่ 3.6 ซึ่งการใช้เมตริกซ์ผกผันสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่ภาพผลลัพธ์มีจุดว่างเกิดขึ้นได้เนื่องจากทุกจุดบนระนาบการมองจะได้รับการพิจารณาทั้งหมด ซึ่งเมตริกซ์ผกผันที่ใช้นั้นคือเมตริกซ์การแปลงแบบหมุนรอบแกน  $z$  และ  $x$  ดังนี้

$$(R_z R_x)^{-1} = R_x^{-1} R_z^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\Phi & -\sin\Phi & 0 & 0 \\ \cos\Theta \sin\Phi & \cos\Theta \cos\Phi & -\sin\Theta & 0 \\ \sin\Theta \sin\Phi & \sin\Theta \cos\Phi & \cos\Theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.6 การฉายแสงเข้าไปภายในปริมาตร

แสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตรจะถูกสุ่ม (Sampling) เป็นระยะทางเท่าๆ กันโดยในแต่ละระยะจะมีการแปลงโดยใช้เมตริกซ์การแปลงผกผันตามสมการที่ 3.8 ซึ่งลักษณะของการฉายแสงเข้าไปในปริมาตรเมื่อมองในรูปของจุดแซมเปิลจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะของแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าจุดแสงที่ถูกส่องหลายๆ จุดมีตำแหน่งไม่ตรงกับตำแหน่งของว็อกเซลในปริมาตรต้นฉบับ ดังนั้นจึงต้องมีการแทรกค่าเข้าไประหว่างข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องขึ้นซึ่งรายละเอียดของการแทรกค่าหรือการอินเทอร์โพละนั้นจะกล่าวถึงในบทถัดไป

### 3.6 การส่องสว่างและการให้แสงเงา (Illumination and Shading)

การส่องสว่างและการให้แสงเงาเป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีในคอมพิวเตอร์กราฟิกซึ่งใช้สำหรับการเน้นให้กราฟิกสามมิติที่สร้างขึ้นดูมีมิติสมจริง โดยที่การให้แสงเงาเป็นความพยายามที่จะจำลองผลของเงา การกระเจิงของแสง และการดูดกลืนที่เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบไปยังวัตถุในโลกของความเป็นจริง [12], [13], [14]

ส่วนแบบจำลองการส่องสว่างนั้นเป็นสิ่งที่ใช้อธิบายถึงวิธีการกำหนดสีไปยังจุดบนปริภูมิ โดยมีพื้นฐานอยู่บนการที่แสงฉายลงไปยังจุด มุมระหว่างผู้สังเกตกับแสง คุณสมบัติของวัสดุและทิศทางที่หันเหกับตำแหน่งในปริภูมิ แบบจำลองการให้แสงเงาจะเป็นกรอบล้อมให้แบบจำลองการส่องสว่าง โดยที่แบบจำลองการให้แสงเงาเป็นการพิจารณาว่าเมื่อใช้แบบจำลองการส่องสว่างกับจุดนั้นแล้วพารามิเตอร์ใดที่จะได้ออกมาจากแบบจำลองการส่องสว่างหรือแม้กระทั่งพารามิเตอร์ที่ได้ออกมาจากมัน ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองการส่องสว่างและแบบจำลองการให้แสงเงาเป็นสิ่งสำคัญซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง

เป้าหมายของคอมพิวเตอร์กราฟิกแบบดั้งเดิมคือ การสร้างภาพให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับภาพถ่าย แต่สำหรับการสร้างภาพเชิงปริมาตรแล้วการสร้างภาพให้มีลักษณะที่เหมือนภาพถ่ายนั้นไม่ใช่จุดมุ่งหมายประการแรก แต่เป้าหมายแรกของการให้แสงเงากลับเป็นการเน้นให้การแสดงชุดข้อมูลสามารถทำได้ดีขึ้น ชุดข้อมูลเชิงปริมาตรสามารถใช้แสดงวัตถุและสิ่งต่างๆ ที่อยู่ภายในตัวมัน เช่น อวัยวะของมนุษย์ ชิ้นส่วนภายในของเครื่องจักร หรืออาจเป็นชั้นต่างๆ ของเปลือกโลก สิ่งต่างๆ ที่อยู่ภายในปริมาตรเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นทะลุเข้าไปได้ในโลกของความเป็นจริง ดังนั้นมันจึงไม่จำเป็นที่จะทำแสงเงาของสิ่งที่อยู่ภายในเหล่านี้ให้เหมือนจริงเนื่องจากมันไม่สามารถอ้างอิงได้ว่าในโลกความเป็นจริงแล้วมันควรเป็นอย่างไร ต่อไปจะกล่าวถึงองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งใช้ในการคำนวณแสงเงา

#### 3.6.1 เกรเดียนต์ (The Gradient)

เกรเดียนต์เป็นการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงของว็อกเซลในชุดข้อมูล นอกจากนี้มันยังบอกถึงทิศทางในการเปลี่ยนแปลงด้วย ข้อมูลนี้เป็นสิ่งสำคัญในการสร้างภาพเนื่องจากมันเป็นตัวที่ใช้บอกถึงบางสิ่งบางอย่างเกี่ยวกับโครงสร้างของชุดข้อมูล ตัวอย่างเช่น โลหะ 2 ชนิดที่อยู่ในชุดข้อมูลที่เป็นส่วนของเครื่องจักรซึ่งมีความเข้มแสงของว็อกเซลแตกต่างกัน ดังนั้นเกรเดียนต์จะมีค่าสูงในส่วนที่เป็นขอบเขตนั้นด้วย

จะเห็นได้ว่าเกรเดียนต์คือเวกเตอร์สามมิติ ที่มีทิศทางชี้ไปยังจุดที่มีตำแหน่งแน่นอนในปริภูมิสามมิติ ซึ่งใช้บอกทิศทางการหันเหของโครงสร้างในชุดข้อมูลดังสมการที่ 3.9

$$\nabla f(x, y, z) = \left[ \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} \quad \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} \quad \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z} \right]^T \quad (3.9)$$

เมื่อ  $\nabla$  เป็นสัญลักษณ์แทนเกรเดียนต์ และ  $f$  คือฟังก์ชันความเข้มแสง

$$|\nabla f(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z}\right)^2} \quad (3.10)$$

ส่วนขนาดของเกรเดียนต์นั้นจะใช้เป็นตัวบอกความเร็วในการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงภายในชุดข้อมูล ถ้าขนาดของเกรเดียนต์มีค่าเป็นศูนย์นั้นหมายความว่าค่าของว็อกเซลที่อยู่รอบข้างจุดที่สนใจไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง และถ้าพิจารณาในแง่คณิตศาสตร์จะพบว่าเกรเดียนต์ก็คือการหาอนุพันธ์ ซึ่งเป็นสิ่งที่ใช้วัดถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน หรือก็คือฟังก์ชันค่าความเข้มแสงของว็อกเซลในชุดข้อมูลนั่นเอง

### 3.6.1.1 ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ (The Central Difference Gradient Estimator)

ในการคำนวณค่าเกรเดียนต์นั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ซึ่งเป็นตัวดำเนินการที่นิยมใช้กันทั่วไป แม้ว่ามันจะไม่ใช่วิธีการที่ดีที่สุดในแง่ของคุณภาพ แต่มันใช้เวลาในการคำนวณน้อยและใช้งานง่าย

ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์มีนิยามดังนี้

$$D_x = f(x-1, y, z) - f(x+1, y, z) \quad (3.11)$$

$$D_y = f(x, y-1, z) - f(x, y+1, z) \quad (3.12)$$

$$D_z = f(x, y, z-1) - f(x, y, z+1) \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ เมื่อ  $f(x, y, z)$  คือค่าของว็อกเซลที่ตำแหน่ง  $(x, y, z)$  ในชุดข้อมูล ส่วน  $D_x$ ,  $D_y$  และ  $D_z$  เป็นการคำนวณค่าเกรเดียนต์ในทิศทาง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์นี้ยังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = [D_x \quad D_y \quad D_z]^T \quad (3.14)$$

จากสมการที่ 3.11 ถึง 3.13 สังเกตได้ว่าตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ประกอบไปด้วยการลบเพียงอย่างเดียว ดังนั้นมันจึงง่ายแก่การเขียนซอฟต์แวร์และการสร้างฮาร์ดแวร์ แต่อย่างไรก็ตามไม่ใช่ตัวดำเนินการที่ให้ความถูกต้องมากนัก บ่อยครั้งตัวดำเนินการแบบนี้ถูกเรียกว่าตัวดำเนินการแบบหกจุด (Six-Point Operator) เนื่องจากมันใช้จุดว็อกเซล 6 จุดมาทำการคำนวณ

วิธีที่ใช้เขียนตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์อีกวิธีหนึ่งคือการเขียนแบบเคอร์เนลการคอนโวลูชัน (Convolution Kernel) เนื่องจากตัวดำเนินการตัวนี้มีลักษณะที่เหมือนกันในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนมันในลักษณะเคอร์เนล 1 มิติได้ดังนี้

$$D_{x,y,z} = [-1 \ 0 \ 1]^T \quad (3.15)$$

### 3.6.1.2 เกรเดียนต์กับการสร้างภาพเชิงปริมาตร

ในคอมพิวเตอร์กราฟิกแบบดั้งเดิมนั้น เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการให้แสงเงาแก่พิกเซลของโพลิกอนที่ถูกสร้างภาพขึ้น และมันจะถูกใช้ในแบบจำลองการให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong [12], [13] ร่วมกับข้อมูลอื่นๆ เช่น ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง สีและคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดให้แก่โพลิกอน จุดประสงค์ทั้งหมดนี้ก็เพื่อให้ภาพที่สร้างขึ้นมีลักษณะที่เหมือนจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่สำหรับการสร้างภาพเชิงปริมาตรแล้วการคำนวณหาเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากพื้นผิวในชุดข้อมูลมีตำแหน่งที่ไม่ชัดเจน ดังนั้นเกรเดียนต์จึงถูกนำมาใช้แทนเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวในแบบจำลองการส่องสว่าง

### 3.6.2 การให้แสงเงาแบบ Gouraud และ Phong (Gouraud And Phong Shading)

ในเอกสารอ้างอิงทางคอมพิวเตอร์กราฟิกนั้นบ่อยครั้งมักมีการอ้างอิงถึงคำว่า การให้แสงเงาหรือการส่องสว่างของ Phong และ Gouraud ซึ่งทั้ง Henri Gouraud และ Bui Tuong Phong ได้พัฒนาเทคนิคที่ทำให้รูปทรงทางเรขาคณิตต่างๆ ที่สร้างขึ้นบนคอมพิวเตอร์มีลักษณะที่ดูสมจริง โดย Henri Gouraud นำเสนอผลงานของเขาในปี ค.ศ. 1971 และ Bui Tuong Phong ในปี ค.ศ. 1975 การให้แสงเงาแบบ Phong และ Gouraud นั้นเป็นการอ้างอิงถึงแบบจำลอง 2 แบบที่แตกต่างกัน ซึ่งนำไปใช้กับโพลิกอนโดยที่แบบจำลองการให้แสงเงาทั้งสองนี้สามารถนำไปใช้กับแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong ได้ แต่มันอาจดูค่อนข้างสับสนเนื่องจาก Phong นั้นมีทั้งแบบจำลองของการส่องสว่างและการให้แสงเงา ในขณะที่ Gouraud มีเพียงแค่แบบจำลองการให้แสงเงา ซึ่งความไม่แตกต่างของแบบจำลองการให้แสงเงาทั้งสองจะกล่าวถึงในภายหลัง ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.3 แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong (The Phong Illumination Model)

จุดมุ่งหมายของแบบจำลองการส่องสว่างคือการจำลองการสะท้อนแสงบนพื้นผิวและผลที่เกิดขึ้นกับสีของมัน เช่น ลักษณะการกระสะท้อนแสงบนพื้นผิวของลูกโบวล์เมื่อมีแสงสีขาวพุ่งไปตกกระทบบนพื้นผิวที่แสงส่องถูกพื้นผิวสีของบริเวณนั้นก็จะเปลี่ยนไปจนเกือบเป็นสีขาว จุดมุ่งหมายอีกประการหนึ่งของการออกแบบแบบจำลองการส่องสว่างคือการทำให้แบบจำลองนั้นอยู่ในรูปแบบที่ง่าย ซึ่งทำให้การคำนวณมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากอดีตเมื่อแบบจำลองการส่องสว่างถูกพัฒนาขึ้นนั้น ความถูกต้องทางกายภาพจะถูกพิจารณาถึงน้อยมาก เนื่องจากสิ่งสำคัญคือประสิทธิภาพในการคำนวณ ไม่ใช่ความถูกต้องทางกายภาพและปรากฏการณ์ของแสงที่อยู่เบื้องหลังแบบจำลองเช่น การให้แสงเงา เงา และอื่นๆ

แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong เป็นการอธิบายถึงผลของ แสงแวดล้อม (Ambient Light) รวมถึง การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse Reflection) และการสะท้อนแบบกระจก (Specular Reflection) ของแสงซึ่งตกกระทบบนพื้นผิว แบบจำลองการส่องสว่างนี้มีพื้นฐานจากการพิจารณาจุดต่างๆ บนพื้นผิวซึ่งแสงตกกระทบบนพื้นผิว

#### 3.6.3.1 แสงแวดล้อม (Ambient Light)

แหล่งกำเนิดแสงแวดล้อม คือแสงซึ่งมีค่าความเข้มแสงเท่ากันทุกๆ ที่บนฉากที่สร้างขึ้น มันไม่ใช่แหล่งกำเนิดแสงโดยตรงและค่าของมันก็ไม่ขึ้นอยู่กับมุมของแสงซึ่งสัมพันธ์กับพื้นผิว สีของพื้นผิวเมื่อแสงแวดล้อมนี้ไปกระทบบนพื้นผิวสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$C_o = C_a k_a O_d \quad (3.16)$$

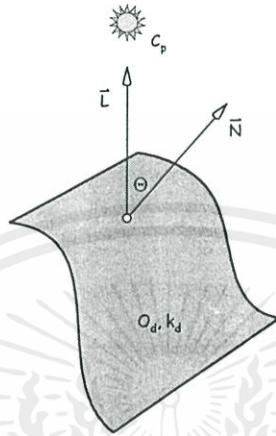
เมื่อ  $C_o$  คือค่าสีผลลัพธ์ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากแสงแวดล้อมที่มีสี  $C_a$  ส่องไปยังจุดบนวัตถุ  $k_a$  คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงแวดล้อม ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 และเป็นสิ่งที่ใช้แยกความแตกต่างของวัตถุที่อยู่ในภาพ เช่นวัสดุสีดำจะดูดกลืนแสงมากกว่าวัตถุสีขาวดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงแวดล้อมของมันจึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่วน  $O_d$  คือ สีการกระจายของจุดบนวัตถุซึ่งสมการที่ 3.16 นี้จำเป็นต้องทำการคำนวณ 3 ครั้งสำหรับแต่ละองค์ประกอบสีนั่นคือ แดง เขียวและน้ำเงิน

#### 3.6.3.2 การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse Reflection)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีประโยชน์ไปใช้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีประโยชน์ไปใช้

การสะท้อนแบบกระจายเกิดจากการที่แหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในฉากแผ่รังสีออกมาแบบเอกรูป (Uniform) ในทุกๆ ทิศทาง สีของจุดบนพื้นผิวจะแปรไปตามทิศทางที่ทิศทางของพื้นผิวกับแหล่งกำเนิดแสงและระยะทางจากจุดที่ทำการคำนวณไปยังแหล่งกำเนิดแสง ส่วนมากแล้วระยะ

ทางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับพื้นผิวมักไม่นำมาพิจารณา ซึ่งกล่าวได้ว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ที่อนันต์ ดังนั้นการคำนวณจึงเหลือเพียงแค่มุมระหว่างพื้นผิวกับแหล่งกำเนิดบวกกับผลจากแบบจำลองแสงเวดล้อมเท่านั้น



รูปที่ 3.8 องค์ประกอบของการสะท้อนแสงแบบกระจาย

ทิศทางการหันเหของพื้นผิวสามารถอธิบายได้ด้วยเวกเตอร์ปกติ  $N$  ที่จุดซึ่งต้องการให้แสงเงา สำหรับเวกเตอร์ของจุดบนพื้นผิวไปยังแหล่งกำเนิดแสงนั้นเขียนแทนด้วย  $L$  ในกรณีที่แสงอยู่ที่ตำแหน่งอนันต์จะถือว่า  $L$  มีค่าคงที่ แต่ก่อนที่จะนำเวกเตอร์ทั้งสองมาใช้ในแบบจำลองการให้แสงเงานั้นจำเป็นต้องทำการนอร์มอลไลซ์พวกมันก่อนซึ่งจะได้เป็น  $\bar{N}$  และ  $\bar{L}$  ส่วนมุมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเวกเตอร์ปกติคือ  $\theta$  (ดังรูปที่ 3.8) ดังนั้นแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong ซึ่งมีการสะท้อนแบบกระจายรวมอยู่ด้วยจะเป็นดังสมการที่ 3.17

$$C_o = C_d k_d O_d + C_p k_d O_d \cos \theta \quad (3.17)$$

เมื่อ  $C_p$  คือสีของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด  $k_d$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแบบกระจาย และ  $\theta$  คือมุมระหว่างเวกเตอร์แหล่งกำเนิดแสงกับเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว พิจารณาพจน์ที่สองในสมการที่ 3.17 ถ้ามุม  $\theta$  มีค่าเท่ากับ 90 องศาจะทำให้  $\cos \theta$  มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือไม่มีผลของการสะท้อนแบบกระจายเกิดขึ้น ในขณะที่ถ้ามุม  $\theta$  เป็น 0 องศาจะเกิดผลของการสะท้อนแบบกระจายมากที่สุด เนื่องจากในขณะนี้  $\cos \theta$  มีค่าเท่ากับ 1.0 แบบจำลองนี้จะให้ค่าที่ถูกต้องถ้ามุมระหว่าง  $\bar{N}$  และ  $\bar{L}$  อยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 90 องศา และผลของการสะท้อนแบบกระจายจะหมดไปถ้ามุมเกิน 90 องศา ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวนั้นเป็นส่วนที่อยู่ด้านหลังของวัตถุ

สมการ 3.17 นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์  $\vec{N}$  และ  $\vec{L}$  ได้ดังนี้

$$C_o = C_a k_a O_d + C_p k_d O_d (\vec{N} \cdot \vec{L}) \quad (3.18)$$

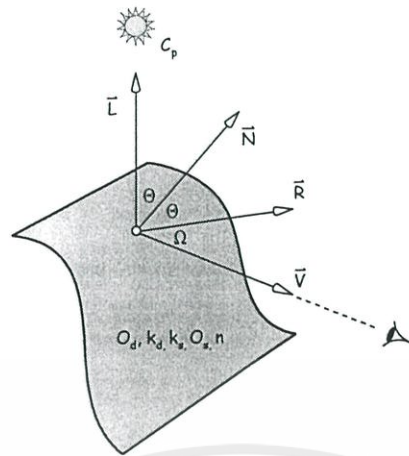
สมการ 3.18 นี้จะถูกใช้ในการคำนวณ 3 ครั้งสำหรับแต่ละองค์ประกอบสีซึ่งก็คือสีแดง เขียว และน้ำเงิน เช่นเดียวกับสมการที่ 3.17

### 3.6.3.3 การสะท้อนแสงแบบกระจก (Specular Reflection)

การสะท้อนแสงแบบกระจก (Specular Reflection) ในแบบจำลองการส่องสว่างเกิดขึ้นเนื่องจากการเน้นจุดสว่างของการฉายแสง (Shiny Highlights) ตัวอย่างเช่น จุดสีขาวที่มีลักษณะสว่างกว่าบริเวณอื่นบนลูกโบวлинг ซึ่งเกิดเนื่องจากการฉายแสงสีขาวลงบนพื้นผิว ในความเป็นจริงนั้นตามนุษย์สามารถมองเห็นลูกโบวлингได้ทั้งลูกเนื่องจากองค์ประกอบของแสงแวดล้อม และแสงแบบกระจายในแบบจำลองการส่องสว่าง การสะท้อนแสงแบบกระจกนี้จะส่งผลในบริเวณใด บริเวณหนึ่งที่แน่นอน และความเข้มแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวก็จะมีลักษณะที่ชัดเจนรอบจุดที่ตกกระทบ การสะท้อนแสงแบบนี้จะมีตัวแปร  $n$  เป็นเลขยกกำลังที่ควบคุมผลการสะท้อนของแสง สำหรับวัตถุที่เป็นตัวสะท้อนอย่างสมบูรณ์ เช่น กระจก จะมีค่า  $n$  เป็นอนันต์ ถ้าตาของผู้สังเกตอยู่ในแนวเดียวกับแสงที่ถูกสะท้อนออกมาผู้สังเกตจะเห็นเพียงแค่ผลของการสะท้อนแสงแบบกระจกเท่านั้น บ่อยครั้งที่การสะท้อนแสงแบบกระจกไม่ขึ้นอยู่กับสีบนพื้นผิวของวัตถุเลย แต่มันจะถูกสมมติว่าสีที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนแสงชนิดนี้เป็นสีขาวเสมอ แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong ซึ่งมีการพิจารณาองค์ประกอบของการสะท้อนแสงแบบกระจกเป็นดังสมการที่ 3.19

$$C_o = C_a k_a O_d + C_p \left[ k_d O_d (\vec{N} \cdot \vec{L}) + k_s O_s (\vec{R} \cdot \vec{V})^n \right] \quad (3.19)$$

เมื่อ  $k_s$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงแบบกระจกและเป็นคุณสมบัติของวัสดุด้วย  $\vec{R}$  คือ เวกเตอร์การสะท้อน (Reflection Vector) ที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว ซึ่ง  $\vec{R}$  นี้คือทิศทางของแสงซึ่งจะถูกสะท้อนในกรณีที่แสงตกกระทบบนวัตถุที่มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงอย่างสมบูรณ์ หรือถ้าจะกล่าวอีกอย่างหนึ่งมันก็คือเวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งสะท้อนออกมาจากเวกเตอร์ปกติ  $\vec{N}$  นั่นเอง ส่วน  $\vec{V}$  คือเวกเตอร์จากจุดซึ่งจะถูกให้แสงเงาไปยังตาของผู้สังเกต ผลคูณภายในระหว่างเวกเตอร์  $\vec{R}$  และ  $\vec{V}$  เกิดขึ้นเนื่องจากในความเป็นจริงแล้วผู้สังเกตอาจไม่สามารถมองตรงจุดของการสะท้อนได้เสมอไป ซึ่งนั่นก็คือ  $\vec{R}$  และ  $\vec{V}$  ไม่อยู่ในแนวเดียวกัน ผลของผลคูณภายในจะถูกทำให้มีน้ำหนักขึ้นด้วยการยกกำลัง  $n$  ซึ่ง  $n$  ก็คือเลขยกกำลังของการสะท้อนแบบกระจกเพื่อสร้างลักษณะการสะท้อนที่เด่นชัดขึ้น

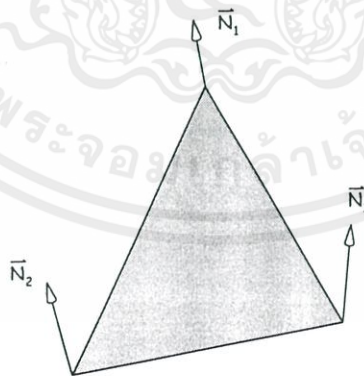


รูปที่ 3.9 องค์ประกอบการสะท้อนแสงแบบกระจก

ยังมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการส่องสว่างและการให้แสงเงาที่จะไม่กล่าวถึง เนื่องจากมันไม่มีส่วนสำคัญในการสร้างภาพเชิงปริมาตร เช่นการลดทอนของแหล่งกำเนิดแสง พื้นฐานทางกายภาพของแบบจำลองการส่องสว่างและอื่นๆ

#### 3.6.4 ความแตกต่างของแบบจำลองการให้แสงเงาแบบ Gouraud และ Phong

ทั้งแบบจำลองการให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong นั้นควรนำมาใช้ประกอบกับแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong โดยใช้สมการที่ 3.19 ซึ่งความแตกต่างของแบบจำลองทั้งสองนั้นจะเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อนำแบบจำลองการส่องสว่างไปใช้กับมัน

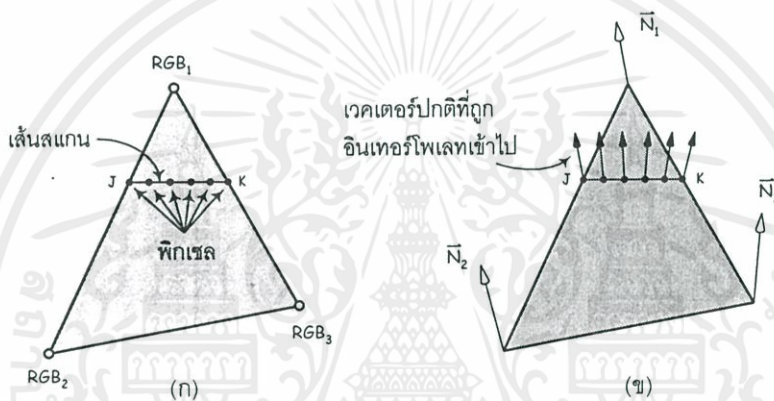


รูปที่ 3.10 เวกเตอร์ปกติที่แต่ละมุมของโพลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ในการให้แสงเงาแก่แบบจำลองซึ่งประกอบขึ้นจากโพลิกอนนั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณหาค่าเวกเตอร์ปกติที่มุมของมันก่อน (รูปที่ 3.10) ซึ่งเวกเตอร์ปกติเหล่านี้จะถูกใช้ร่วมกับแบบ

จำลองการส่องสว่างของ Phong โดยที่มันจะส่งผลกับสีที่แต่ละมุม ขั้นตอนหลังจากนั้นจะมีการคำนวณสองวิธีที่แตกต่างกัน

การให้แสงเงาแบบ Gouraud จะเติมสีที่เกิดเนื่องจากการส่องสว่างเข้าไปที่มุมและทำการอินเทอร์โพลเลตสีเหล่านั้นบนเส้นขอบและบนเส้นสแกนของโพลิกอนดังรูปที่ 3.11ก ค่าสีที่จุด J จะถูกอินเทอร์โพลเลตจากสี RGB1 และ RGB2 ส่วนค่าสีที่จุด K จะถูกอินเทอร์โพลเลตจากจุด RGB1 และ RGB3 ค่าสีถัดไปที่พิกเซลบนเส้นสแกนจะถูกอินเทอร์โพลเลตจากค่าสีที่จุด J และ K หลังจากที่ได้คำนวณเส้นสแกนเสร็จแล้วก็จะคำนวณในเส้นสแกนถัดไปจนกระทั่งรูปสามเหลี่ยมถูกสแกนทั้งหมด



รูปที่ 3.11 (ก) การให้แสงเงาแบบ Gouraud (ข) การให้แสงเงาแบบ Phong

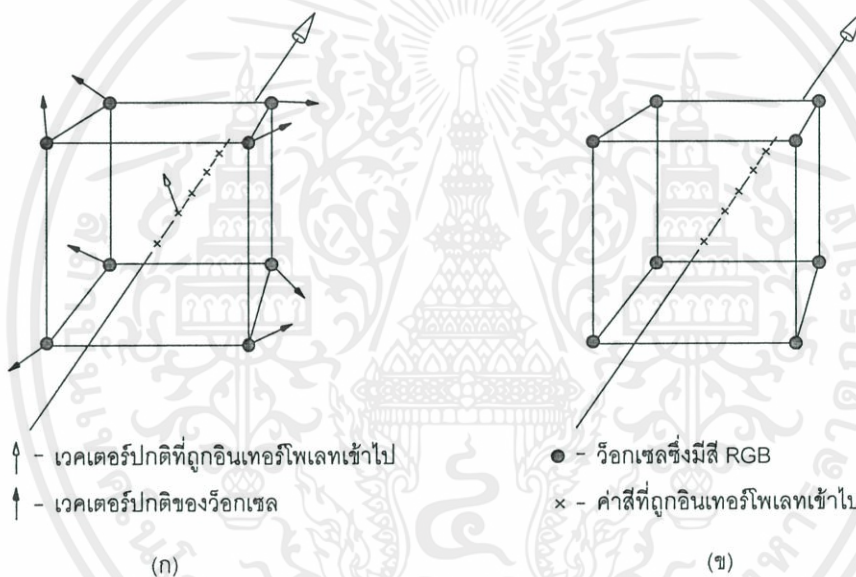
การให้แสงเงาแบบ Phong จะใส่เวกเตอร์ปกติเข้าไปที่จุดยอดและทำการอินเทอร์โพลเลตเวกเตอร์ปกติเหล่านั้นบนเส้นขอบและบนเส้นสแกนของโพลิกอนดังรูปที่ 3.11ข เวกเตอร์ปกติที่จุด J และ K จะถูกคำนวณโดยการอินเทอร์โพลเลตเวกเตอร์ปกติเหล่านั้นจากมุมของโพลิกอน และหลังจากนั้นเวกเตอร์ปกติที่ได้นี้จะถูกอินเทอร์โพลเลตไปบนเส้นสแกนซึ่งแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong จะถูกใช้กับทุกพิกเซลบนเส้นสแกน วิธีการนี้จะเป็นวิธีการให้แสงเงาแก่โพลิกอนได้ถูกต้องมากกว่า เนื่องจากแบบจำลองการส่องสว่างจะถูกใช้กับทุกๆ จุดบนโพลิกอนแทนที่จะเป็นการอินเทอร์โพลเลตสีที่มุม อย่างไรก็ตามแบบจำลองการให้แสงเงาแบบ Phong จะมีการคำนวณที่มากกว่าแบบจำลองของ Gouraud ไม่ใช่แค่เพียงเพราะว่าแบบจำลองการส่องสว่างถูกใช้บ่อยกว่า แต่ยังเป็นเพราะการอินเทอร์โพลเลตนั้นจำเป็นต้องทำการนอร์มอลไลซ์เวกเตอร์ปกติด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.5 การให้แสงเงากับการสร้างภาพเชิงปริมาตร

ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้นสามารถแยกความแตกต่างระหว่างการให้แสงเงาแบบ Phong และ Gouraud ได้เช่นเดียวกับการสร้างภาพของโพลิกอนในหัวข้อที่ผ่านมา โดยที่การให้แสงเงาแบบ Phong จะเป็นการอินเทอร์โพลาค่าความเข้มแสงของว็อกเซลและค่าเวกเตอร์ปกติที่จุดแซมเปิล แล้วใช้มันทั้งสองในแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong เพื่อคำนวณหาค่าสีของจุดแซมเปิล (รูปที่ 3.12ก)

ส่วนการให้แสงเงาแบบ Gouraud จะเป็นการคำนวณค่าแสงเงาของแต่ละว็อกเซลออกมา ก่อน จากนั้นจึงทำการอินเทอร์โพลาค่าสีที่ได้จากการให้แสงเงาไปยังจุดแซมเปิลที่ต้องการ (รูปที่ 3.12ข)



รูปที่ 3.12 การให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตร (ก) การให้แสงเงาแบบ Phong (ข) การให้แสงเงาแบบ Gouraud

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าเป้าหมายหลักของการให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรคือการช่วยให้เกิดความเข้าใจในการมองชุดข้อมูล ซึ่งการสร้างภาพให้มีลักษณะเหมือนภาพถ่ายนั้นไม่ใช่จุดประสงค์หลักของการสร้างภาพเชิงปริมาตร ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในการให้แสงเงาคือ องค์ประกอบการสะท้อนแสงแบบกระจายและแหล่งกำเนิดแสงสีขาว 1-2 แหล่งซึ่งมีตำแหน่งอยู่ที่อนันต์เท่านั้น ส่วนองค์ประกอบการสะท้อนแสงแบบกระจกและแสงเวดล้อมเป็นเพียงสิ่งที่ทำให้ภาพที่สร้างขึ้นดูแปลกตาไป ดังนั้นจึงสามารถละทิ้งได้

### 3.7 สรุป

คำจำกัดความและวิธีการต่างๆ ทางคอมพิวเตอร์กราฟิก เช่น การแปลงเรขาคณิตของข้อมูลภาพและการให้แสงเงา เป็นส่วนประกอบซึ่งใช้ช่วยในการสร้างภาพเชิงปริมาตรสามารถทำได้ดีขึ้น เช่น การแสดงชุดข้อมูลในมุมมองต่างๆ และการให้แสงเงาแก่ภาพที่สร้างขึ้น แต่ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรเป็นการแสดงถึงโครงสร้างของส่วนที่เกี่ยวข้องกันภายในปริมาตร ดังนั้นจึงต้องมีการนำทฤษฎีทางการประมวลผลภาพ เช่น การแบ่งกลุ่มข้อมูล มาประกอบด้วยซึ่งเนื้อหาในบทถัดไปจะกล่าวถึงทฤษฎีการประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับการสร้างภาพเชิงปริมาตร เช่น การแบ่งกลุ่มข้อมูล การอินเทอร์โพลต และการรวมองค์ประกอบภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับ การสร้างภาพเชิงปริมาตร

### 4.1 บทนำ

ความสามารถในการแสดงโครงสร้างและองค์ประกอบภายในชุดข้อมูล ซึ่งไม่สามารถอธิบายรูปร่างรวมถึงขอบเขตที่แน่นอนได้เป็นจุดเด่นของการสร้างภาพเชิงปริมาตร จากลักษณะเด่นนี้ทำให้สามารถมองเข้าไปในวัตถุและสำรวจโครงสร้างของมันแทนที่จะเป็นการมองเพียงแค่ส่วนพื้นผิวของวัตถุนั้น ในการแสดงข้อมูลซึ่งมีวัตถุต่างชนิดกันภายในปริมาตรนั้นจำเป็นต้องทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการเลือกแสดงส่วนที่สนใจโดยการกำหนดค่าความทึบแสงให้แก่ข้อมูลแต่ละกลุ่มแล้วทำการรวมองค์ประกอบภาพ (Image Composition) ของอวัยวะกลุ่มต่างๆ เหล่านี้เข้าด้วยกัน นอกเหนือจากนี้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้นการกระทำทางคณิตศาสตร์กับชุดข้อมูลเป็นสิ่งที่ไม่หลีกเลี่ยงไม่ได้ซึ่งในบางครั้งให้ผลที่อยู่ในรูปทศนิยมในขณะที่ลักษณะของข้อมูลที่ใช้เป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นจึงต้องมีการแทรกค่าหรือการอินเทอร์โพลเทชัน (Interpolation) ข้อมูลเพื่อลดความผิดพลาดจากการกระทำดังกล่าว เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Classification) การอินเทอร์โพลเทชัน และการรวมองค์ประกอบภาพ ซึ่งเป็นทฤษฎีการประมวลผลภาพที่สำคัญส่วนหนึ่งในการสร้างภาพเชิงปริมาตร

### 4.2 การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Classification)

การแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นขั้นตอนที่ช่วยให้สามารถสร้างภาพของชุดข้อมูลที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ ในขั้นตอนนี้จะมีการกำหนดคุณสมบัติใหม่ให้แก่ว็อกเซลแต่ละตัวภายในกลุ่มข้อมูลเรียกว่าค่าความทึบแสง (Opacity) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ถึงหนึ่ง ค่าความทึบแสงนี้ใช้สำหรับวัดความโปร่งแสงของว็อกเซลโดยเป็นการอธิบายถึงปริมาณแสงที่ตกกระทบไปที่ว็อกเซลและถูกดูดกลืนไว้โดยว็อกเซลนั้น หรือก็คือการมองทะลุว็อกเซลไปนั่นเอง การกำหนดค่าความทึบแสงให้แก่ว็อกเซลนั้นจำเป็นต้องมีการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสงเพื่อจัดความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของว็อกเซลกับค่าความทึบแสงที่มันควรจะเป็น ซึ่งเครื่องมือสำคัญในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนนี้

คือฮิสโทแกรม ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ฮิสโทแกรม (Histogram)

ฮิสโทแกรมเป็นตัวที่ใช้บอกถึงจำนวนของว็อกเซลหรือพิกเซลซึ่งมีค่าความเข้มแสงที่ระดับใดๆ ภายในชุดข้อมูล โดยแสดงเป็นกราฟที่มีแกนนอนเป็นค่าของว็อกเซลหรือพิกเซลและจำนวนหรือความถี่ของว็อกเซลที่ปรากฏในแต่ละค่าในแกนตั้ง (รูปที่ 4.1) ฮิสโทแกรมนั้นให้ข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายค่าของว็อกเซลหรือพิกเซลทั้งหมดที่เป็นไปได้ ทำให้สามารถมองเห็นการกระจายความเข้มแสงของว็อกเซลซึ่งใช้ช่วยสำหรับพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนที่จะนำมาใช้ในการแบ่งกลุ่มข้อมูล



รูปที่ 4.1 ฮิสโทแกรม

#### 4.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

การแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นขั้นตอนการกำหนดค่าความทึบแสงให้แก่ว็อกเซล ซึ่งค่าความทึบแสงนี้เป็นคุณสมบัติของว็อกเซลเช่นเดียวกับค่าความเข้มแสงและขนาดของเกรเดียนต์ โดยฟังก์ชันที่ใช้กำหนดค่าความทึบแสงนี้เรียกว่าฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง (Opacity Transfer Function) ฟังก์ชันนี้สามารถนำคุณสมบัติหลายๆ อย่างของว็อกเซลมาเป็นอินพุตได้ แต่ส่วนมากแล้วนิยมใช้เพียงแค่ฟังก์ชันค่าความเข้มแสงของว็อกเซลเพียงอย่างเดียวเท่านั้น หรือบางครั้งอาจเป็นฟังก์ชันค่าความเข้มแสงของว็อกเซลและขนาดเกรเดียนต์ ซึ่งลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง ( $\alpha$ ) จะอยู่ในรูปของ

$$\alpha = O(f_i, |\nabla f_i|, \dots) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $O()$  คือฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง  $f_i$  เป็นฟังก์ชันความเข้มแสง และ  $|\nabla f_i|$  คือขนาดของเกรเดียนต์ ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลโดยใช้ค่าความเข้มแสงเพียงอย่างเดียวนั้นเหมาะกับชุดข้อมูลภาพจากเครื่อง CT ซึ่งสามารถแยกช่วงของว็อกเซลแต่ละค่าได้ง่าย แต่สำหรับชุดข้อมูลภาพที่ได้จากเครื่อง MRI นั้นค่าระดับเทาของว็อกเซลที่อวัยวะแตกต่างกันอาจเป็นค่าเดียวกันได้ ซึ่งกรณีนี้การแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยการใช้ค่าความเข้มแสงของว็อกเซลเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องได้ ดังนั้นจึงต้องมีการนำข้อมูลส่วนอื่นมาพิจารณาร่วมด้วย ซึ่งข้อมูลเพิ่มเติมที่นำมา

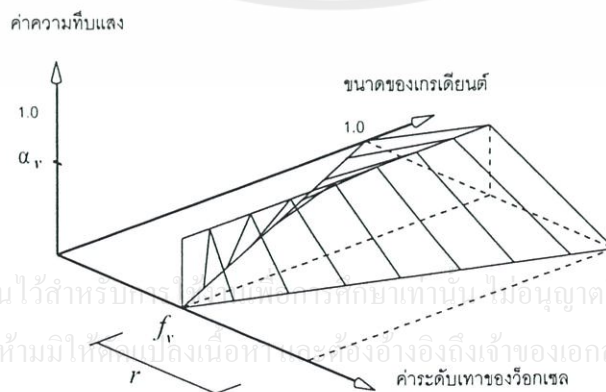
ใช้คือขนาดของเกรเดียนต์ โดยที่เกรเดียนต์คือการวัดความเร็วและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ดังนั้นบริเวณที่มีค่าเกรเดียนต์สูงจึงหมายถึงการที่บริเวณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอย่างรวดเร็ว จากคุณสมบัตินี้มันจึงเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับหาขอบเขตระหว่างวัสดุ 2 อย่าง เช่น บริเวณระหว่างเนื้อเยื่อและกระดูกในชุดข้อมูลทางการแพทย์

ดังนั้นฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลจึงเป็นการรวมเอาค่าขนาดของเกรเดียนต์กับค่าความเข้มแสงของว็อกเซลเข้าด้วยกันเพื่อใช้กำหนดให้ว็อกเซลที่อยู่บนพื้นผิวหรืออยู่ใกล้กับจุดต่อของวัสดุสองชนิดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรเดียนต์อย่างรวดเร็วให้มีค่าความทึบแสงมาก

รูปที่ 4.2 เป็นฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบหนึ่ง [9] ซึ่งใช้แสดงวัตถุเนื้อเดียว โดยกำหนดให้ค่าความเข้มแสงของว็อกเซลอยู่บนแกน  $x$  ส่วนแกน  $y$  เป็นขนาดของเกรเดียนต์ และแกน  $z$  เป็นค่าความทึบแสง ซึ่งลักษณะของมันจะคล้ายกับกระโจมผ้าใบ ในการใช้งานนั้นฟังก์ชันนี้จะถูกวางไปบนว็อกเซลซึ่งมีค่าความเข้มแสงที่ต้องการ ( $f_v$ ) ว็อกเซลทั้งหมดที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $f_v$  และว็อกเซลอื่นๆ รอบว็อกเซลนั้นที่มีขนาดของเกรเดียนต์ใกล้เคียงกันจะมีค่าความทึบแสงสูง สำหรับสมการของฟังก์ชันดังกล่าวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\alpha_i = \alpha_v \begin{cases} 1 & ; |\nabla f_i| = 0 \text{ \& } f_v = f_i \\ 1 - \frac{1}{r|\nabla f_i|} |f_v - f_i| & ; |\nabla f_i| > 0 \text{ \& } f_i - r|\nabla f_i| \leq f_v \leq f_i + r|\nabla f_i| \\ 0 & ; f_v > f_i + r|\nabla f_i| \end{cases} \quad (4.2)$$

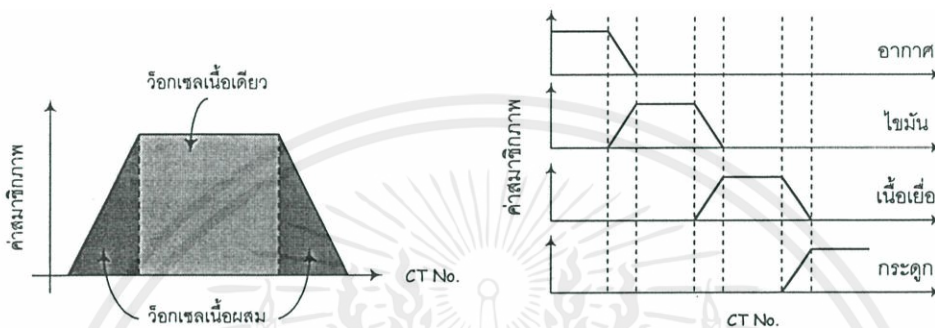
เมื่อ  $\alpha_i$  คือค่าความทึบแสงของว็อกเซล  $i$  ซึ่งอยู่บริเวณรอบๆ ว็อกเซลที่สนใจ  $\alpha_v$  คือค่าความทึบแสงที่กำหนดให้ว็อกเซลที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $f_v$   $f_i$  ค่าความเข้มแสงของว็อกเซล  $i$  ซึ่งอยู่บริเวณรอบว็อกเซลที่สนใจ  $|\nabla f_i|$  คือขนาดของเกรเดียนต์ที่ว็อกเซล  $i$  ซึ่งมีค่าความเข้มแสง  $f_i$  และ  $r$  คือค่าความเข้มแสงสูงสุดที่กำหนดให้ป้ายเบนจาก  $f_v$  เมื่อค่าเกรเดียนต์เปลี่ยนแปลงไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร... ไม่ว่ากรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่สิ่งนี้อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลสำหรับวัตถุเนื้อเดียว

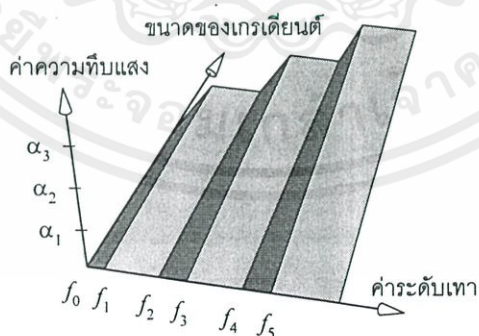
สำหรับฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบขึ้นจากขนาดของเกรเดียนต์และลักษณะโดยทั่วไปของว็อกเซลภายในชุดข้อมูล ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือ ว็อกเซลเนื้อเดียวและว็อกเซลเนื้อผสม [12] ซึ่งว็อกเซลเนื้อเดียวนั้นจะมีวัสดุเพียงชนิดเดียวอยู่ภายในว็อกเซลนั้น ส่วนว็อกเซลเนื้อผสมเกิดจากการที่มีวัสดุ 2 ชนิดซึ่งมีกลุ่มข้อมูลติดกันประกอบอยู่ภายใน เช่น ไขมันและเนื้อเยื่อ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะโดยทั่วไปและการแบ่งแยกกลุ่มของว็อกเซลในชุดข้อมูล CT

ฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสงที่สร้างขึ้นจากขนาดของเกรเดียนต์และลักษณะของว็อกเซลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{|\nabla f_i|}{f_{n+1} - f_n} [\alpha_n (f_{n+1} - f_i) + \alpha_{n+1} (f_i - f_n)] & ; n = 0, 2, 4 \\ \alpha_n |\nabla f_i| & ; n = 1, 3, 5 \end{cases} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง

จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนเพียงแบบเดียวไม่สามารถนำไปใช้กับข้อมูลทุกรูปแบบได้ ซึ่งการเลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลที่ต้องการสร้างภาพ ในปัจจุบันวิธีการที่นิยมใช้กันอยู่ [6], [7], [9], [10] คือการตรวจสอบชุดข้อมูลและทำการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ฟังก์ชันถ่าย

โหนดจะถูกปรับปรุงแบบซ้ำไปซ้ำมาแล้วเลือกภาพผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่สามารถแสดงถึงโครงสร้างซึ่งสนใจได้อย่างชัดเจน ในความเป็นจริงนั้นยังมีตัวแปรอีกหลายตัวซึ่งมีผลกับภาพผลลัพธ์ เช่น แบบจำลองการให้แสงเงา ทิศทางการมองและตัวดำเนินการการรวมองค์ประกอบภาพ ดังนั้นการปรับปรุงฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นจึงเป็นสิ่งที่สร้างความยุ่งยากมากแม้ว่าจะเป็นการคำนวณแบบง่าย ๆ ก็ตาม

### 4.3 การอินเทอร์โพลเลท (Interpolation) [14]

การกระทำทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการฉายแสง (Ray Casting) เพื่อทำการสร้างภาพนั้นในบางครั้งจำเป็นต้องมีการเข้าถึงข้อมูลในตำแหน่งที่อยู่ระหว่างจุดแซมเปิลซึ่งเป็นบริเวณที่ข้อมูลขาดหายไป ดังนั้นจึงต้องมีการแทรกค่าหรือการอินเทอร์โพลเลทค่าของจุดแซมเปิลที่ขาดหายไปเหล่านี้ การอินเทอร์โพลเลทมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะถูกควบคุมโดยเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลท (Interpolation Kernel) และรูปร่างของเคอร์เนลจะเป็นตัวกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สำหรับถ่วงน้ำหนักการบวกและคุณภาพของการอินเทอร์โพลเลท

การคำนวณค่าในตำแหน่งที่ต้องการอินเทอร์โพลเลทนั้นทำได้โดยนำเคอร์เนลการอินเทอร์โพลเลทไปคูณโวลูชันกันดังนี้

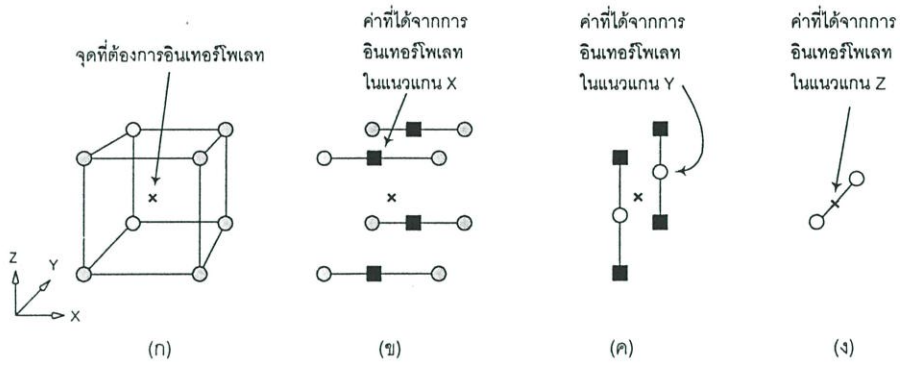
$$f_n(x) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} g_s(l\Delta x) h_n(x-l\Delta x) \quad (4.4)$$

เมื่อ  $f_n(x)$  คือผลลัพธ์ที่ได้จากการอินเทอร์โพลเลท และ  $h_n$  คือเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลท ส่วนกรณี 2 มิตินั้นการอินเทอร์โพลเลทจะเป็นดังสมการที่ 4.5

$$f_n(x, y) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g_s(l\Delta x, k\Delta y) h_n(x-l\Delta x, y-k\Delta y) \quad (4.5)$$

เคอร์เนลการอินเทอร์โพลเลทแบบ 1 มิติ สามารถขยายไปใช้ใน 2 และ 3 มิติได้ดังรูปที่ 4.5 โดยเริ่มจากการอินเทอร์โพลเลทแบบ 1 มิติในแนวแกน x, y และ z ดังรูปที่ 4.5ข 4.5ค และ 4.5ง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



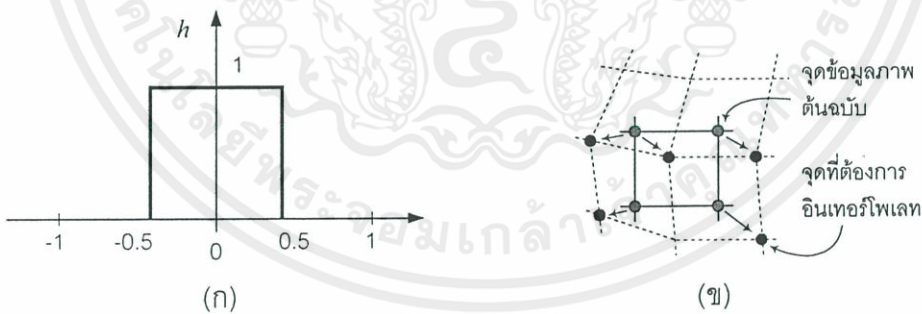
รูปที่ 4.5 การอินเทอร์โพลเทแบบสามมิติ

4.3.1 การอินเทอร์โพลเทแบบเนียร์เนสเนบอร์ (Nearest Neighbor)

การอินเทอร์โพลเทด้วยวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดแต่ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าหยาบมาก ลักษณะโดยทั่วไปนั้นจะเป็นการนำค่าที่อยู่ใกล้จุดที่ต้องการอินเทอร์โพลเทมากที่สุดมาเป็นคำตอบ ซึ่งสมการการอินเทอร์โพลเทในหนึ่งและสองมิติและแสดงดัง (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ รูปร่างของเคอร์เนลสำหรับการอินเทอร์โพลเทชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่ามีเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่ถูกประมวลผล ดังนั้นการคำนวณในแต่ละวงรอบจึงมีน้อยมาก

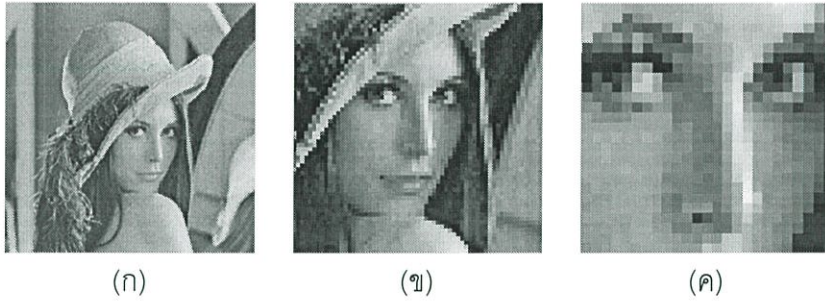
$$f(x) = g(\text{round}(x)) \tag{4.6}$$

$$f(x, y) = g(\text{round}(x), \text{round}(y)) \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.6 (ก) เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเทแบบเนียร์เนสเนบอร์ (ข) ลักษณะของการอินเทอร์โพลเทด้วยวิธีเนียร์เนสเนบอร์

ข้อเสียของการอินเทอร์โพลเทแบบนี้คือผลกระทบจากอแลสซิง (Aliasing) ซึ่งสังเกตได้เอกสารจากสี่เหลี่ยมเล็กๆ ภายในภาพที่ได้จากการขยาย 2 และ 5 เท่า ดังรูปที่ 4.7ข และ 4.7ค ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

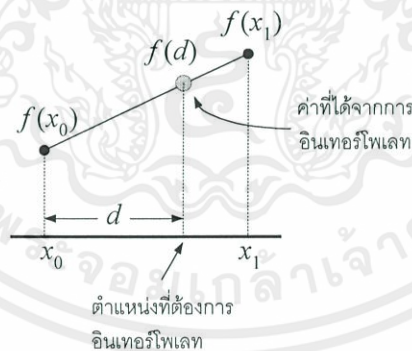


รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการขยายภาพโดยใช้เนียร์เนบอร์ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพที่ได้จากการขยาย 2 เท่า (ค) ภาพที่ได้จากการขยาย 5 เท่า

ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของการอินเทอร์โพลแบบเนียร์เนบอร์คือการเลือนของภาพ ซึ่งการบิดค่าของเนียร์เนบอร์เป็นสาเหตุให้ภาพเลือนขึ้นไปครึ่งถึงหนึ่งพิกเซลซึ่งมีผลอย่างมากในกรณีที่มีการประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของวัตถุภายในภาพ แต่ข้อดีของการอินเทอร์โพลแบบเนียร์เนบอร์ก็คือความต้องการจำนวนรอบในการประมวลผลน้อย

#### 4.3.2 การอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์ (Linear Interpolation)

การอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุด ซึ่งภาพผลลัพธ์มีคุณภาพที่ดีกว่าการอินเทอร์โพลแบบเนียร์เนบอร์ วิธีการนี้จะสมมติให้จุดที่อยู่ล้อมรอบจุดที่ต้องการอินเทอร์โพลมีความสัมพันธ์เป็นแบบลิเนียร์ดังรูปที่ 4.8



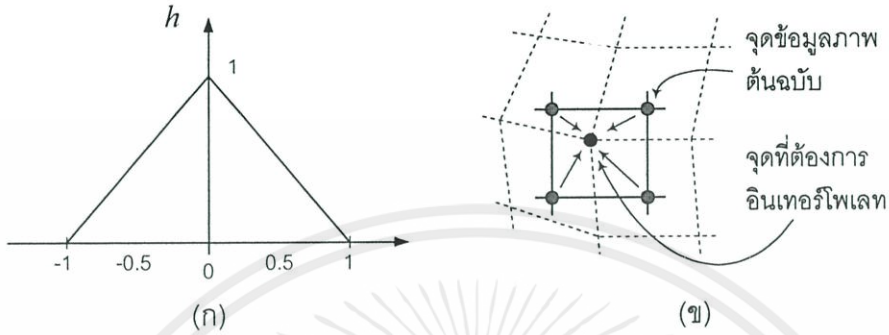
รูปที่ 4.8 การกำหนดความสัมพันธ์ของจุดแซมเปิลในการอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์

สำหรับสมการการอินเทอร์โพลชนิดนี้แสดงดังสมการที่ 4.8

$$f(d) = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \cdot d + f(x_0) \quad (4.8)$$

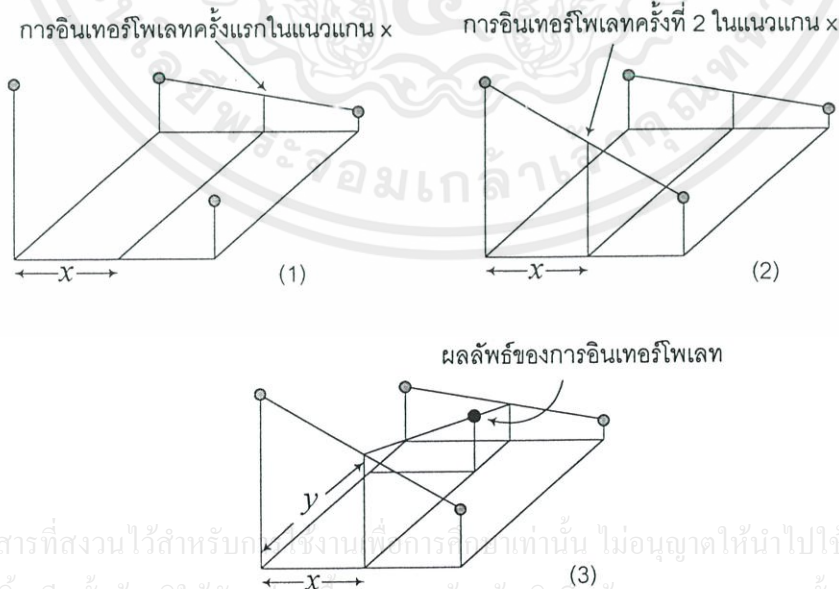
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $d$  คือระยะทางจากจุดแซมเปิลจุดแรกที่ตำแหน่ง  $x_0$  ส่วนใหญ่แล้วระยะห่างของการสุ่ม จะกำหนดให้มีค่าคงที่และเท่ากันตลอด (ปกติมีค่าเท่ากับ 1) ซึ่งลักษณะของเคอร์เนลการอินเทอร์โพลเป็นดังรูปที่ 4.9



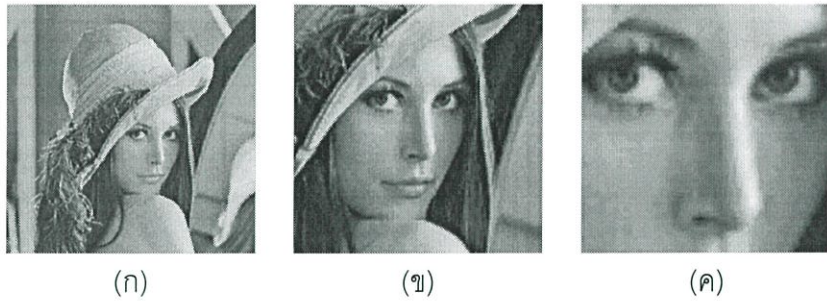
รูปที่ 4.9 (ก) เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์ (ข) ลักษณะของการอินเทอร์โพล

การอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์สามารถนำไปใช้กับสัญญาณในมิติที่สูงขึ้นได้ โดยเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณสองมิติจะเรียกว่า การอินเทอร์โพลแบบไบลิเนียร์ (Bilinear Interpolation) และในกรณีสามมิติเรียกว่า การอินเทอร์โพลแบบไตรลิเนียร์ (Trilinear Interpolation) สำหรับการอินเทอร์โพลแบบไบลิเนียร์จะเริ่มจากการหาจุดที่ทราบค่า 4 จุดซึ่งล้อมรอบจุดที่ต้องการอินเทอร์โพล จากนั้นทำการอินเทอร์โพลในแนวแกน  $x$  ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปใช้อินเทอร์โพลในแนวแกน  $y$  ต่อไป ดังรูปที่ 4.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลที่ทำงานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 ขั้นตอนการอินเทอร์โพลแบบไบลิเนียร์

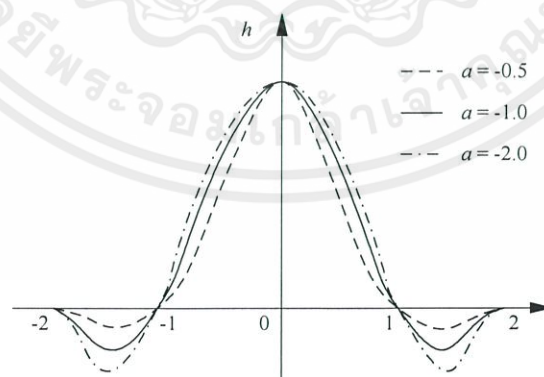


รูปที่ 4.11 ผลลัพธ์ที่ได้จากการขยายภาพโดยใช้การอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพที่ได้จากการขยาย 2 เท่า (ค) ภาพที่ได้จากการขยาย 5 เท่า

สำหรับการอินเทอร์โพลแบบไตรลิเนียร์แสดงดังรูปที่ 4.5 การคำนวณเริ่มจากการทำอินเทอร์โพลแบบไบลิเนียร์ก่อน 2 ครั้ง ซึ่งครั้งแรกสำหรับด้านหน้าของลูกบาศก์ในรูปที่ 4.5 และอีกครั้งที่ด้านหลังของลูกบาศก์ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้อินเทอร์โพลในแนวแกน Y (รูปที่ 4.5ค) และสุดท้ายจะเป็นอินเทอร์โพลในแนวแกน z ดังรูปที่ 4.5ง

#### 4.3.3 การอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชัน (Cubic Convolution Interpolation)

การอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชันเป็นวิธีการที่ให้คุณภาพที่ดีกว่าการอินเทอร์โพลแบบไบลิเนียร์แต่ทว่ามันใช้การคำนวณที่มากกว่า รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลชนิดนี้ จะเห็นได้ว่าความกว้างของมันมีค่าเท่ากับ 4 หน่วย ในขณะที่ความกว้างของเคอร์เนลในการอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์นั้นมีค่าเท่ากับ 2 หน่วย ดังนั้นการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.12 เคอร์เนลการอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ในการอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชันนี้จะมี  $a$  เป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งใช้สำหรับควบคุมรูปร่างและความชันของเคอร์เนล โดยลักษณะของเคอร์เนลแสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อ

a มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นรูปร่างของมันจะชันและกินบริเวณออกไปด้านข้างมากขึ้น นิยามของฟังก์ชันควิเบคคอนโวลูชันแสดงดังสมการที่ 4.9

$$f(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1 & 0 \leq |x| \leq 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a & 1 \leq |x| \leq 2 \\ 0 & |x| > 2 \end{cases} \quad (4.9)$$

ในทางปฏิบัติแล้วค่า a จะอยู่ระหว่าง -3 กับ 0 ซึ่งภาพผลลัพธ์จะเบลอมากขึ้นเมื่อ a มีค่าเข้าใกล้ 0 และจะคมชัดขึ้นเมื่อ a มีค่าเข้าใกล้ -3 ตามปกติการใช้ค่า a เท่ากับ -0.5 จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สำหรับสมการการอินเทอร์โพลทในรูปแบบประสิทธิภาพของเคอร์เนลที่จุด d เขียนได้ดังนี้

$$f(d) = c_0 p_0 + c_1 p_1 + c_2 p_2 + c_3 p_3 \quad (4.10)$$

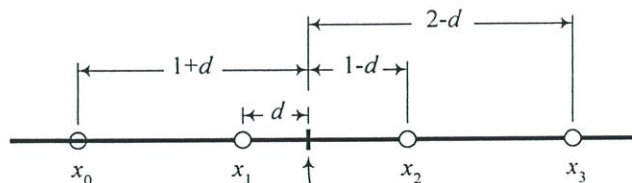
เมื่อ  $p_0, p_1, p_2$  และ  $p_3$  คือค่าของฟังก์ชันที่จุด  $x_0, x_1, x_2$  และ  $x_3$  ส่วน  $c_0, c_1, c_2$  และ  $c_3$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของเคอร์เนลซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c_0 &= a(1+d)^3 - 5a(1+d)^2 + 8a(1+d) - 4a \\ &= ad^3 - 2ad^2 + ad \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$c_1 = (a+2)d^3 - (a+3)d^2 + 1 \quad (4.12)$$

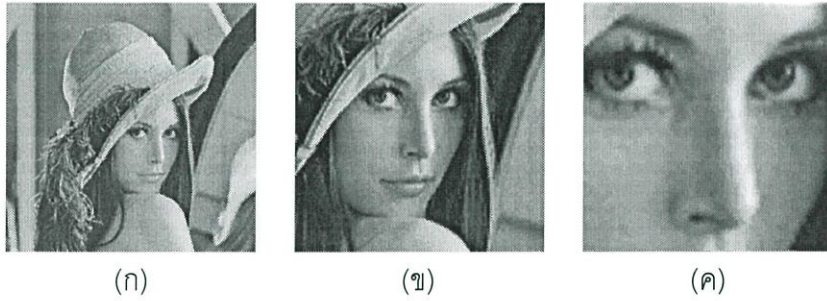
$$\begin{aligned} c_2 &= (a+2)(1-d)^3 - (a+3)(1-d)^2 + 1 \\ &= (-1)(a+2)d^3 + (2a+3)d^2 - ad \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} c_3 &= a(2-d)^3 - 5a(2-d)^2 + 8a(2-d) - 4a \\ &= -ad^3 + ad^2 \end{aligned} \quad (4.14)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 การอินเทอร์โพลทแบบควิเบคคอนโวลูชันที่จุด d



รูปที่ 4.14 ผลลัพธ์ที่ได้จากการขยายภาพโดยใช้การอินเทอร์โพลแบบควบิคคอนโวลูชัน

(ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพที่ได้จากการขยาย 2 เท่า (ค) ภาพที่ได้จากการขยาย 5 เท่า

#### 4.4 การรวมองค์ประกอบภาพ (Image Composition)

การรวมองค์ประกอบภาพ (Image Composition) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยจะเป็นการรวมจุดแซมเปิลต่างๆ ที่เกิดจากการเดินทางของแสงแต่ละชั้นและการอินเทอร์โพล เพื่อคำนวณหาค่าพิกเซลผลลัพธ์ของการสร้างภาพ โดยที่ภาพของวัตถุต่างชนิดซึ่งมีค่าความทึบแสงไม่เท่ากันภายในปริมาตรจะถูกแสดงออกมาพร้อมกัน การรวมองค์ประกอบภาพเป็นการกระทำที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการทำนายถึงสีของพิกเซลที่เกิดจากเซ็ทของจุดแซมเปิลเหล่านี้จึงเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก

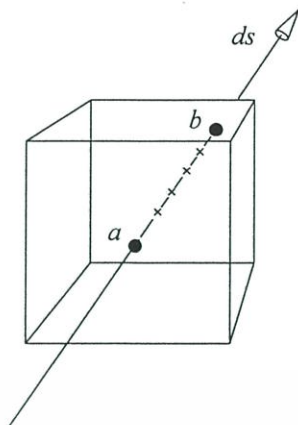
##### 4.4.1 สมการการสร้างภาพเชิงปริมาตร

การสร้างภาพด้วยการฉายแสง (Ray Casting) ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 นั้นเป็นการประมวลจุดข้อมูลทั้งหมดภายในปริมาตรที่บรรจุชุดข้อมูล โดยที่สมมติว่าพหุติกรรมภายในปริมาตรมีลักษณะการกระเจิง การปิดกั้น การสะท้อน และการกำเนิดแสงที่แน่นอน

ผลของแสงที่ฉายไปกระทบกับแซมเปิลของชุดข้อมูลตามแนวแสงจะถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อคำนวณหาสีผลลัพธ์ของพิกเซลหนึ่งจุดดังสมการที่ 4.15 ซึ่งเป็นสมการของการสร้างภาพเชิงปริมาตร [15]

$$I(a,b) = \int_a^b e^{-\int_a^s \phi(x) dx} \epsilon(s) ds \quad (4.15)$$

สมการ 4.15 นี้มีพื้นฐานอยู่บนพหุติกรรมของแสงเมื่อกระทบกับชุดข้อมูลเชิงปริมาตร จากสมการ  $I(a,b)$  คือค่าความเข้มแสงของพิกเซลหนึ่งจุด  $ds$  คือทิศทางของแสง และสมมติให้แสงวิ่งจากจุด  $a$  ไปยังจุด  $b$  (รูปที่ 4.15) โดยที่  $\epsilon(s)$  เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของปริมาตรและ  $\phi(x)$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการลดลงของแสงและเป็นตัวที่ใช้นิยามอัตราของแสงที่ถูกกำบังต่อหน่วยความยาวเนื่องจากการกระเจิงหรือการลดลงของแสง



รูปที่ 4.15 แสงที่พุ่งเข้าไปในปริมาตร

สมการที่ 4.15 นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้ผลรวมรีมันน์ (Riemann Sum) ดังนี้

จาก 
$$\int_0^d h(x) dx \approx \sum_{i=0}^{n-1} h(x_i) \Delta x \quad (4.16)$$

เมื่อนำสมการที่ 4.16 ไปใช้กับสมการที่ 4.15 สมการการสร้างภาพเชิงปริมาตรในรูปดิฟเฟอเรนเชียลจะเป็น

$$I(a, b) = \sum_{i=0}^{n-1} e^{-\sum_{j=0}^{i-1} \phi(x_j) \Delta x} \varepsilon(s_i) \Delta s \quad (4.17)$$

เมื่อกำหนด

$$\phi_j = \phi(x_j) \quad (4.18)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon(x_i) \quad (4.19)$$

แทน 4.18 และ 4.19 ใน 4.17

$$I(a, b) = \sum_{i=0}^{n-1} e^{-\sum_{j=0}^{i-1} \phi_j \Delta x} \varepsilon_i \Delta s \quad (4.20)$$

ลดรูปสมการ 4.20 โดยใช้คุณสมบัติผลบวกของเลขยกกำลังจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

$$I(a, b) = \sum_{i=0}^{n-1} \varepsilon_i \Delta s \prod_{j=0}^{i-1} e^{-\phi_j \Delta x} \quad (4.21)$$

เมื่อกำหนดนิยามค่าความทึบแสง ( $\alpha_j$ ) ความเข้มแสงที่สะท้อนจากพื้นผิว ( $I_j$ ) และค่าสีของจุดแซมเปิลที่ผ่านการให้แสงเงามาแล้ว ( $C_i$ ) ดังนี้

$$\alpha_j = 1 - e^{-\phi_j \Delta x} \quad (4.22)$$

$$I_i = \epsilon_i \Delta s \quad (4.23)$$

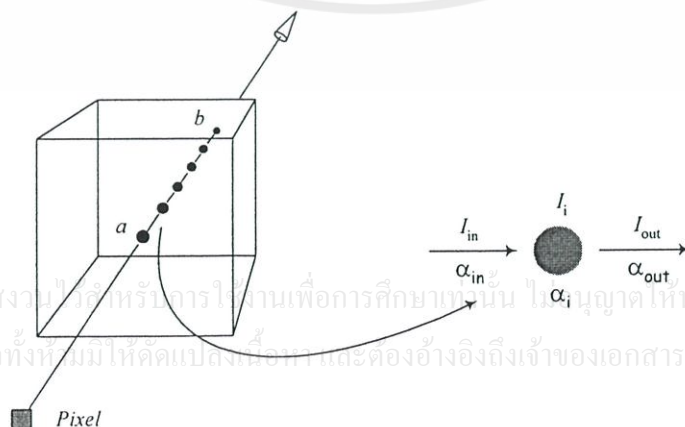
$$C_i = \frac{I_i}{\alpha_i} \quad (4.24)$$

แทนค่าจาก 4.22, 4.23 และ 4.24 ใน 4.21 จะได้สมการการรวมองค์ประกอบภาพตามแนวลำแสงซึ่งประกอบขึ้นจากพจน์ของค่าความทึบแสงและค่าความเข้มแสงที่ผ่านการให้แสงเงามาแล้ว

$$I(a,b) = \sum_{i=0}^{n-1} I_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \alpha_j) \quad (4.25)$$

#### 4.4.2 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง (Front To Back Composition)

สมการ 4.25 ที่ผ่านมามีเรียกอีกอย่างว่าสมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง สมการนี้เป็นการอธิบายถึงความเข้มแสง  $I$  ทั้งหมดที่ถูกสะสมมาตามแนวลำแสงจนถึงจุดแซมเปิลที่มีความเข้มแสงเป็น  $I_i$  คุณกับค่าความทึบแสงที่สะสมมาจนถึงปัจจุบันบนลำแสงนั้น จะเห็นได้ว่า  $I_i$  ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยจุดแซมเปิลที่อยู่ก่อนหน้านั้นทั้งหมด ในรูปที่ 4.16 ทางด้านซ้ายเป็นตัวอย่างของการรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลังบนลำแสงหนึ่งเส้น จุดแซมเปิลที่ถูกประกอบเข้าไปในภาพจะเริ่มจากจุด  $a$  ไปยังจุด  $b$  ส่วนรูปที่ 4.16 ทางด้านขวาเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนจุดแซมเปิล ค่าความเข้มแสง  $I_{in}$  และ  $\alpha_{in}$  จะถูกประกอบเข้าไปในจุดแซมเปิลนี้ ซึ่งการรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลังของ  $I_i$  และ  $\alpha_i$  ด้วย  $I_{in}$  และ  $\alpha_{in}$  จะทำให้เกิด  $I_{out}$  และ  $\alpha_{out}$  ค่าใหม่ขึ้น



รูปที่ 4.16 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง

ในการคำนวณหาค่า  $I(a, b)$  นั้นจำเป็นต้องทำการคำนวณสมการกระจายแสงแบบรีเคอร์ซีฟ (Recursive) ซึ่งการคำนวณนี้จะอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นเมื่อกระจายสมการที่ 4.25 ออกมาดังนี้

$$\sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=0}^{i-1} (1-\alpha_j) = I_0 + I_1(1-\alpha_0) + I_2(1-\alpha_0)(1-\alpha_1) + \dots + I_n(1-\alpha_0)\dots(1-\alpha_{n-1}) \quad (4.26)$$

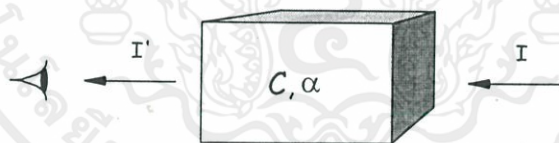
จากสมการที่ 4.26 นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นได้อีกโดยใช้ตัวดำเนินการ over ซึ่งตัวดำเนินการนี้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย T. Porter และ T. Duff [12] นิยามของตัวดำเนินการนี้คือ

$$C \text{ over } I = C + (1-\alpha)I \quad (4.27)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ 4.27 จะเป็นค่าความเข้มแสงซึ่งทะลุผ่านพื้นผิวออกมา นั่นคือถ้ามีแสง  $I$  พุ่งเข้ามาทางด้านหลังของพื้นผิวซึ่งมีความทึบแสงคือ  $\alpha$  และมีสีเนื่องจากการสะท้อนเป็น  $C$  ดังนั้นความเข้มแสงที่ทะลุผ่านพื้นผิว  $I'$  (รูปที่ 4.17) จะมีค่าเป็น

$$I' = C \text{ over } I \quad (4.28)$$

$$= C + (1-\alpha)I \quad (4.29)$$



รูปที่ 4.17 ลักษณะของแสงซึ่งพุ่งทะลุผ่านพื้นผิวออกมา

เมื่อนำตัวดำเนินการ over นี้ไปใช้กับสมการที่ 4.26 จะได้

$$\sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=0}^{i-1} (1-\alpha_j) = I_0 \text{ over } I_1 \text{ over } I_2 \dots \text{ over } I_n \quad (4.30)$$

นอกจากนี้สมการ 4.30 ยังสามารถเขียนแบบรีเคอร์ซีฟได้อีกคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้ไปเผยแพร่ต่อสาธารณชนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

$$I_{out} = I_{in} + (1-\alpha_{in})I_i \quad (4.31)$$

$$\alpha_{out} = \alpha_{in} + \alpha_i(1-\alpha_{in}) \quad (4.32)$$

โดยที่  $I_{out}$  และ  $\alpha_{out}$  คือค่าความเข้มแสงที่ถูกสะสมและค่าความทึบแสงที่เพิ่งออกมาจากจุดแซมเปิลปัจจุบัน ค่า  $I_{in}$  และ  $\alpha_{in}$  คือค่าความเข้มแสงและค่าความทึบแสงสะสมก่อนที่แสงจะเข้าไปกระทบจุดแซมเปิล ค่า  $I_i$  และ  $\alpha_i$  คือความเข้มแสงและค่าความทึบแสงของจุดแซมเปิลปัจจุบัน

จะเห็นได้ว่าในการรวมองค์ประกอบภาพแบบนี้จำเป็นต้องติดตามและสะสมค่าความทึบแสงเอาไว้ ซึ่งการทำเช่นนี้มีทั้งข้อดีและเสีย ข้อเสียคือการสร้างภาพใช้เวลานานขึ้นเนื่องจากโปรแกรมจำเป็นต้องคำนวณสมการค่าความทึบแสงที่จุดแซมเปิลทุกๆ จุด แต่ข้อดีก็คือในการเขียนโปรแกรมนั้นสามารถหยุดการคำนวณได้เมื่อค่าความทึบแสงสะสมมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1.0 ซึ่งเหตุผลของปรากฏการณ์นี้มาจากหลักความจริงที่ว่าถ้ามีวัตถุวางเรียงกันอยู่โดยที่แต่ละชั้นมีค่าความทึบแสงไม่เท่ากัน ตาของมนุษย์จะสามารถมองเห็นได้ถึงวัตถุชั้นหนึ่ง นั่นคือความทึบแสงที่สะสมมาในแต่ละชั้นเมื่อรวมกันทำให้ความทึบแสงมีค่ามากขึ้นจนสามารถตีความได้ว่าวัตถุในชั้นนั้นทึบแสงโดยสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นการคำนวณบนลำแสงเส้นนั้นต่อไปจึงเป็นการคำนวณที่ไร้ประโยชน์ ซึ่งวิธีการนี้ถูกเรียกว่า การสิ้นสุดลำแสงก่อน (Early Ray Termination)

#### 4.4.3 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้า (Back To Front Composition)

การรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้าแสดงดังรูปที่ 4.18 การรวมองค์ประกอบภาพแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับวิธีการในหัวข้อที่ผ่านมา จากรูปจะเห็นได้ว่าระนาบภาพนั้นอยู่ในตำแหน่งเดียวกับในรูปที่ 4.16 แต่ต่างกันที่ลำดับของจุดแซมเปิลซึ่งจะถูกประมวล สมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้าแสดงดังสมการที่ 4.33

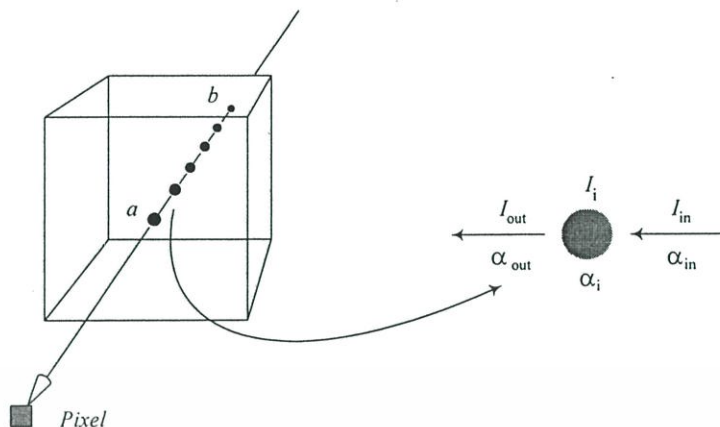
$$I(a,b) = \sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=i+1}^n (1 - \alpha_j) \quad (4.33)$$

หรือเขียนเป็นสมการแบบรีเคอร์ซีฟดังนี้

$$I_{out} = I_{in}(1 - \alpha_i) + I_i \quad (4.34)$$

เมื่อ  $I_{out}$  และ  $\alpha_{out}$  คือค่าความเข้มแสงที่ถูกสะสมและค่าความทึบแสงทั้งหมดหลังจากที่แสงกระทบกับจุดแซมเปิลปัจจุบัน ค่า  $I_{in}$  และ  $\alpha_{in}$  คือค่าความเข้มแสงและค่าความทึบแสงสะสมก่อนที่แสงจะเข้าไปกระทบจุดแซมเปิล ค่า  $I_i$  และ  $\alpha_i$  คือความเข้มแสงและค่าความทึบแสงของจุดแซมเปิลปัจจุบัน

ไม่ว่าแซมเปิลปัจจุบันนี้ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้า

ผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีการนี้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่ความแตกต่างของทั้งสองวิธีนั้นเห็นได้ชัดจากอัลกอริทึม โดยที่การรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลังนั้นจำเป็นต้องมีการสะสมค่าความโปร่งแสงทุกครั้งที่ทำกรรวมองค์ประกอบภาพ ในขณะที่การรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้านั้นไม่จำเป็น แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้ไม่สามารถนำการลื่นสุดลำแสงก่อนมาใช้ได้

#### 4.4.4 ค่าความโปร่งแสงและค่าความทึบแสง

จากสมการการรวมองค์ประกอบภาพที่ผ่านมาเป็นการใช้ค่าความทึบแสงในการอธิบายการทำงาน ทั้งนี้เนื่องจากความทึบแสงนิยมใช้บรรยายลักษณะการดูดกลืนแสงของวัตถุ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้อธิบายลักษณะการดูดกลืนแสงของวัตถุอีกตัวหนึ่งคือค่าความโปร่งแสง โดยที่ค่าความโปร่งแสงนั้นเป็นส่วนเติมเต็มของค่าความทึบแสงดังนี้

$$T = 1 - \alpha \tag{4.35}$$

ดังนั้นสมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลังสามารถเขียนในรูปของค่าความโปร่งแสงได้ดังนี้

$$I_{out} = I_{in} + T_{in}I_i \tag{4.36}$$

$$T_{out} = T_{in}T_i \tag{4.37}$$

ในทำนองเดียวกันสมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้าในรูปค่าความโปร่งแสงคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (4.38)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จะเห็นได้ว่าการใช้ค่าความโปร่งแสงในสมการการรวมองค์ประกอบภาพนั้นมีการคำนวณที่น้อยกว่าการใช้ค่าความทึบแสงอยู่ 1 ขั้นตอน

#### 4.5 สรุป

จากเนื้อหาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าขั้นตอนต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับการสร้างภาพเชิงปริมาตร นั้นค่อนข้างซับซ้อนและใช้การคำนวณมาก เช่น การแปลงเรขาคณิตของปริมาตร การให้แสงเงา การแบ่งกลุ่มข้อมูล การอินเทอร์โพล และ การรวมองค์ประกอบภาพ ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคในการเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายและน่าสนใจ เนื้อหาในบทถัดไปจะกล่าวถึงการแปลงระยะทางแบบต่างๆ และการประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร

### 5.1 บทนำ

การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์จำเป็นต้องมีการทำงานกับชุดข้อมูลซึ่งประกอบขึ้นจากจุดข้อมูลจำนวนมากมาย ทำให้ต้องใช้เวลาในการสร้างภาพนาน แต่จากจุดเด่นของภาพชนิดนี้ในการแสดงโครงสร้างส่วนเกี่ยวเนื่องของอวัยวะได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับภาพเชิงพื้นผิว จึงได้เกิดความพยายามค้นหาวิธีการเพื่อให้การสร้างภาพในแต่ละมุมมองสามารถทำได้รวดเร็วขึ้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงระยะทางดิจิทัลแบบต่างๆ และแนวคิดในการนำการแปลงระยะทางไปใช้เพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร

### 5.2 การวัดระยะทาง (Distance Measurement)

ในงานบางประเภทจำเป็นต้องหาระยะทางระหว่างพิกเซล 2 พิกเซล หรืออาจเป็นระยะทางระหว่างวัตถุกับตำแหน่งใดๆ ภายในภาพ การให้ค่าจำกัดความของระยะทางในภาพดิจิทัลนั้นสามารถทำได้ดังนี้

เมื่อกำหนด  $p$ ,  $q$  และ  $r$  เป็นพิกเซลที่อยู่ภายในภาพ  $dist_M(p, q)$  เป็นระยะทางระหว่างจุด  $p$  และ  $q$  ซึ่งคำนวณโดยการใช้เมตริกซ์  $M$  ระยะทางในภาพดิจิทัลนั้นจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1.  $dist_M(p, q) \geq 0$  และ  $dist_M(p, q) = 0$  ในกรณีที่  $p = q$
2.  $dist_M(p, q) = dist_M(q, p)$
3.  $dist_M(p, r) \leq dist_M(p, q) + dist_M(q, r)$

มีเมตริกซ์ระยะทางอยู่หลายแบบที่ใช้ในเรขาคณิตดิจิทัล (Digital Geometry) สิ่งหนึ่งซึ่งใช้แสดงลักษณะของระยะทางแบบต่างๆ คือดิสก์ (Disc) โดยที่ดิสก์รัศมี  $k$  ภายใต้เมตริกซ์ระยะทางคือเซตหรือกลุ่มของพิกเซลที่มีระยะทางน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $k$  ซึ่งสอดคล้องกับเมตริกซ์ระยะทางนั้น เมตริกซ์ระยะทางที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมีดังนี้คือ

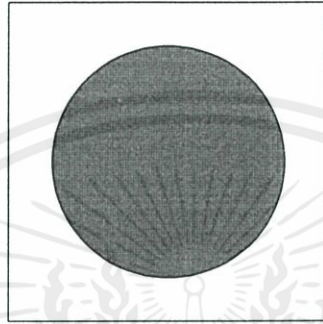
#### 5.2.1 ระยะทางแบบยูคลิเดียน (Euclidean Distance)

ระยะทางแบบนี้นิยมใช้ในการวัดระยะทางระหว่างจุดสองจุด เมื่อกำหนดจุด  $p = (p_x, p_y)$  และ  $q = (q_x, q_y)$  ระยะทางแบบยูคลิเดียนของทั้งสองจุดนี้คือ

$$dist_e(p, q) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (5.1)$$

$$dist_E(p, q) = (p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2 \quad (5.2)$$

สมการ 5.1 เป็นการคำนวณระยะทางยูคลิเดียนที่แท้จริงในขณะที่สมการที่ 5.2 เรียกว่า ระยะทางยูคลิเดียนกำลังสอง

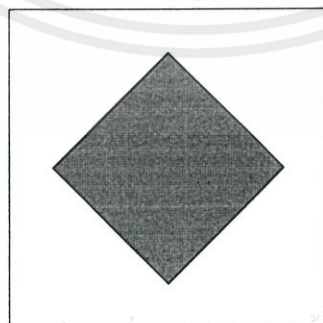


รูปที่ 5.1 ดิสก์ของระยะทางยูคลิเดียน

### 5.2.2 ระยะทางแบบชิตีบล็อก (City Block Distance)

ระยะทางแบบชิตีบล็อกหรือมีอีกชื่อหนึ่งว่าระยะทางแบบแมนฮัตตัน (Manhattan Distance) ระยะทางแบบนี้เป็นการประมาณหยาบๆ ของระยะทางยูคลิเดียนแต่จะให้ระยะที่มากกว่า ซึ่งระยะทางระหว่างจุด  $p$  และ  $q$  มีนิยามดังนี้

$$dist_{City}(p, q) = |p_x - q_x| + |p_y - q_y| \quad (5.3)$$



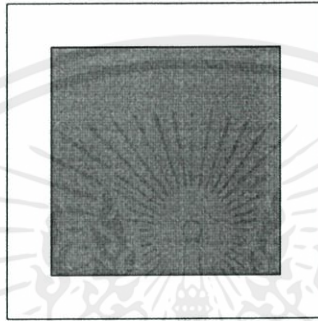
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 ดิสก์ของระยะทางแบบชิตีบล็อก

### 5.2.3 ระยะทางแบบเชสบอร์ด (Chessboard Distance)

ระยะทางแบบเชสบอร์ดเป็นการประมาณหยาบๆ ของระยะทางยูคลิเดียนอีกชนิดหนึ่งแต่จะให้ระยะที่สั้นกว่า ซึ่งระยะทางระหว่างจุด  $p$  และ  $q$  มีนิยามดังนี้

$$d_{Chess}(p, q) = \max\{|p_x - q_x|, |p_y - q_y|\} \quad (5.4)$$

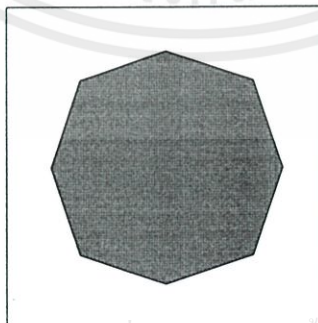


รูปที่ 5.3 ดิสก์ของระยะทางแบบเชสบอร์ด

### 5.2.4 ระยะทางแบบแชมเฟอร์ (Chamfer Distance)

ระยะทางแบบแชมเฟอร์เป็นการประมาณระยะทางยูคลิเดียนที่ให้ผลใกล้เคียงมากกว่าระยะทางแบบซิต์บิล็อคและเชสบอร์ด ลักษณะของระยะทางแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่า  $A$  และ  $B$  ซึ่งระยะทางระหว่างจุด  $p$  และ  $q$  มีนิยามดังนี้

$$dist_{Cha(a,b)}(p, q) = a \cdot \max\{|p_x - q_x|, |p_y - q_y|\} + (b - a) \cdot \min\{|p_x - q_x|, |p_y - q_y|\} \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.4 ดิสก์ของระยะทางแบบแชมเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนิยามจะพบว่าระยะทางซีตึบลิคและระยะทางเซสบอร์ดเป็นสับเซต (Subset) ของมันคือ เมื่อ  $a=1$  และ  $b=2$  จะเป็นระยะทางซีตึบลิค และถ้า  $a=b=1$  จะเป็นระยะทางเซสบอร์ด

### 5.3 การแปลงระยะทาง (Distance Transform)

การแปลงระยะทางคือการคำนวณหาระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างวัตถุและฉากหลัง นั่นคือเมื่อมีภาพไบนารี  $I$  ซึ่งมีวัตถุ  $O$  และฉากหลัง  $O'$  การแปลงระยะทางจะสร้างภาพซึ่งเป็นระยะทางที่ตำแหน่งพิกเซลใดๆ ไปยังวัตถุ  $O$  ซึ่งนิยามของการแปลงระยะทางสามารถเขียนได้ดังนี้

$$D(p) = \min \{ \text{dist}_M(p, q), q \in O \} \quad (5.6)$$

### 5.4 การแปลงระยะทางสองมิติ

#### 5.4.1 การแปลงระยะทางยูคลิเดียนสองมิติ

อัลกอริทึมการแปลงระยะทางยูคลิเดียนที่น่าสนใจอัลกอริทึมหนึ่งถูกนำเสนอขึ้นโดย Saito และ Toriwaki [16] ผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมนี้จะมีค่าเป็นระยะทางกำลังสอง สำหรับการแปลงระยะทางยูคลิเดียนสองมิติจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน

เมื่อกำหนด  $\{p_{r,c} \in \{1,0\} \mid 0 \leq r < n_r, 0 \leq c < n_c\}$  แทนอินพุทที่เป็นข้อมูลภาพแบบไบนารี  $n_r$  เป็นจำนวนแถวในภาพ และ  $n_c$  เป็นจำนวนคอลัมน์ในภาพ

##### 5.4.1.1 การแปลงครั้งที่ 1

ภาพอินพุทจะถูกแปลงในลักษณะพิกเซลต่อพิกเซล โดยทำการคำนวณค่าของแต่ละพิกเซลดังสมการที่ 5.7

$$f_{r,c} = \min\{(c-j)^2, p_{r,j} = 0, 0 \leq j < n_c\} \quad (5.7)$$

##### 5.4.1.2 การแปลงครั้งที่ 2

ภาพอินพุทที่ได้จากการแปลงครั้งที่ 1 จะถูกแปลงในลักษณะคอลัมน์ต่อคอลัมน์ โดยทำการคำนวณค่าของแต่ละคอลัมน์เป็นดังสมการที่ 5.8

$$g_{r,c} = \min\{f_{i,c} + (r-i)^2 \mid 0 \leq i < n_r\} \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมนี้สามารถนำไปใช้ในมิติที่สูงขึ้นได้ สำหรับการใช้อัลกอริทึมนี้ในการแปลงระยะทางสามมิติจะกล่าวถึงต่อไปภายหลัง

#### 5.4.2 การแปลงระยะทางแฮมเฟออร์สองมิติ

อัลกอริทึมการแปลงระยะทางแบบนี้เป็นการทำงานที่ต่อเนื่องกันสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นการพิจารณาไปข้างหน้า (Forward) จากทางมุมซ้ายบนของภาพไปยังมุมขวาล่าง และส่วนที่สองเป็นการพิจารณาย้อนกลับ (Reverse) โดยเริ่มจากมุมขวาล่างไปยังมุมซ้ายบน ในการพิจารณาแต่ละส่วนนั้นจะใช้หน้ากากที่แตกต่างกันสองตัว (รูปที่ 5.5) โดยที่พิกเซลจุดที่กำลังพิจารณาอยู่จะถูกบวกเข้ากับระยะทางที่อยู่บนหน้ากากในตำแหน่งที่ตรงกัน จากนั้นพิกเซลในตำแหน่งที่กำลังพิจารณาจะถูกแทนที่ด้วยค่าที่น้อยที่สุดของผลบวกเหล่านี้



รูปที่ 5.5 หน้ากากที่ใช้ในการพิจารณาแต่ละส่วน (ก) หน้ากากที่ใช้สแกนไปข้างหน้า (ข) หน้ากากที่ใช้สแกนย้อนกลับ

อัลกอริทึมนี้สามารถใช้กับเมตริกซ์ระยะทางได้หลายแบบ คือ เมื่อ  $a=1$  และ  $b=2$  จะเป็นการแปลงแบบชิตีบลิค ถ้า  $a=b=1$  จะเป็นการแปลงแบบเซลบอर्ड และถ้า  $a=1$  และ  $b=1.351$  จะเป็นเมตริกซ์แฮมเฟออร์ จากงานวิจัยของ Borgfors [16] ได้มีการคำนวณค่าของ  $a$  และ  $b$  เพื่อทำให้ความแตกต่างสูงสุดของเมตริกซ์แฮมเฟออร์และเมตริกซ์ยูคลิเดียนมีค่าน้อยที่สุด โดยการใช้หลักการดังนี้

เมื่อกำหนด  $m_1 = |p_x - q_x|$ ,  $m_2 = |p_y - q_y|$  ระยะทางระหว่างพิกเซล  $p$  และ  $q$  จาก (5.5) จะเป็นดังนี้

$$\text{dist}_{\text{Cha}(a,b)}(p,q) = a \cdot \max\{m_1, m_2\} + (b-a) \cdot \min\{m_1, m_2\} \quad (5.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ถ้าสมมติให้  $m_1 \geq m_2$  นั่นคือ  $\max\{m_1, m_2\} = m_1$  และ  $\min\{m_1, m_2\} = m_2$  ไม่ว่าจะนิโคๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมี หีดคิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{dist}_{\text{Cha}(a,b)}(p,q) = a(m_1) + (b-a)m_2 \quad (5.10)$$

$$= a. (m_1 - m_2) + b. m_2 \quad (5.11)$$

ผลต่างระหว่างระยะทางยูคลิเดียนและแฮมเฟอริคือ

$$dist_e - dist_{Cha(a,b)} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} - [a. (m_1 - m_2) + b. m_2] \quad (5.12)$$

กำหนด  $a=1$  และ  $b=d < 2$  ซึ่งค่า  $d$  ที่เหมาะสมที่สุดได้จากการทำให้ค่าสูงสุดของ (5.12) มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นได้ 3 กรณีคือ

1.  $m_2 = 0$
2.  $m_2 = m_1$
3.  $m_2$  ที่ทำให้อนุพันธ์มีค่าเป็นศูนย์

ในกรณีที่ 1 นั้นสมการที่ (5.12) จะเป็นศูนย์ ส่วนในกรณีที่สองเมื่อ  $m_2 = m_1$  และกำหนด

$M = m_1 = m_2$  สมการ 5.12 จะเป็น

$$dist_e - dist_{Cha(a,b)} = (\sqrt{2} - d) M \quad (5.13)$$

สำหรับในกรณีสุดท้ายได้จากการที่อนุพันธ์ของ (5.12) เมื่อเทียบกับ  $m_2$  มีค่าเป็นศูนย์จะ  
ได้

$$m_2 = \frac{d-1}{\sqrt{2d-d^2}} \cdot m_1 \quad (5.14)$$

แทน 5.14 ลงใน 5.12 และกำหนด  $M = m_1$

$$dist_e - dist_{Cha(a,b)} = (\sqrt{2d-d^2} - 1) M \quad (5.15)$$

ค่าที่น้อยที่สุดของค่าสูงสุดสัมบูรณ์ใน (5.13) และ (5.15) จะเกิดขึ้นที่จุดตัดของมันทั้งสอง  
ซึ่งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d = \frac{1}{\sqrt{2}} + \sqrt{\sqrt{2}-1} \approx 1.351 \quad (5.16)$$

ดังนั้นค่า  $a$  และ  $b$  ที่ทำให้ความแตกต่างระหว่างระยะทางยูคลิเดียนและระยะทางแฮมเฟอริมีค่าน้อยที่สุดคือ  $a = 1$  และ  $b = 1.351$

## 5.5 การแปลงระยะทางสามมิติ (3D Distance Transform)

### 5.5.1 การแปลงระยะทางยูคลิเดียนสามมิติ

ระยะทาง 3 มิติ แบบยูคลิเดียน มีลักษณะตามสมการ (5.17) คือ

$$D_{euclidean}(u, v) = \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2 + (u_z - v_z)^2} \quad (5.17)$$

จากอัลกอริทึมของ Saito และ Toriwaki [16] ในการแปลงระยะทางสามมิติจะแบ่งเป็นสามขั้นตอนเมื่อกำหนด  $\{v_{b,r,c} \in \{1,0\} \mid 0 \leq b < n_b, 0 \leq r < n_r, 0 \leq c < n_c\}$  แทนอินพุตที่เป็นข้อมูลปริมาตรภาพสามมิติแบบไบนารี โดยที่  $n_b$  เป็นจำนวนของสไลซ์ที่นำมาสร้างภาพ  $n_r$  เป็นจำนวนแถวในภาพ และ  $n_c$  เป็นจำนวนคอลัมน์ในภาพ

#### 5.5.1.1 การแปลงครั้งที่ 1

ภาพอินพุตจะถูกแปลงในลักษณะว็อกเซล (Voxel) ต่อว็อกเซล โดยทำการคำนวณค่าของแต่ละว็อกเซลดังสมการที่ 5.18

$$f_{b,r,c} = \min\{(c-j)^2, v_{b,r,j} = 0, 0 \leq j < n_c\} \quad (5.18)$$

#### 5.5.1.2 การแปลงครั้งที่ 2

ภาพอินพุตที่ได้จากการแปลงครั้งที่ 1 จะถูกแปลงในลักษณะคอลัมน์ต่อคอลัมน์ โดยทำการคำนวณค่าของแต่ละคอลัมน์ดังสมการที่ 5.19

$$g_{b,r,c} = \min\{f_{b,i,c} + (r-i)^2 \mid 0 \leq i < n_r\} \quad (5.19)$$

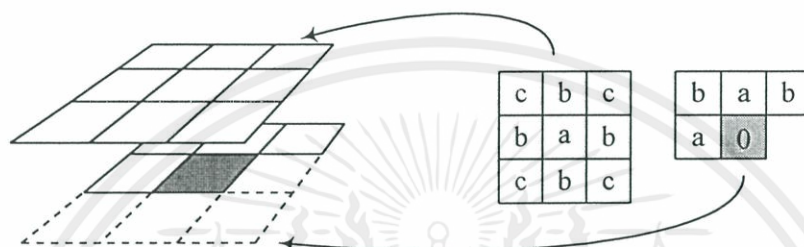
#### 5.5.1.3 การแปลงครั้งที่ 3

เป็นการแปลงระยะทางในแนวแกนของสไลซ์ซึ่งการแปลงระยะทางในแนวแกนนี้เป็นดังสมการที่ 5.20

$$h_{b,r,c} = \min\{g_{k,r,c} + (b-k)^2 \mid 0 \leq k < n_b\} \quad (5.20)$$

### 5.5.2 การแปลงระยะทางแฮมเฟอ์สามมิติ

การแปลงระยะทางแฮมเฟอ์สามมิตินี้ใช้หลักการคล้ายกับการแปลงแบบสองมิติ ซึ่งแยกการพิจารณาออกเป็นสองส่วนเช่นกัน โดยส่วนแรกเริ่มจากมุมบนด้านซ้ายของสไลซ์แผ่นแรกไปยังมุมล่างด้านขวาของสไลซ์แผ่นสุดท้าย และส่วนที่สองเริ่มจากมุมล่างด้านขวาของสไลซ์แผ่นสุดท้ายไปยังมุมบนด้านซ้ายของสไลซ์แผ่นแรก หน้ากากซึ่งใช้สำหรับการแปลงไปข้างหน้าแสดงดังรูปที่ 5.6 โดยที่  $a = 1.0$ ,  $b = 1.314$  และ  $c = 1.628$



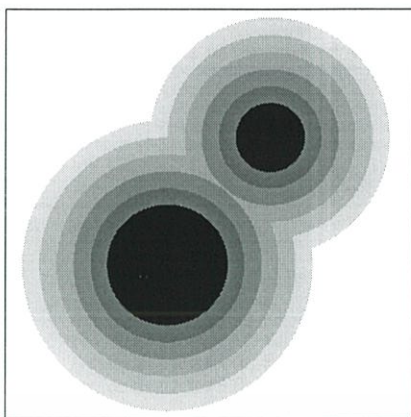
รูปที่ 5.6 หน้ากากสามมิติที่ใช้ในการแปลงไปข้างหน้า

ในแต่ละขั้นของการสแกน ค่าที่ตำแหน่งของหน้ากากจะถูกบวกเข้ากับค่าของว็อกเซลซึ่งมีตำแหน่งสอดคล้องกับว็อกเซลในขณะนั้น และค่าของว็อกเซลที่จุดกึ่งกลางจะถูกแทนที่ด้วยค่าที่น้อยที่สุดของผลบวกเหล่านี้

### 5.6 การใช้การแปลงระยะทางในการสร้างภาพเชิงปริมาตร [17], [18]

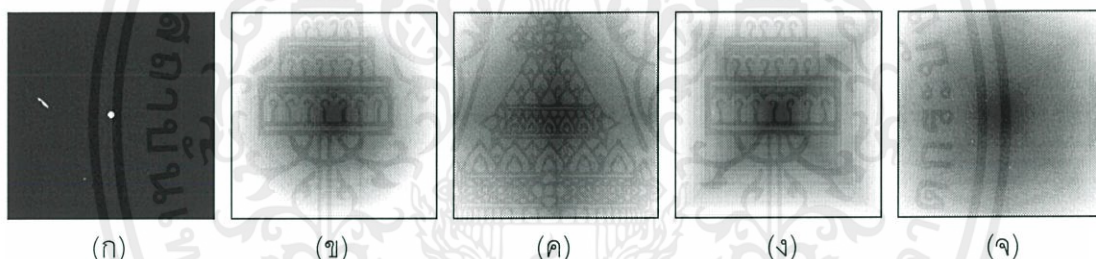
การแปลงระยะทางของภาพซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุหลายชิ้น ระยะทางที่คำนวณได้ที่พิกเซลตำแหน่งต่างๆ นั้นจะเป็นระยะทางที่น้อยที่สุดระหว่างวัตถุแต่ละชิ้น จากคุณสมบัตินี้มันจึงถูกนำมาใช้ช่วยในการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยเป็นข้อมูลให้แสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตรกระโดดข้ามส่วนที่เป็นฉากหลัง ซึ่งที่ลักษณะของระยะทางที่แปลงได้จะเป็นดิสก์หลายๆ ชั้นซ้อนกันอยู่เปรียบเทียบเสมือนเป็นเปลือกหุ้มวัตถุเอาไว้ดังรูปที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ชั้นของระยะทางที่อยู่รอบวัตถุ

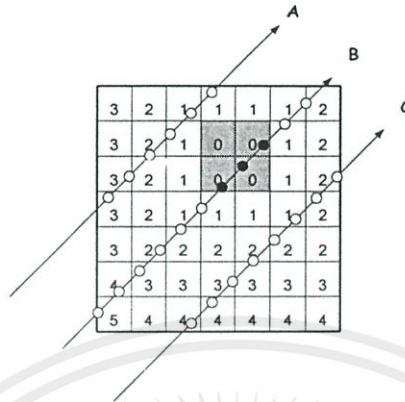
การแปลงระยะทางแต่ละชนิดมีดิสก์รูปร่างแตกต่างกันซึ่งการแปลงระยะทางของรูปจุด 1 จุดเป็นดังรูปที่ 5.8 บริเวณตรงกลางที่มีสีดำเข้มจะมีระยะทางน้อยในขณะที่บริเวณรอบนอกจะมีระยะทางมากขึ้น



รูปที่ 5.8 ดิสก์ของระยะทางแบบต่างๆ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) การแปลงระยะทางยุคลิเดียน (ค) การแปลงระยะทางซิติบลิค (ง) การแปลงระยะทางเชสบอร์ด (จ) การแปลงระยะทางแฮมเฟอริ์

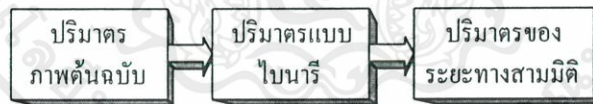
การเดินทางของแสงภายในปริมาตรระยะทางซึ่งสร้างจากการแปลงระยะทางแสดงดังรูปที่ 5.9 ในการสร้างภาพตามปกติลำแสง B จะต้องเดินทางเป็นจำนวน 6 ชั้น ก่อนที่จะถึงวัตถุ ในขณะที่การใช้ข้อมูลจากการแปลงระยะทางแสงจะใช้ข้อมูลนี้กระโดดข้ามส่วนที่เป็นฉากหลังและเข้าถึงวัตถุที่โปร่งแสงภายในปริมาตรได้เร็วกว่า ตามรูปเมื่อแสง B วิ่งเข้าหาปริมาตรแล้วจะทำการอ่านข้อมูลระยะทางออกมาซึ่งก็คือ 5 จากนั้นแสงจะกระโดดข้ามการเดินทางตามปกติออกไป 5 ชั้น แล้วทำการอ่านค่าระยะทางอีกครั้งได้เท่ากับ 1 ต่อไปแสงจะกระโดดข้ามจุดนี้ไปถึงบริเวณที่เป็นวัตถุแล้วจึงเริ่มทำการคำนวณตามขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างภาพ ในส่วนของลำแสง A และ C

ก็เช่นกัน โดยลำแสง A จะเดินทางอยู่ในปริมาตรเป็นจำนวน 4 ชั้นจากปกติ 6 ชั้น ส่วนลำแสง C จะเดินทางอยู่ในปริมาตรเป็นจำนวน 3 ชั้นจากปกติ 8 ชั้น



รูปที่ 5.9 การเดินทางของแสงภายในปริมาตรระยะทาง

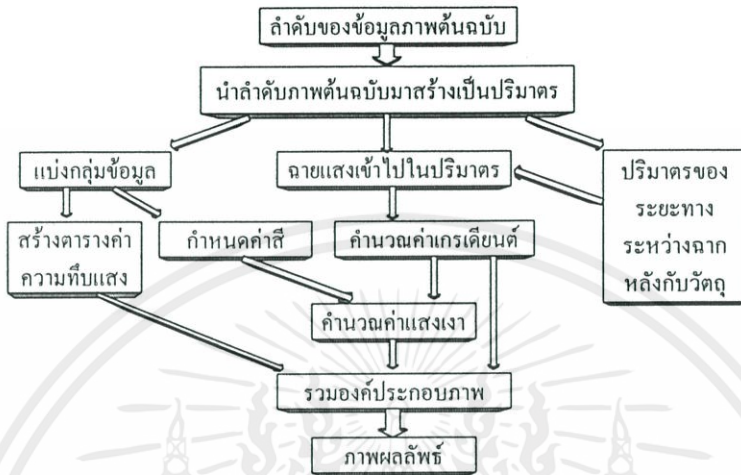
การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การแปลงระยะทางนั้น ปริมาตรภาพจะถูกนำมาทำการประมวลผลก่อนเพื่อสร้างปริมาตรของระยะทางระหว่างวัตถุถึงโปร่งใสกับฉากหลังภายในภาพโดยใช้การแปลงระยะทางสามมิติ ปริมาตรของระยะทางนี้มีส่วนสำคัญมากเนื่องจากมันจะถูกใช้เป็นข้อมูลสำหรับให้แสงกระโดดข้ามบริเวณที่เป็นฉากหลัง และเข้าถึงบริเวณที่เป็นวัตถุถึงโปร่งใสในปริมาตรได้เร็วขึ้น การสร้างปริมาตรของระยะทางเริ่มจากการนำปริมาตรภาพต้นฉบับมาทำการสร้างเป็นปริมาตรภาพแบบไบนารีโดยให้ส่วนที่เป็นฉากหลังมีค่าเป็น 0 และส่วนที่เป็นบริเวณวัตถุกำหนดให้มีค่าเป็น 1 จากนั้นนำปริมาตรนี้ไปทำการแปลงระยะทางสามมิติ



รูปที่ 5.10 ขั้นตอนการสร้างปริมาตรของระยะทาง

ขั้นตอนโดยรวมของการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การแปลงระยะทางเริ่มจากการนำชุดข้อมูลภาพทั้งหมดมาสร้างเป็นปริมาตร จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลภาพเพื่อสร้างตารางค่าความทึบแสงและกำหนดค่าสีของกลุ่มข้อมูล การกำหนดค่าความทึบแสงนี้จะกำหนดให้ค่าความทึบแสงของกลุ่มข้อมูลที่เป็นฉากหลังหรืออากาศมีค่าเป็นศูนย์ ในส่วนของการสร้างภาพเป็นการฉายแสงเข้าไปในปริมาตร เพื่อทำการคำนวณหาส่วนที่มองเห็นได้ แสงจะถูกสุ่มเป็นระยะทางเท่าๆ กัน และในการเดินทางของมันจะใช้ข้อมูลภายในปริมาตรของระยะทางเพื่อกระโดดข้ามข้อมูลส่วนที่เป็นฉากหลังไป ในการติดตามแสงแต่ละชั้นจะมีการคำนวณค่าเกรเดียนต์ เพื่อใช้คำนวณ

การให้แสงเงาร่วมกับสีที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะเป็นการรวมองค์ประกอบภาพโดยอาศัยข้อมูลจากค่าเกรเดียนต์ ความเข้มแสงที่คำนวณการให้แสงเงามาแล้วและค่าความทึบแสงเข้ามาคำนวณ



รูปที่ 5.11 หลักการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การแปลงระยะทาง

## 5.7 สรุป

ระยะทางดิจิตอลมีหลายแบบซึ่งแต่ละแบบมีลักษณะที่แตกต่างกันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การนำการแปลงระยะทางมาใช้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้นเพื่อจัดขั้นตอนที่สูญเปล่าของการคำนวณในบริเวณที่เป็นฉากหลังภายในปริมาตรซึ่งตามปกติกำหนดให้เป็นวัตถุโปร่งแสงโดยสมบูรณ์ เนื้อหาในบทถัดไปจะเป็นผลการทดลองการใช้ระยะทางแบบต่างๆ ในการเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 6.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็น การทดลองและผลการทดลองสร้างภาพเชิงปริมาตรในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดลองขยายปริมาตรตามแนวแกนสไลซ์เพื่อรักษาสัดส่วนที่แท้จริงของภาพ ส่วนที่สองเป็นการทดลองสร้างภาพในมุมมองที่แตกต่างกันโดยใช้การอินเทอร์โพลेटข้อมูลตามแนวลำแสงแบบลิเนียร์และคิวบิคคอนโวลูชัน และในส่วนสุดท้ายเป็นการทดลองสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยอาศัยข้อมูลจากการแปลงระยะทางแบบต่างๆ

สำหรับโปรแกรมทดลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เขียนจากภาษา C++ โดยใช้คอมไพเลอร์ Visual C++ เวอร์ชัน 6.0 บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่มี AMD Athlon 700 MHz เป็นตัวประมวลผลกลางและมีหน่วยความจำหลัก 128 MB ทดลองกับชุดข้อมูลภาพ CT 256 ระดับเทา (8 บิต) ขนาด 256x256 จุดภาพ ของศีรษะเด็กและศีรษะผู้ใหญ่จำนวน 80 และ 113 สไลซ์ตามลำดับ

#### 6.2 การขยายปริมาตรตามแนวแกนสไลซ์

ในการสร้างภาพสามมิติทางการแพทย์จากลำดับข้อมูลภาพสองมิติที่ได้จากเครื่อง CT และ MRI บ่อยครั้งที่ลำดับชุดข้อมูลแต่ละชุดมีความห่างของสไลซ์ไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลโดยตรงกับสัดส่วนของภาพผลลัพธ์ที่สร้างขึ้น โดยที่ความห่างของสไลซ์แต่ละชั้นจะเป็นข้อมูลที่บอกรวมในส่วนหัวของไฟล์ ซึ่งมีตำแหน่งที่เก็บไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับรูปแบบของไฟล์แต่ละชนิดและรุ่นของเครื่องเอ็กซ์เรย์ เช่นไฟล์ตามรูปแบบ DICOM และไฟล์ที่ได้จากเครื่อง Imatron

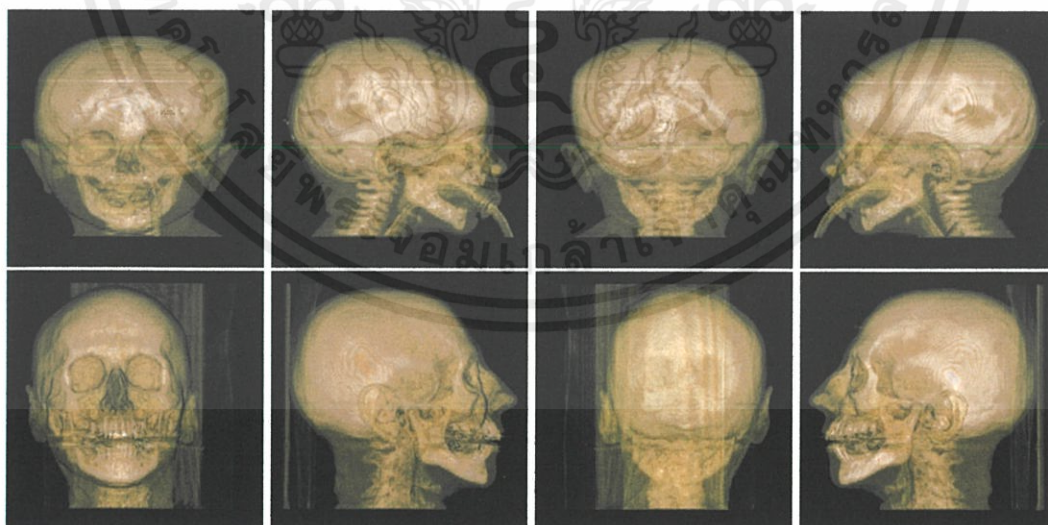
การขยายปริมาตรตามแนวแกนสไลซ์สามารถทำได้โดยการใช้เมตริกซ์การสเกลร่วมกับการอินเทอร์โพลेटแบบต่างๆ การทดลองในตอนนี้จะทำการขยายปริมาตรของชุดข้อมูลศีรษะเด็ก 2.5 เท่า และชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่จะทำการขยายออกไป 2.0 เท่า แล้วทำการสร้างภาพในมุมมองที่แตกต่างกัน 4 มุมมองคือ  $\theta = 0 \ \phi = 0$ ,  $\theta = 0 \ \phi = 90$ ,  $\theta = 0 \ \phi = 180$  และ  $\theta = 0 \ \phi = 270$  โดยที่  $\theta$  เป็นการหมุนรอบแกน x และ  $\phi$  คือการหมุนรอบแกน z จากนั้นทำการวัดค่าความแตกต่างด้วยการใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง (Root mean Square Error : %RMS) ดังนี้

$$\%RMS = \sqrt{\frac{1}{3MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\{r'(x,y) - r(x,y)\}^2 + \{g'(x,y) - g(x,y)\}^2 + \{b'(x,y) - b(x,y)\}^2]} \times 100 \quad (7.1)$$

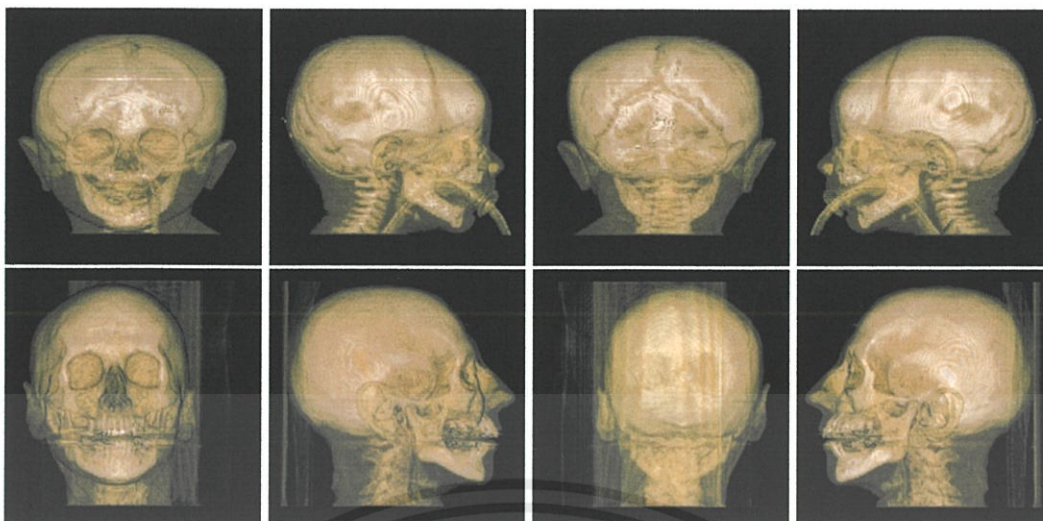
เมื่อ  $M$  และ  $N$  คือขนาดของภาพ  $r(x,y)$ ,  $g(x,y)$  และ  $b(x,y)$  คือสีแดง เขียว และน้ำเงินของภาพต้นฉบับ ส่วน  $r'(x,y)$ ,  $g'(x,y)$  และ  $b'(x,y)$  คือองค์ประกอบสีแดง เขียว และน้ำเงินของภาพที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบ โดยที่องค์ประกอบสีที่นำมาคำนวณนี้จะต้องผ่านการทำนอร์มอลไลซ์ (Normalized) มาก่อน

ตารางที่ 6.1 การทดลองสร้างภาพด้วยการขยายปริมาตรตามแนวแกนสไลซ์ร่วมกับการอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์และคิวบิคคอนโวลูชัน

ชุดข้อมูล	% RMS ที่มุมมอง $\theta, \phi$			
	0, 0	0, 90	0, 180	0, 270
ศีรษะเด็ก	1.4599	1.3753	1.3745	1.5616
ศีรษะผู้ใหญ่	1.0296	1.1183	0.8678	1.1369



รูปที่ 6.1 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการขยายปริมาตรร่วมกับการอินเทอร์โพลแบบเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่สว่างไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ลิเนียร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



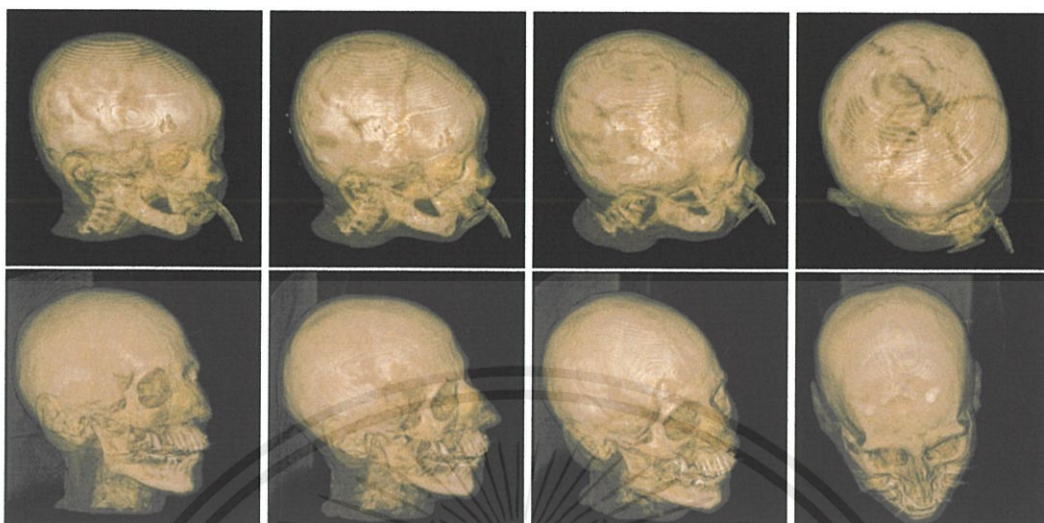
รูปที่ 6.2 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการขยายปริมาตรร่วมกับการอินเทอร์โพลเทแบบ คิวบิกคอนโวลูชัน

ผลการทดลองพบว่าภาพที่ได้จากปริมาตรที่ผ่านการขยายร่วมกับการอินเทอร์โพลเททั้งสองแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS ในตารางที่ 6.1 แต่เมื่อพิจารณาจากภาพที่สร้างขึ้นแล้วพบว่าอินเทอร์โพลเทแบบคิวบิกคอนโวลูชันให้ภาพในส่วนที่เป็นรอยต่อของชั้นสไลซ์ได้ราบเรียบกว่า (รูปที่ 6.1 และ 6.2) ดังนั้นในการขยายปริมาตรตามแนวแกนสไลซ์เพื่อขจัดเศษสัดส่วนของภาพในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การอินเทอร์โพลเทแบบคิวบิกคอนโวลูชันแม้ว่าการประมวลผลจะการคำนวณที่ซับซ้อนและเวลานานกว่าการอินเทอร์โพลเทแบบลิเนียร์ก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการขยายปริมาตรเป็นส่วนของการประมวลผลก่อนซึ่งไม่มีผลในขั้นตอนของการสร้างภาพ

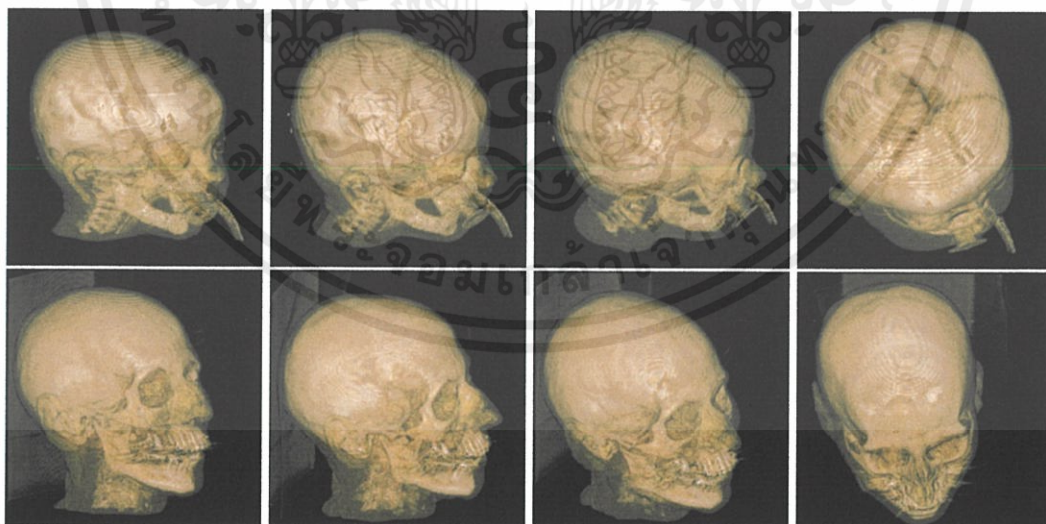
### 6.3 การอินเทอร์โพลเทข้อมูลตามแนวลำแสง

การสร้างภาพเชิงปริมาตรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการสร้างภาพโดยอาศัยการฉายแสงจากระนาบการมองไปยังวัตถุ ในการฉายแสงแต่ละชั้นจะมีการแปลงทางเรขาคณิตเกี่ยวกับตำแหน่งของข้อมูลภายในปริมาตรซึ่งส่วนมากค่าผลลัพธ์จากการแปลงจะอยู่ในรูปทศนิยม ดังนั้นจึงต้องมีการอินเทอร์โพลเทค่าข้อมูลตามแนวลำแสงเหล่านี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างภาพถูกต้องขึ้น ในการทดลองสร้างภาพนั้นจะทำการสร้างภาพด้วยการหมุนวัตถุไปตามแนวแกน z และแกน x ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



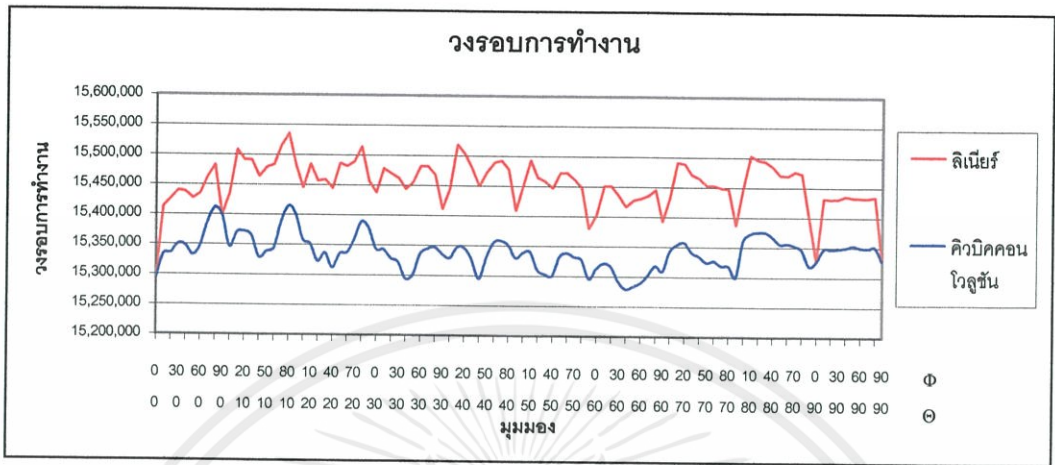
รูปที่ 6.3 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเลตข้อมูลตามแนวแสงแบบลิเนียร์



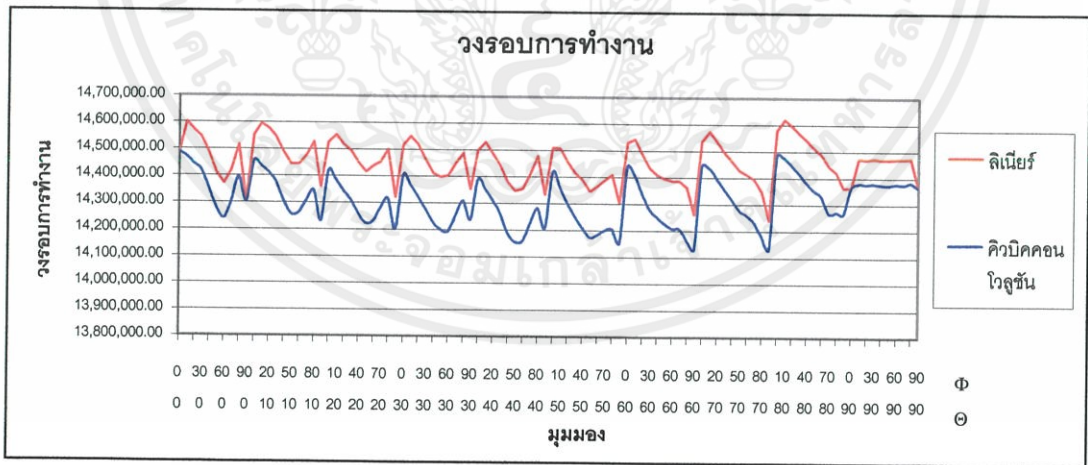
รูปที่ 6.4 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเลตข้อมูลตามแนวแสงแบบคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ใดไปเผยแพร่หรือใช้งานการค้า  
 คอนโวลูชัน  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



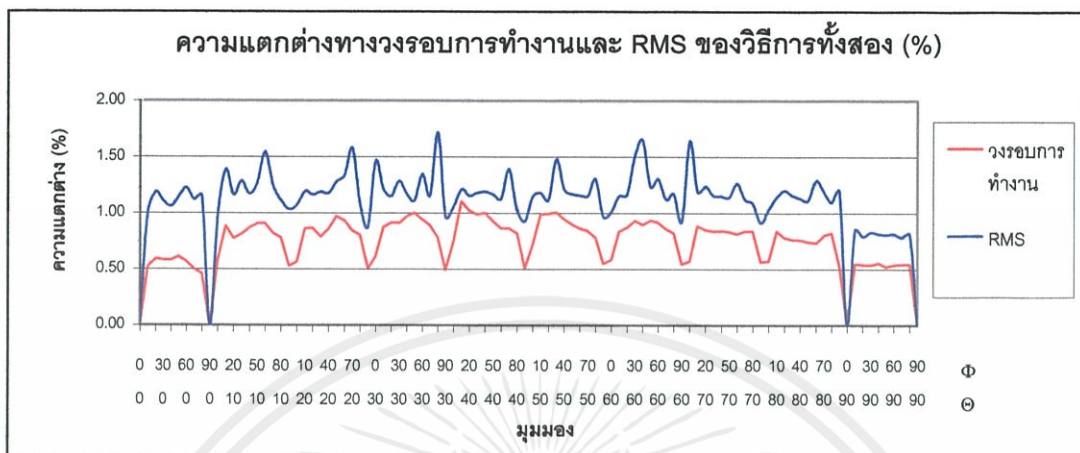


(ก)

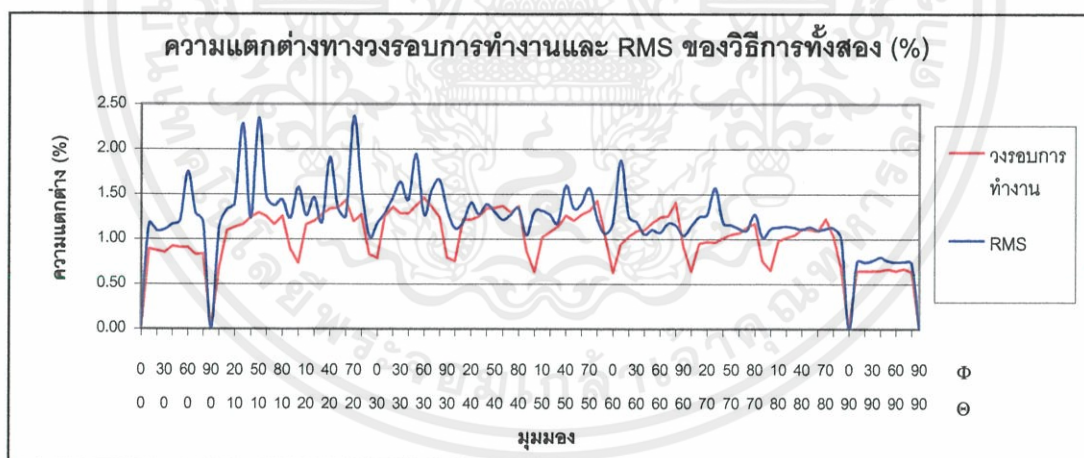


(ข)

รูปที่ 6.6 กราฟแสดงวงรอบการทำงานในสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเลทข้อมูลตามแนวแสงแบบ  
 ลินีเยร์และคิวบิคคอนไวลูชัน (ก) ชุดข้อมูลสี่ระเด็ก (ข) ชุดข้อมูลสี่ระผู้ใหญ่



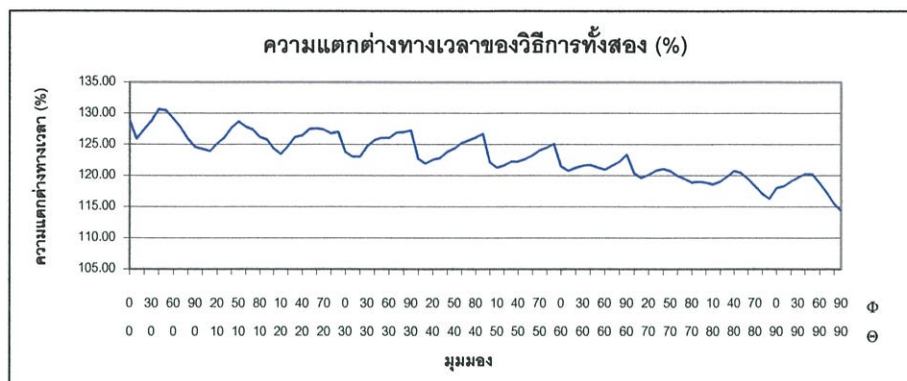
(ก)



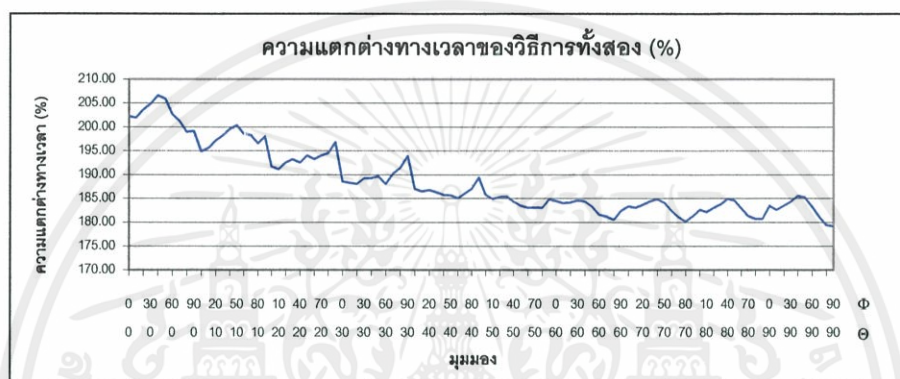
(ข)

**รูปที่ 6.7** กราฟความแตกต่างทางวงรอบการทำงานและค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS

ของการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเลตข้อมูลตามแนวแสงด้วยการอินเทอร์โพลแบบ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ไม่สามารถนำ  
 ลิเนียร์และคิวบิกคอนโวลูชัน (ก) ชุดข้อมูลสี่ระแวก (ข) ชุดข้อมูลสี่ระแวกผู้ใหญ่



(ก)



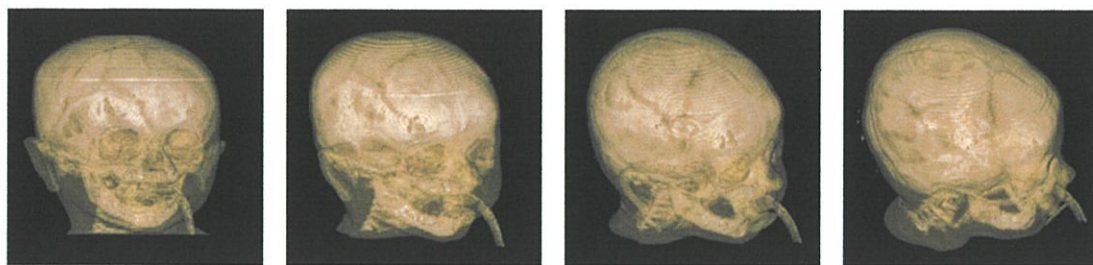
(ข)

**รูปที่ 6.8** กราฟความแตกต่างทางเวลาของการสร้างภาพที่มีการอินเทอร์โพลเลชันข้อมูลตามแนวแสงด้วยการอินเทอร์โพลเลชันแบบลิเนียร์และคิวบิกคอนโวลูชัน (ก) ชุดข้อมูลสี่ระดัเด็ก (ข) ชุดข้อมูลสี่ระดัผู้ใหญ่

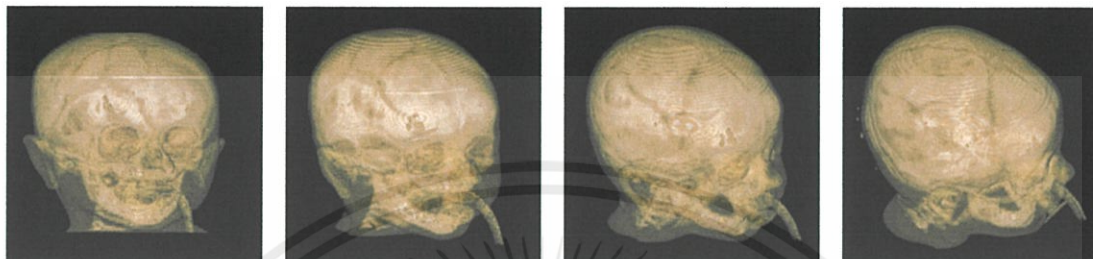
ผลการทดลองพบว่าการอินเทอร์โพลเลชันแบบคิวบิกคอนโวลูชันใช้เวลาในการสร้างภาพนานกว่าการใช้การอินเทอร์โพลเลชันแบบลิเนียร์ประมาณ 160-300 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน RMS จากกราฟรูปที่ 6.7 ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 0-2.5% ดังนั้นในการอินเทอร์โพลเลชันข้อมูลตามแนวแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การอินเทอร์โพลเลชันแบบลิเนียร์เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันแต่ใช้เวลาแตกต่างกันมาก

#### 6.4 การสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้ข้อมูลจากการแปลงระยะทางแบบต่างๆ

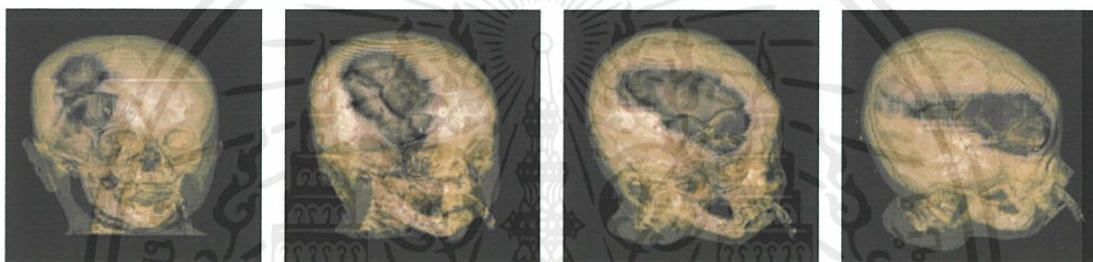
การทดลองในตอนนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมของการนำระยะทางแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 5 มาใช้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้ข้อมูลของระยะทางแบบต่างๆ มาทำการสร้างภาพในมุมมองต่างๆ ด้วยการหมุนวัตถุไปตามแนวแกน z และแกน x ตั้งแต่ 0 - 90 องศา จากนั้นเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากการสร้างภาพด้วยวิธีการตามปกติ [10]



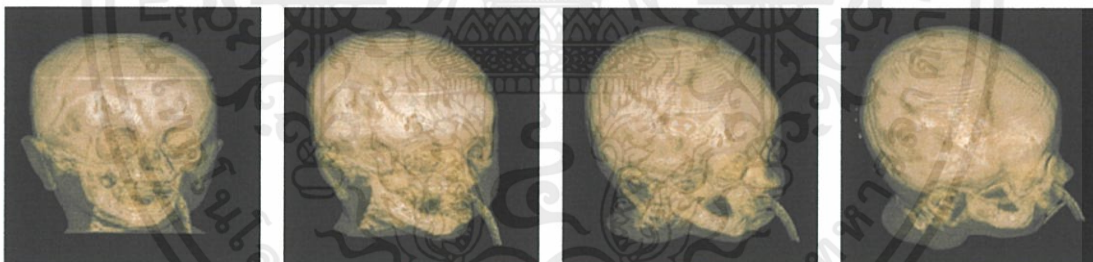
(ก) ภาพที่สร้างจากวิธีการปกติ [10]



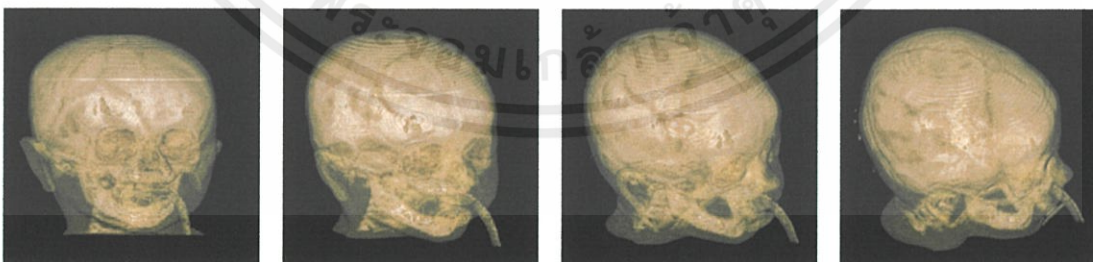
(ข) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางยูคลิดเดียน



(ค) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางซิดีบล็อค



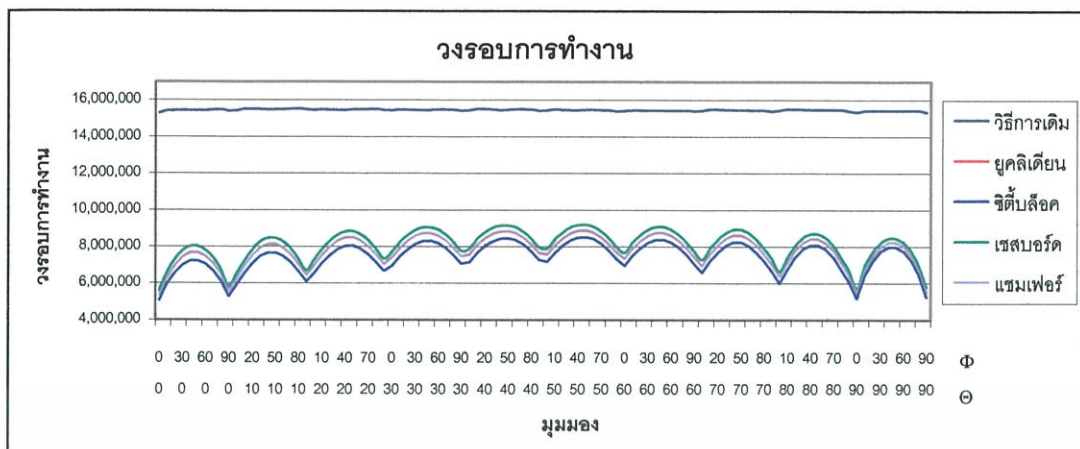
(ง) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางเซสบอร์ด



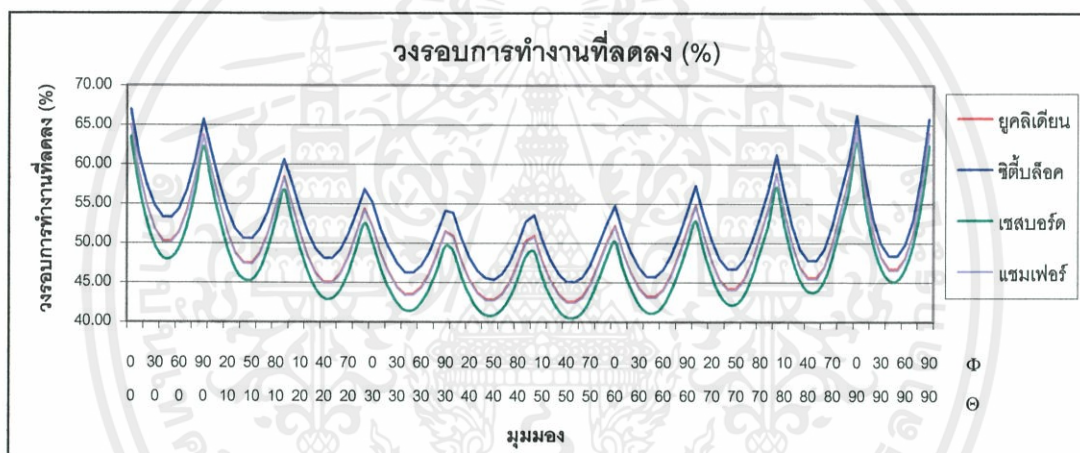
(จ) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางแชมเฟอร์

**รูปที่ 6.9** ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพโดยใช้ระยะทางแบบต่างๆ (ก) ภาพที่สร้างจากวิธีการ

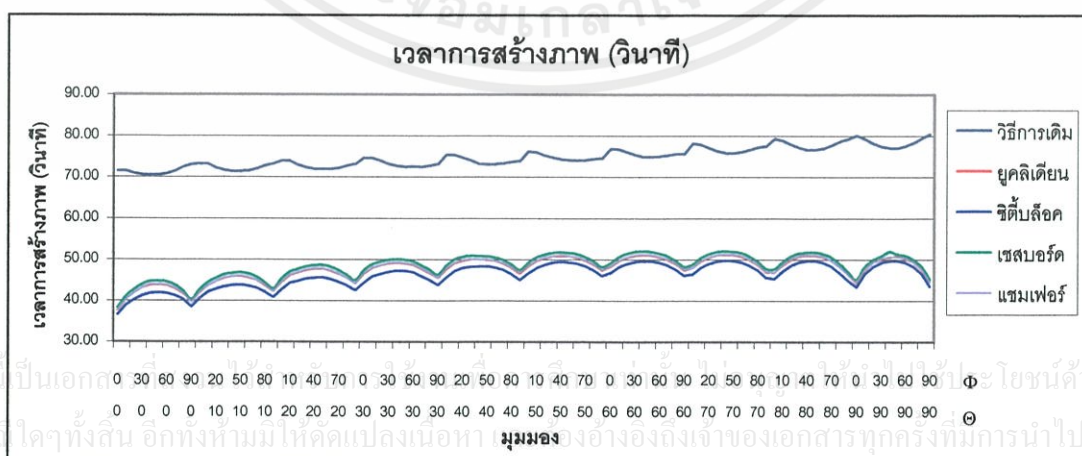
ปกติ (ข) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางยูคลิดเดียน (ค) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางซิดีบล็อค (ง) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางเซสบอร์ด (จ) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางแชมเฟอร์



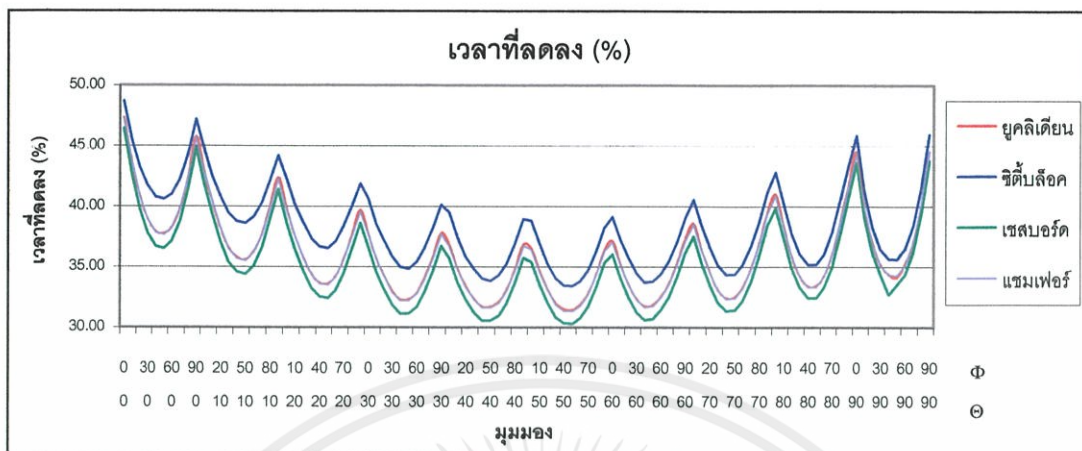
รูปที่ 6.10 กราฟแสดงวงรอบในการทำงานของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลสี่ระยะเด็กด้วยระยะทางแบบต่างๆ



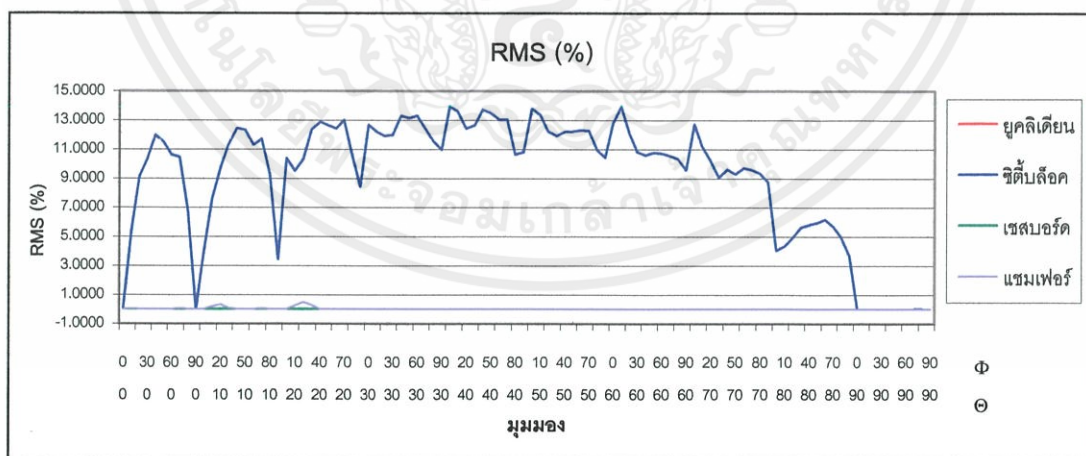
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงวงรอบการทำงานที่ลดลงของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลสี่ระยะเด็กด้วยระยะทางแบบต่างๆ



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลสี่ระยะเด็กด้วยระยะทางแบบต่างๆ

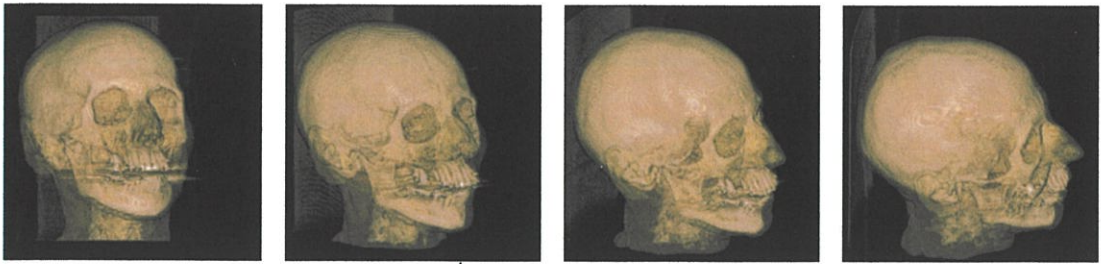


รูปที่ 6.13 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะเด็กที่ลดลงเมื่อนำระยะทางแบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ

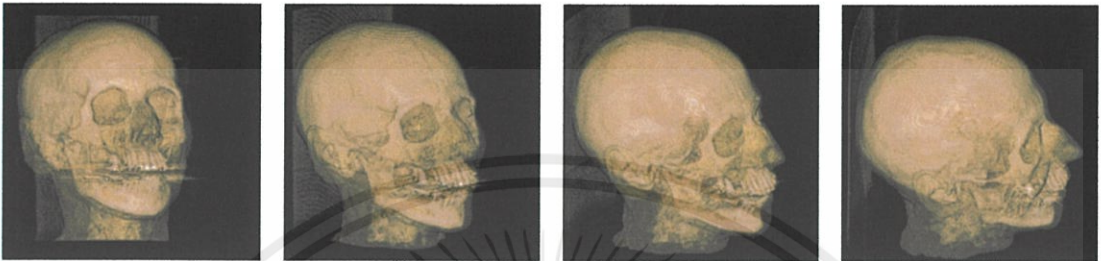


รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS ในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะเด็กเมื่อนำระยะทางแบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ

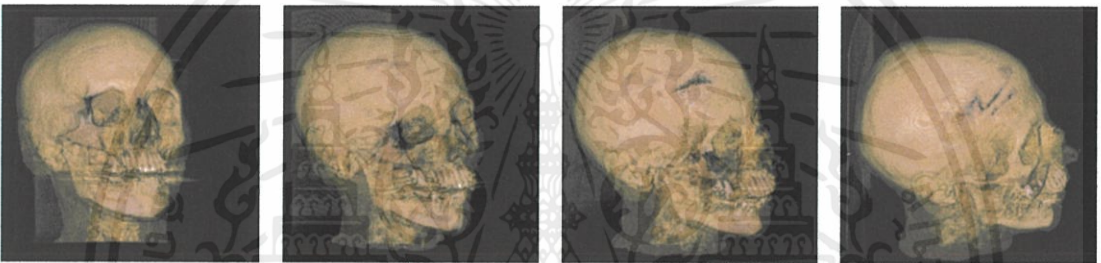
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นภาพหรือข้อความใดๆ ที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ออกพิมพ์ไม่รับผิดชอบเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



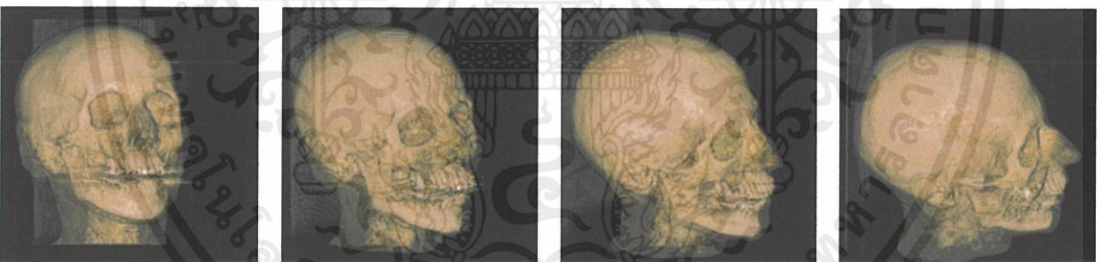
(ก) ภาพที่สร้างจากวิธีการปกติ [10]



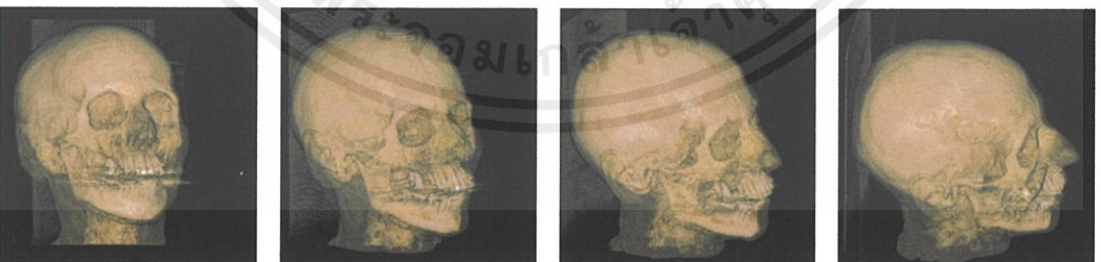
(ข) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางยูคลิดเดียน



(ค) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางซิติบิล็อค

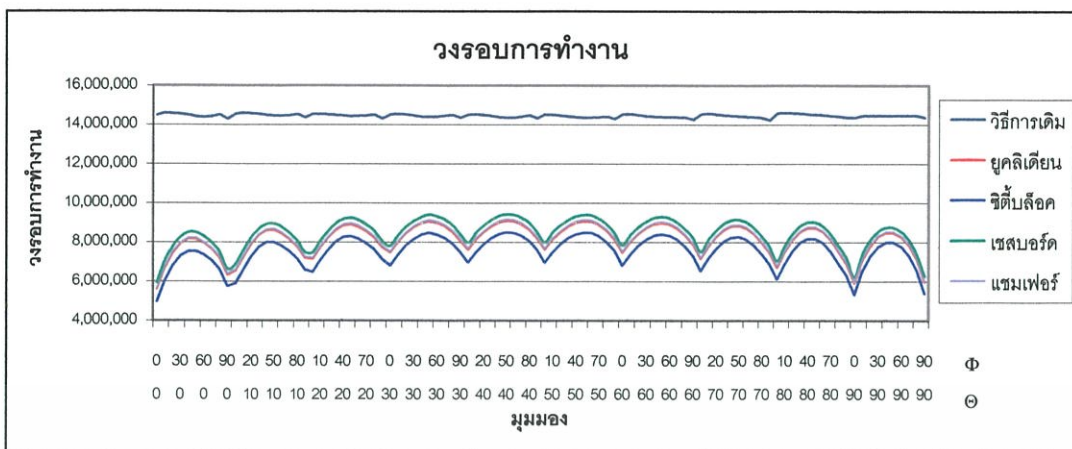


(ง) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางเซสบอร์ด

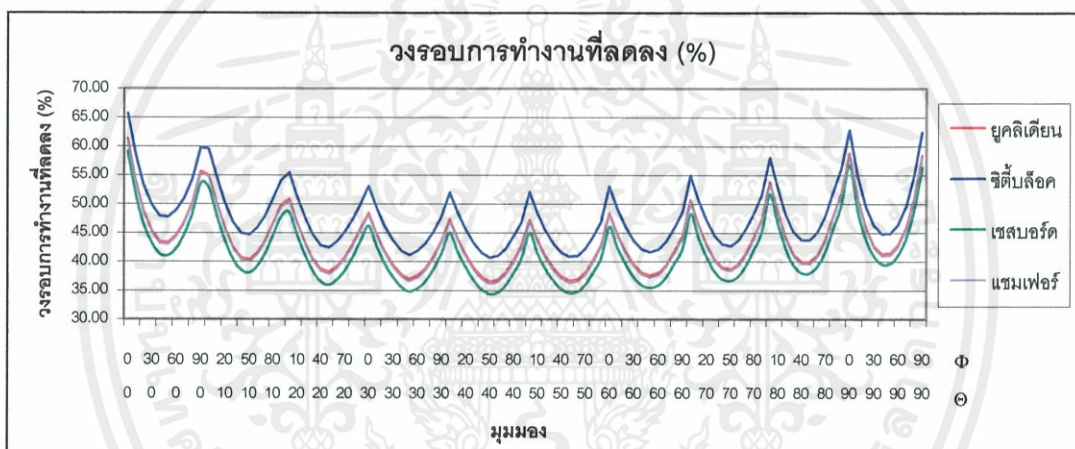


(จ) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางแฮมเฟอริ์

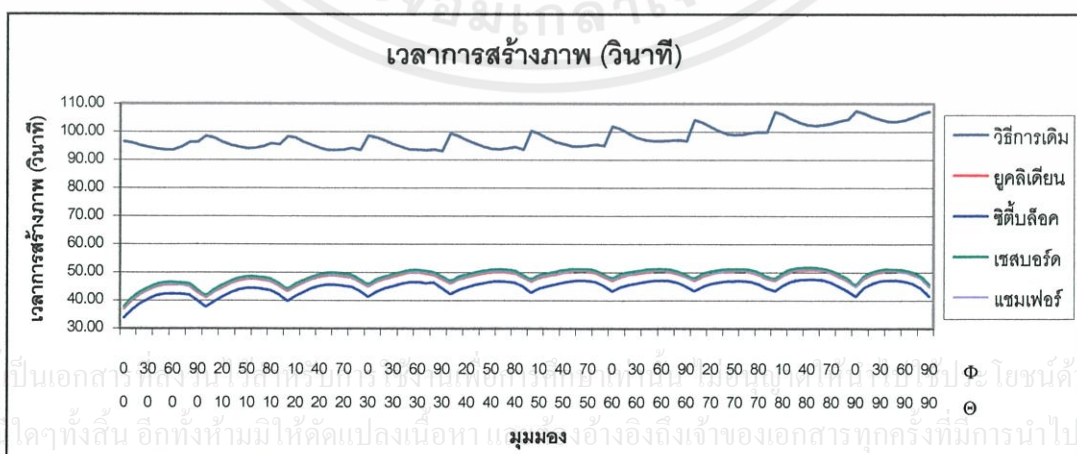
**รูปที่ 6.15** ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพโดยใช้ระยะทางแบบต่างๆ (ก) ภาพที่สร้างจากวิธีการปกติ (ข) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางยูคลิดเดียน (ค) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางซิติบิล็อค (ง) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางเซสบอร์ด (จ) ภาพที่สร้างจากการใช้ระยะทางแฮมเฟอริ์



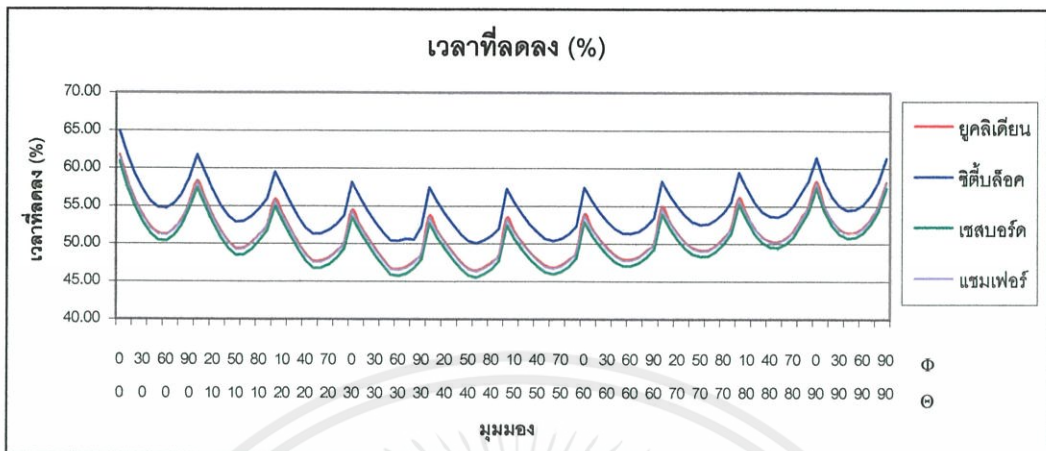
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงวงรอบในการทำงานของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลสี่ระยะผู้ใหญ่วัยด้วยระยะทางแบบต่างๆ



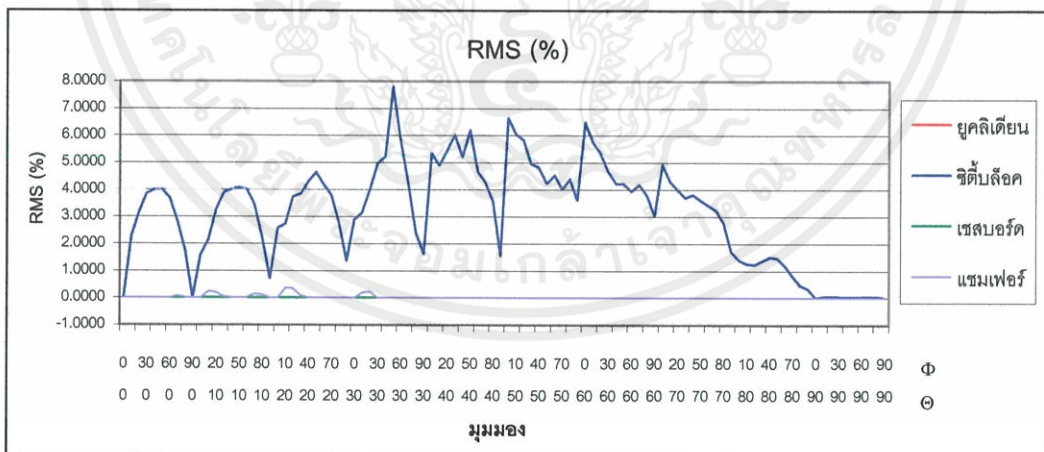
รูปที่ 6.17 กราฟแสดงวงรอบการทำงานที่ลดลงของการสร้างภาพจากชุดข้อมูลสี่ระยะผู้ใหญ่วัยด้วยระยะทางแบบต่างๆ



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลสี่ระยะผู้ใหญ่วัยด้วยระยะทางแบบต่างๆ



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงเวลาในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่วัดลดลงเมื่อนำระยะทางแบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS ในการสร้างภาพจากชุดข้อมูลศีรษะผู้ใหญ่วัดเมื่อนำระยะทางแบบต่างๆ มาช่วยในการสร้างภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อมีผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 6.11, 6.13, 6.17 และ 6.19 พบว่าการนำระยะทางมาใช้กับการสร้างภาพเชิงปริมาตรสามารถลดวงรอบในการทำงานและเวลาในการสร้างภาพได้ 35-65% เมื่อเทียบกับการสร้างภาพด้วยวิธีการตามปกติ [10] และถ้าพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ระยะทางแบบต่างๆ นั้นจะเห็นได้ว่า การใช้ระยะทางแบบซิดีบล็อคให้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดมากที่สุด เมื่อพิจารณาจากภาพผลลัพธ์และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS ในรูปที่ 6.14 และ 6.20 ซึ่งอยู่ที่ 8-14% ส่วนระยะทางแบบแฮมเฟอริให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไปบ้างเล็กน้อยประมาณ 0.5% ในขณะที่การใช้ระยะทางแบบยูคลิเดียนและระยะทางแบบเซสบอร์ดให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกับการสร้างภาพด้วยวิธีการตามปกตินั้นคือมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน RMS เป็นศูนย์ แต่เวลาและวงรอบในการทำงานของการใช้ระยะทางแบบเซสบอร์ดมากกว่าระยะทางแบบยูคลิเดียนอยู่ระหว่าง 0-3%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

### 7.1 สรุปผลการทดลอง

การขยายปริมาตรตามแนวแกนสไลซ์เพื่อชดเชยความไม่ต่อเนื่องของลำดับภาพจัดเป็นขั้นตอนของการเตรียมข้อมูลที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง จากผลการทดลองพบว่ากรอินเทอร์โพเลทแบบคิวบิกคอนโวลูชันให้ภาพผลลัพธ์ในบริเวณที่เป็นรอยต่อของสไลซ์ได้ราบเรียบมากกว่ากรอินเทอร์โพเลทแบบลิเนียร์เมื่อมีการขยายในอัตราส่วนมากๆ ดังนั้นการใช้คิวบิกคอนโวลูชันจึงเหมาะสมสำหรับขั้นตอนนี้ถึงแม้จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าก็ตาม และเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมข้อมูลภาพจะกระทำเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้น ดังนั้นเวลาในส่วนของขั้นตอนนี้จึงไม่นับรวมกับเวลาในการสร้างภาพ

ในส่วนของการอินเทอร์โพเลทข้อมูลตามแนวลำแสงนั้นกรอินเทอร์โพเลทแบบลิเนียร์จะเหมาะสมกับขั้นตอนนี้มากกว่าคิวบิกคอนโวลูชัน เนื่องจากระยะห่างของกรอินเทอร์โพเลทมีค่าน้อยและจำกัดอยู่แค่ภายในขอบเขตของว็อกเซล ดังนั้นภาพผลลัพธ์ที่ได้จึงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันแต่เวลาและกรคำนวณที่ใช้ในการสร้างภาพแตกต่างกันมาก

จากผลการทดลองเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรซึ่งเป็นส่วนที่เป็นหัวข้อหลักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสรุปได้ว่าระยะทางที่ช่วยให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรสามารถทำได้รวดเร็วที่สุดคือระยะทางแบบซิด์บิล็อค แต่ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ระยะทางแบบนี้มีความผิดเพี้ยนไปจากวิธีการสร้างภาพแบบเดิมมากจนสังเกตได้ด้วยตาเปล่าถึงรูปร่างของกะโหลกศีรษะผิดปกติไป ดังนั้นการใช้ระยะทางแบบซิด์บิล็อคจึงไม่เหมาะสมในการสร้างภาพเชิงปริมาตรถึงแม้มันจะใช้เวลาและวงรอบการทำงานน้อยกว่าการใช้ระยะทางแบบอื่นก็ตาม เหตุผลหนึ่งซึ่งทำให้ภาพผลลัพธ์ผิดเพี้ยนไปมากเนื่องจากการแปลงระยะทางแบบนี้ให้ค่าระยะทางที่มากกว่าการแปลงแบบอื่นๆ ดังนั้นเมื่อนำระยะทางซิด์บิล็อคมาใช้เป็นข้อมูลให้แสงกระโดดข้ามบริเวณที่เป็นอากาศจึงทำให้การเริ่มรวมองค์ประกอบภาพเลยเข้าไปในเนื้อวัตถุถึงโปร่งแสง ภาพผลลัพธ์ที่สร้างได้จึงมีรูปร่างที่ผิดปกติไป

สำหรับการสร้างภาพด้วยระยะทางแบบแฮมเฟอร์นั้นใช้เวลาและวงรอบในการทำงานใกล้เคียงกับการใช้ระยะทางแบบยูคลิเดียน แต่ผลลัพธ์ที่ได้จะมีลักษณะที่แตกต่างจากวิธีการแบบเดิมเล็กน้อย ส่วนระยะทางที่เหมาะสมแก่การสร้างภาพเชิงปริมาตรมากที่สุดคือ ระยะทางแบบยูคลิเดียน และรองลงมาคือระยะทางแบบเชสบอร์ด เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างไปจากการสร้างภาพด้วยวิธีการเดิมซึ่งใช้การพิจารณาว็อกเซลทุกตัวภายในปริมาตร นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลา

และวงรอบในการสร้างภาพไปได้ 35-65% โดยที่การใช้ระยะทางแบบเซสบอร์ดจะลดวงรอบและเวลาในการสร้างภาพได้น้อยกว่าระยะทางแบบยูคลิเดียนเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากระยะทางแบบเซสบอร์ดจะมีค่าน้อยกว่าการแปลงระยะทางแบบอื่นๆ ดังนั้นแสงจะกระโดดข้ามบริเวณที่เป็นอากาศได้น้อยกว่าระยะทางแบบอื่น ส่วนระยะทางแบบยูคลิเดียนมีลักษณะที่ล้อมรอบวัตถุแบบต่อเนื่องดังนั้นการที่แสงกระโดดข้ามบริเวณที่เป็นฉากหลังและเข้าถึงบริเวณที่เป็นวัตถุในทุกทิศทางจะทำได้ดีกว่าระยะทางแบบอื่นๆ

## 7.2 แนวทางการพัฒนา

ถึงแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพจะลดลงไป 35-65% แล้วก็ตาม แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้การสร้างภาพอยู่ในระดับเวลาจริง (Real Time) การพัฒนางานวิจัยในการสร้างภาพเชิงปริมาตรที่ควรดำเนินต่อไปคือ การเพิ่มความเร็วของการสร้างภาพในแต่ละมุมมองให้มีค่าอยู่ในระดับเวลาจริง การใช้ตัวประมวลผลกลางที่มีความเร็วมากขึ้นหรือใช้สถาปัตยกรรมการคำนวณแบบขนานก็อาจเป็นทางออกหนึ่งซึ่งสามารถทำได้ ส่วนแนวทางการพัฒนาอีกอย่างที่น่าสนใจคือ การพัฒนาอัลกอริทึมในส่วนของการสร้างภาพให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การลดความซ้ำซ้อนของการคำนวณในขณะที่แสงเดินทางอยู่ในเนื้อวัตถุชนิดเดียวกันที่ไม่ใช่อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Tiede U., Hoehne K. H., Bomans M., Pommert A., Riemer M. and Wiebecke G., "Investigation of medical 3D – rendering algorithms" IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 10, No. 2, March 1990, pp. 41-53.
- [2] สุพจน์ จันทรวีวัฒน์, สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์, กิตติพล ชิตสกุล และ มนต์ สังวรศิลป์ "การสร้างภาพ 3 มิติ โดยใช้วิธีพิจารณาจากเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 20 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540 หน้า 542-547
- [3] สุพจน์ จันทรวีวัฒน์. "การสร้างภาพ 3 มิติ จากลำดับของข้อมูลภาพตัดขวางโดยใช้วิธีพิจารณาจากเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541
- [4] Lorensen W. E. and Cline H. E., "Marching Cubes : A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm" Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), Vol. 21, No.4, July 1987, pp. 163 – 169.
- [5] Paiboonrattanakorn W., Banditwong N., Sangworasilp M., Kusirivanitchakorn P., " Three Planes Contour Technique for 3-D Medical Image Rendering" Proc. IEEE-ISPACS, Phuket, Thailand, Dec 1999, pp. 681 – 684.
- [6] Drebin R. A., Carpenter L. and Hanrahan P., "Volume Rendering" Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), Vol. 22, No.4, July 1987, pp. 65 – 74.
- [7] Ney D. R., Fishman E. K., Magid D. and Drebin R. A., "Volumetric Rendering" IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 10, No. 2, March 1990, pp. 24-32.
- [8] วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร, ประเสริฐ อัครวงษ์สกุล, กิตติพล ชิตสกุล และ มนต์ สังวรศิลป์ "การแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลภาพดิจิตอลที่ได้จากการหมุนภาพ " การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2541. หน้า 94-97
- [9] Levoy M., "Display of Surface from Volume Data" IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 8, No.3, May 1988, pp. 29-37.

- [10] วรเทพ ไพบูลย์รัตนกร เกษมสุข เสพศิริสุข สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์ และ มนต์ สังวรศิลป์  
"อัลกอริธึมสำหรับสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม  
ไฟฟ้าครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2542 หน้า 369-372
- [11] David F. Rogers, J. Alan Adams. *Mathematical Element for Computer Graphic*. 2nd  
Ed. New York : McGraw-Hill, Inc. 1990.
- [12] Alan Watt, Fabio Policarpo. *The Computer Image*. Harlow : Addison Wesley  
Longman, Ltd. 1998.
- [13] ชฎิล แก้วปลั่ง. "แบบจำลองการส่องสว่างของวัตถุในคอมพิวเตอร์กราฟิก." วิทยานิพนธ์  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.
- [14] Barthold Lichtenbelt, Randy Crane and Shaz Naqvi. *Introduction to Volume  
Rendering*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1998.
- [15] Sabella P. "A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields." *Computer  
Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, Vol. 22, No.4, August 1988, pp. 51-58.
- [16] Gabriele Lohmann. *Volumetric Image Analysis*. Chichester : John Willy & Sons, Inc.  
1998.
- [17] Zuiderveld K. J., "Visualization of Multimodality Medical Volume Data using Object-  
Oriented Methods.", Ph.D. Thesis of University of Utrecht, 1995.
- [18] วรเทพ ไพบูลย์รัตนกร นนท์ บัณฑิตวงษ์ สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์ และ มนต์ สังวรศิลป์  
"การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์โดยใช้การแปลงระยะทาง"  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2543 หน้า 449-  
452

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร ประเสริฐ อัครรุ่งสกุล กิตติพล ชิตสกุล และ มนัส สังวรศิลป์ "การแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลภาพดิจิทัลที่ได้จากการหมุนภาพ" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี พ.ศ. 2541 หน้า 94-97
2. วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร เกษมสุข เสพศิริสุข สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์ และ มนัส สังวรศิลป์ "อัลกอริทึมสำหรับสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2542 หน้า 369-372
3. วรเทพ ไพบูลย์รัตนากร นนท บัณฑิตวงษ์ สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์ และ มนัส สังวรศิลป์ "การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์โดยใช้การแปลงระยะทาง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2543 หน้า 449-452
4. Paiboonrattanakorn, W., Banditwong, N., Sangworasilp, M., Kusirivanitchakorn, P., "Three Planes Contour Technique for 3-D Medical Image Rendering" Proc. IEEE-ISPACS, Phuket, Thailand, Dec 1999, pp.681 – 684.
5. Paiboonrattanakorn, W., Rattanametawee, N., Chitsakul, K. and Sangworasilp, M., "Speed-up Volume Rendering in Medical Image by Using Distance Transform" Proc. First International Conference on Mechatronics - ICOM01, Kuala Lumpur, Malaysia, Feb 2001, pp.468 – 475.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายวรเทพ ไพบูลย์รัตนากร เกิดเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม 2517 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้