

การเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์
ด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

SPEED-UP THREE DIMENSIONAL MEDICAL IMAGE RECONSTRUCTION
USING BIDIRECTIONAL-SKIPPED DISTANCE TRANSFORM

ศนากรณ์ รัตนเมธาวี

TANAPORN RATTANAMETAWEE

วิทยานิพนธ์ฉบับเต็มของภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
วิทยาลัยวิศวกรรมและเทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปี พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-974-7

การเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์
ด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

SPEED-UP THREE DIMENSIONAL MEDICAL IMAGE RECONSTRUCTION
USING BIDIRECTIONAL-SKIPPED DISTANCE TRANSFORM

ธนาภรณ์ รัตนเมธาวิ

TANAPORN RATTANAMETAWEE

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 44033
วัน, เดือน, ปี... 22 ต.ค. 2545

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-974-7

**SPEED-UP THREE DIMENSIONAL MEDICAL IMAGE RECONSTRUCTION
USING BIDIRECTIONAL-SKIPPED DISTANCE TRANSFORM**

TANAPORN RATTANAMETAWE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-648-974-7

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ด้วย การแปลงระยะทางสองทิศทาง
นักศึกษา	นางสาว ธนาภรณ์ รัตนเมธาวิ
รหัสประจำตัว	43061311
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ เป็นเทคนิคการสร้างภาพ 3 มิติ ที่ช่วยให้เรามองเห็น โครงสร้างของอวัยวะที่มีความเกี่ยวเนื่องกันได้ ซึ่งจะพิจารณาถึงค่าความทึบแสงของอวัยวะแต่ละส่วนจึงต้องใช้เวลาในการสร้างภาพแต่ละมุมมองค่อนข้างนาน สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากต้องใช้เวลาในการฉายแสงและประกอบภาพส่วนที่เป็นฉากหลังของภาพ บริเวณฉากหลังจะไม่มีข้อมูลของอวัยวะและถูกกำหนดให้เป็นวัตถุโปร่งใสโดยสมบูรณ์หรือค่าความทึบแสงเป็นศูนย์ และไม่มียผลใดๆในการประกอบภาพให้เป็นภาพ 3 มิติเลย ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้เทคนิคการแปลงระยะทางสามมิติ มาทำการสร้างปริมาตรระยะทางของปริมาตรภาพ โดยให้แสงที่ฉายเข้ามากระโดดข้ามบริเวณฉากหลังนี้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ทำให้เข้าถึงวัตถุโปร่งใสได้เร็วขึ้น

Thesis Title	Speed-Up Three dimensional Medical Image Reconstruction Using Bidirectional-Skipped Distance Transform
Student	Miss Tanaporn Rattanametawee
Student ID.	43061311
Degree	Master of Engineering
Programme	Electronic Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Manas Sangworasil

ABSTRACT

Volume rendering technique of medical imaging data has been widely used to display three-dimensional (3D) structures of human organs. Because differences in tissue opacities are considered, it requires longer computation time for constructing 3D objects than the surface rendering technique. The reason is that volume rendering needs times to cast the rays and to compose image at the background of the object. The background of each image contains no information on the organs and is completely transparent. This research proposes a technique to reconstruct a 3D structure that is faster than those in the previous studies [1]. We use the 3D distance transform to create the distance volume, between the completely transparent background and the semi-transparent object. Rays use this distance data to skip the unnecessary steps within the background region in the front and back direction. Therefore, the ray can access the semi-transparent object faster than the previous method.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดี ก็ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคล
หลายๆฝ่ายด้วยกัน

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ผู้ซึ่งคอยให้การอบรมสั่งสอน เลี้ยงดู ตลอดจนกำลังใจ
เสมอมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ซึ่งให้คำปรึกษา และคำแนะนำ
ต่างๆ รวมทั้งความเอื้อเฟื้อเครื่องมือเครื่องใช้ในการทำวิจัย ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาของ
ท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร.กิติพล ชิตสกุล ดร. สุพันธ์ ตั้งจิตสกุลมัน ผศ.ดร.สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์
ดร.บุษนา คิดใจเดียว และ ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.นายแพทย์รามศรี วัชรสินธุ์ และ แพทย์หญิงจิรพร เหล่าธรรมทัศน์
จากภาควิชารังสี โรงพยาบาลรามธิบดี ที่เอื้อเฟื้อชุดข้อมูลภาพ CT ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวรเทพ ไพบูลย์รัตนกร และคุณเกษมสุข เสพศิริสุข ที่ช่วยให้แนวคิดและ
คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ คุณเชษฐ ทัตทอง คุณบุญอนันต์ เกียงเอีย คุณนิธินันท์ โยวราช คุณอุมาพร
ทองรักษ์ ที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการจัดทำวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้

ธนาภรณ์ รัตนเมธาวิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 โครงร่างของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวและการสร้างภาพเชิงปริมาตร.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิว.....	4
2.2.1 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยการฉายภาพตามทิศทางการมอง.....	4
2.2.2 การคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่าของพิกัดรอบข้าง.....	5
2.2.3 การคำนวณเวกเตอร์ปกติจากเกรเดียนต์ของค่าระดับเทา.....	6
2.2.4 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยการใช้คอนทัวร์ของสามระนาบ.....	7
2.2.5 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีมาร์ชชิงคิวบ์.....	7
2.3 การสร้างภาพเชิงปริมาตร.....	9
2.4 สรุป.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นในการสร้างภาพสามมิติ.....	11
3.1 บทนำ.....	11
3.2 องค์ประกอบพื้นฐาน.....	11
3.3 ระบบพิกัด.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การแปลงเรขาคณิต	12
3.4.1 การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง	14
3.4.2 การสเกล	15
3.4.3 การหมุนวัตถุ	15
3.4.4 การแปลงแบบผสม	17
3.5 การโปรเจกชัน	18
3.5.1 การโปรเจกชันแบบขนาน	18
3.5.2 การโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟ	20
3.6 การส่องสว่างและการให้แสงเงา	21
3.6.1 เกรเดียนต์	22
3.6.1.1 ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์	24
3.6.1.2 การใช้เกรเดียนต์ในการสร้างภาพเชิงปริมาตร	25
3.6.2 แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong	25
3.6.2.1 แสงแวดล้อม	26
3.6.2.2 การสะท้อนแบบกระจาย	26
3.6.2.3 การสะท้อนแบบกระจก	27
3.6.3 การให้แสงเงาแบบ Gouraud และ Phong	28
3.6.4 ความแตกต่างของแบบจำลองการให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong	29
3.6.5 การให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตร	30
3.7 สรุป	31
บทที่ 4 การประมวลผลภาพในการสร้างภาพเชิงปริมาตร	32
4.1 บทนำ	32
4.2 การแบ่งกลุ่มข้อมูล	32
4.2.1 ฮิสโตแกรม	33
4.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน	33
4.3 การอินเทอร์โพลท	36
4.3.1 การอินเทอร์โพลทแบบเนียร์สเนบอร์	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การอินเทอร์โพเลทแบบเนยลิเนียร์.....	38
4.3.3 การอินเทอร์โพเลทแบบเนยคิวบิกคอนโวลูชัน.....	40
4.4 การประกอบภาพ.....	42
4.4.1 สมการในการสร้างภาพเชิงปริมาตร.....	42
4.4.2 การประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง.....	44
4.4.3 การประกอบภาพแบบหลังไปหน้า.....	46
4.4.4 ความทึบแสงแทนความโปร่งแสง.....	47
4.5 สรุป.....	48
บทที่ 5 การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง.....	49
5.1 บทนำ.....	49
5.2 การวัดระยะทาง.....	49
5.2.1 ระยะทางแบบยูคลิเดียนด์.....	50
5.2.2 ระยะทางแบบซิติบลิ็อก.....	50
5.2.3 ระยะทางแบบเชสบอร์ด.....	50
5.3 การแปลงระยะทางยูคลิเดียนด์สองมิติ.....	51
5.3.1 การแปลงครั้งที่ 1.....	52
5.3.2 การแปลงครั้งที่ 2.....	52
5.4 การแปลงระยะทางยูคลิเดียนด์สามมิติ.....	52
5.4.1 การแปลงครั้งที่ 1.....	53
5.4.2 การแปลงครั้งที่ 2.....	53
5.4.3 การแปลงครั้งที่ 3.....	53
5.5 การใช้การแปลงระยะทางในการสร้างภาพเชิงปริมาตร.....	53
5.6 สรุป.....	56
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง.....	57
6.1 บทนำ.....	57
6.2 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 การสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทาง.....	58
6.4 การสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีการแปลง ระยะทาง สองทิศทาง.....	62
6.5 เปรียบเทียบเวลาทั้งหมดในการสร้างภาพมุมมองต่างๆระหว่างวิธีดั้งเดิมและ วิธีแปลงระยะทางสองทิศทาง.....	65
6.6 เปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีใช้การแปลงระยะทางสอง ทิศทางระหว่างชุดข้อมูลภาพที่มีสัญญาณรบกวนและไม่มีสัญญาณรบกวน.....	66
บทที่ 7 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา.....	71
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	71
7.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ปัญหา.....	72
7.3 แนวทางการพัฒนา.....	72
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรในมุมมองต่างๆด้วยวิธีดั้งเดิมและ ใช้การแปลงระยยะทางสองทิศทาง.....	61
6.2 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรในมุมมองต่างๆด้วยวิธีการใช้การ แปลงระยยะทางทิศทางเดียวและสองทิศทาง.....	64
6.3 เวลาทั้งหมดในกระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยยะทางสองทิศทาง.....	65
6.4 เวลาที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการการสร้างภาพสี่ระยยะเด็กมุมมองต่างๆด้วยวิธีดั้งเดิม.....	65
6.5 เวลาที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการการสร้างภาพไทรอยด์มุมมองต่างๆด้วยวิธีดั้งเดิม.....	66
6.6 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพที่ไม่มีสัญญาณรบกวนกับมีสัญญาณรบกวนที่ มีความแปรปรวนค่าต่างๆ.....	70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การสแกนข้อมูลตามทิศทางการมอง	4
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ปกติกับเวกเตอร์แหล่งกำเนิดแสงของกฎของแลมเบิร์ต	5
2.3 การคำนวณหาเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้พิกัดรอบข้าง	5
2.4 จุดต่างๆ ทั้ง 3 แกนที่ใช้ในการพิจารณาค่าเกรเดียนต์ของค่าระดับเทา	6
2.5 (ก) ระนาบหลักทั้ง 3 ระนาบที่ใช้ในการสร้างภาพเชิงพื้นผิว	7
(ข) คอนทัวร์ของทั้ง 3 ระนาบที่ใช้ในการสร้างภาพเชิงพื้นผิว	7
2.6 ลูกบาศก์ที่สมมติขึ้นจากข้อมูลของสไลซ์ที่อยู่ติดกัน 8 จุด	8
2.7 รูปแบบการจัดเรียงของสามเหลี่ยมภายในลูกบาศก์ที่เป็นไปได้	8
2.8 ลักษณะการเรียงลำดับมุมและขอบของลูกบาศก์ที่สมมติขึ้น	9
2.9 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง	10
3.1 ลักษณะความแตกต่างระหว่างพิกเซลกับว็อกเซล	11
3.2 ระบบพิกัดสามมิติ	12
3.3 ส่วนประกอบต่างๆของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส	13
3.4 การย้ายตำแหน่งจุดกึ่งกลางของปริมาตรต้นฉบับมาอยู่ที่จุดกำเนิด	14
3.5 การแปลงแบบหมุนรอบแกนทั้งสาม	16
3.6 การฉายแสงแบบขนานเข้าไปในปริมาตร	19
3.7 การโปรเจกชันแบบขนาน	19
3.8 ลักษณะของลำแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตร	20
3.9 การฉายแสงแบบเปอร์สเปกทีฟ	21
3.10 ลักษณะของลำแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตร	21
3.11 คอมพิวเตอร์กราฟฟิก	22
3.12 ขอบเขตของวัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกัน และทิศทางของเกรเดียนต์	23
3.13 ตัวอย่างการประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์	24
3.14 การสะท้อนแบบกระจาย	27
3.15 ตำแหน่งการสะท้อนแบบกระจก	28
3.16 โพลิกอนที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ปกติที่มุมยอด	29
3.17 การให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong	29
3.18 การให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตร (ก) แบบ Gouraud (ข) แบบ Phong	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ฮีสโตแกรม	33
4.2 ตัวอย่างฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลสำหรับวัตถุเนื้อเดียว	34
4.3 ลักษณะโดยทั่วไปและการแบ่งกลุ่มข้อมูลของรีกเซลในชุดข้อมูลจากเครื่อง CT	35
4.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง	35
4.5 เคอร์เนลอินเทอร์โพลชันแบบต่างๆ	36
4.6 กระบวนการอินเทอร์โพลชัน	37
4.7 การอินเทอร์โพลทสามมิติ	37
4.8 (ก) เคอร์เนลของอินเทอร์โพลทแบบเนียร์สเนบอร์	38
(ข) ลักษณะของอินเทอร์โพลทแบบเนียร์สเนบอร์	38
4.9 การอินเทอร์โพลทแบบลิเนียร์	39
4.10 เคอร์เนลอินเทอร์โพลชันแบบลิเนียร์	39
4.11 ขั้นตอนการอินเทอร์โพลทแบบไบลิเนียร์ 3 ขั้นตอน	40
4.12 เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลทแบบคิวบิกคอนโวลูชัน	40
4.13 การอินเทอร์โพลทแบบคิวบิกคอนโวลูชันที่จุด d	41
4.14 ลักษณะของลำแสงที่พุ่งเข้าไปในปริมาตรจากจุด a ไปยังจุด b ตามทิศทาง ds	42
4.15 การประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง	45
4.16 การประกอบภาพแบบหลังไปหน้า	47
5.1 ตัวอย่างลักษณะการวัดระยะทางแบบต่างๆ	50
5.2 ค่าที่ได้จากการวัดระยะทางแบบต่างๆ	51
5.3 ดิสก์ของการวัดระยะทางแบบต่างๆ	51
5.4 ดิสก์หลายชั้นที่ซ้อนกันอยู่รอบวัตถุ	54
5.5 การเดินทางของแสงภายในปริมาตรระยะทาง	54
5.6 ขั้นตอนการสร้างปริมาตรของระยะทาง	55
5.7 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง	56
6.1 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง	58
6.2 ภาพสี่ระแวกที่ได้จากสร้างด้วยวิธีดั้งเดิมในมุมมองต่างๆ	59
6.3 ภาพสี่ระแวกที่ได้จากสร้างด้วยวิธีใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ	59
6.4 ภาพไทรอยด์ที่ได้จากสร้างด้วยวิธีดั้งเดิมในมุมมองต่างๆ	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5 ภาพโทรรอยด์ที่ได้จากสร้างด้วยวิธีใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ.....	59
6.6 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพศีรษะเด็กในมุมมองต่างๆของวิธีดั้งเดิมและ วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ.....	60
6.7 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพโทรรอยด์ในมุมมองต่างๆของวิธีดั้งเดิมและ วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ.....	60
6.8 กราฟแสดงเวลาที่ลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อใช้วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางแทน การใช้วิธีดั้งเดิมในการสร้างภาพศีรษะเด็กและโทรรอยด์ในมุมมองต่างๆ.....	60
6.9 ภาพศีรษะเด็กที่ได้จากสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวในมุมมองต่างๆ.....	62
6.10 ภาพศีรษะเด็กที่ได้จากสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ.....	62
6.11 ภาพโทรรอยด์ที่ได้จากสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวในมุมมองต่างๆ.....	62
6.12 ภาพโทรรอยด์ที่ได้จากสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ.....	63
6.13 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพศีรษะเด็กในมุมมองต่างๆของวิธีการแปลง ระยะทางทิศทางเดียวและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ.....	63
6.14 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพโทรรอยด์ในมุมมองต่างๆของวิธีการแปลง ระยะทางทิศทางเดียวและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ.....	63
6.15 กราฟแสดงเวลาที่ลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อใช้วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางแทน การใช้วิธีการแปลงระยะทางทิศทางเดียวในการสร้างภาพศีรษะเด็กและโทรรอยด์ใน มุมมองต่างๆ.....	64
6.16 การกระจายของสัญญาณรบกวนที่มีความแปรปรวนค่าต่างๆบนสไลซ์ที่ 31 ของชุด ข้อมูลภาพศีรษะเด็กและสไลซ์ที่ 40 ของชุดข้อมูลภาพโทรรอยด์.....	67
6.17 ภาพเชิงปริมาตรที่มีสัญญาณรบกวนที่มีค่าความแปรปรวนต่างๆ.....	68
6.18 กราฟเวลาที่แตกต่างกันในการสร้างภาพศีรษะเด็กที่ไม่มีสัญญาณรบกวนและมีสัญญาณ รบกวนที่มีความแปรปรวนค่าต่างๆ.....	69
6.19 กราฟเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่เพิ่มขึ้นในการสร้างภาพศีรษะเด็กที่ไม่มีสัญญาณรบกวน และมีสัญญาณรบกวนที่มีความแปรปรวนค่าต่างๆ.....	69
1. การถ่ายภาพรังสีเอกซ์ชนิดโทโมกราฟฟีแบบเก่า.....	76
2. ภาพโทโมกราฟฟีตามแกนและภาพโทโมกราฟฟีตามขวาง.....	76
3. หลักการของเครื่อง CT รุ่นแรกของบริษัท EMI.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4. การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงของรังสีเอกซ์ผ่านไปตามระนาบของผู้ป่วยที่ต้องการดู.....	77
5. การสแกนครั้งแรก, ครั้งที่ 60 และครั้งที่ 120.....	78
6. ก) การดูคลื่นรังสีโดยวัตถุที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ.....	79
ข) การดูคลื่นรังสีโดยวัตถุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน.....	79
7. แผนภาพการคำนวณสร้างภาพตามวิธีการอิทเทอร์ชัน.....	81
8. การสร้างภาพตัดขวางด้วยวิธี Simple back projection.....	82
9. แผนภาพแสดงการสร้างภาพด้วยวิธี Simple back projection.....	83
10. ขบวนการฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน.....	84
11. แผนภาพแสดงการสร้างภาพของฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน.....	84
12. ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพตัดขวางด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SNARK93.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สมัยก่อนการวินิจฉัยโรคต่างๆของคณะแพทย์จะใช้การพิจารณาจากภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ซึ่งเป็นฟิล์มภาพสองมิติที่ให้รายละเอียดในระนาบเดียว ซึ่งเป็นความลำบากในการวินิจฉัยโรคของแพทย์ ต่อมาได้มีการพัฒนาใช้เครื่องเอกซเรย์แบบ CT (computer Tomography) และเครื่อง MRI (Magnetic Resonance Image) มาใช้ถ่ายภาพตัดขวางของร่างกายมนุษย์ ทำให้แพทย์ทราบถึงรายละเอียดของอวัยวะต่างๆภายในร่างกายได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามภาพที่ได้นี้ก็ยังมีลักษณะเป็นสองมิติเช่นเดิม ส่งผลให้มีการวิเคราะห์และจินตนาการเค้าโครงของอวัยวะจากข้อมูลภาพตัดขวางนี้ซึ่งมีจำนวนนับสิบหรือร้อยภาพในหนึ่งชุดข้อมูล จากสาเหตุนี้เองจึงได้มีงานวิจัยโดยนำชุดข้อมูลภาพเหล่านี้มาสร้างให้ในอยู่ลักษณะสามมิติ เพื่อลดความยุ่งยากและความลำบากในการวินิจฉัยโรคของแพทย์โดยเฉพาะโรคที่ต้องการทราบเค้าโครงที่แน่นอน ลักษณะของการสร้างภาพสามมิติได้แบ่งออกเป็นสองวิธีใหญ่ๆคือ การสร้างภาพเชิงพื้นผิว (Surface Rendering) และการสร้างภาพเชิงปริมาตร (Volume Rendering)

การสร้างภาพเชิงพื้นผิว (Surface Rendering) จะแสดงให้เห็นภาพในส่วนที่เป็นพื้นผิวภายนอกเท่านั้น และมีการใช้เวลาในการสร้างภาพแต่ละมุมมองน้อย แต่ไม่สามารถแสดงให้เห็นส่วนภายในได้ ซึ่งจุดนี้เองถือเป็นข้อด้อยของการสร้างภาพด้วยวิธีนี้ การสร้างภาพเชิงปริมาตร (Volume Rendering) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ นั่นคือวิธีนี้จะสามารถแสดงส่วนภายในของอวัยวะให้เห็นได้โดยการกำหนดความแตกต่างของคุณสมบัติความโปร่งแสง (Transparency) ของอวัยวะภายในที่ไม่เท่ากัน ทำให้สามารถแสดงส่วนของอวัยวะภายในที่มีขอบเขตไม่ชัดเจนได้ เช่น เนื้อเยื่อต่างๆ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือต้องใช้เวลาในการสร้างภาพแต่ละมุมมองค่อนข้างนาน ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาถึงข้อมูลในการสร้างภาพแต่ละมุมมองเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามวิธีการสร้างภาพเชิงพื้นผิวก็เป็นการแสดงภาพรายละเอียดของอวัยวะได้ในขอบเขตที่จำกัด จึงนิยมใช้การสร้างภาพเชิงปริมาตรมากกว่า แม้ว่าจะใช้เวลาในการสร้างนานกว่าก็ตาม แต่ก็ยังให้รายละเอียดของภาพผลลัพธ์ได้ดีกว่ามาก ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์และวินิจฉัยโรคต่างๆทางการแพทย์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

มุ่งเน้นที่จะพัฒนาให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรในแต่ละมุมมองมีความรวดเร็วยิ่งขึ้นกว่าอัลกอริทึมเดิมที่มีอยู่ โดยยังคงความถูกต้องเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมเดิมนั้นไว้ให้มากที่สุด

1.3 แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้สูญเสียเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรคือ การฉายแสงและประกอบภาพบนบริเวณที่เป็นฉากหลังของภาพ ซึ่งเป็นบริเวณกว้างและไม่มีผลต่อภาพผลลัพธ์ แนวคิดของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การพยายามเข้าถึงบริเวณที่เป็นวัตถุในภาพให้เร็วที่สุด โดยไม่นำส่วนที่เป็นฉากหลังมาคำนวณด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การแปลงระยะทางสามมิติแบบยูคลิดีียนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการสร้างภาพเชิงปริมาตร โดยจะอาศัยข้อมูลระยะทางเป็นตัวช่วยในการให้แสงกระโดดข้ามส่วนที่เป็นฉากหลังไป ซึ่งในการกระโดดข้ามนี้จะกระทำทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแนวลำแสง ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการคำนวณบริเวณฉากหลัง ดังนั้นเราจึงเข้าถึงวัตถุได้เร็วขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง โดยชุดข้อมูลที่นำมาสร้างภาพนั้นเป็นชุดข้อมูลภาพ CT ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วน ได้แก่ อากาศ, ไขมัน, กระดูก และเนื้อเยื่อ ทั้งนี้เนื่องจากภาพชนิดนี้สามารถนำมาแบ่งกลุ่มด้วยการใช้การกำหนดค่าเทรชโฮล(Threshold)ได้ ซึ่งตรงกับขั้นตอนการแบ่งกลุ่มข้อมูลในอัลกอริทึมนี้ ในส่วนของการแปลงระยะทางนั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาให้สร้างภาพได้เร็วกว่าอัลกอริทึมเดิมที่มีอยู่ จึงใช้การแปลงระยะทางแบบยูคลิดีียนต์ซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่สุดตามที่ได้รับการพิสูจน์และสรุปไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมาแล้ว [1]

1.5 โครงร่างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ตลอดจนวัตถุประสงค์และแนวคิดที่ทำให้มีงานวิจัยนี้ขึ้น และกล่าวถึงหัวข้อของเนื้อหาต่างๆที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวิธีการสร้างภาพเชิงพื้นผิวโดยการใช้เทคนิคต่างๆกันหลายวิธี และกล่าวถึงความเป็นมาของการสร้างภาพเชิงปริมาตร ตลอดจนวิธีที่ใช้ในการงานวิจัยนี้

บทที่ 3 เนื้อหาในบทนี้เป็นกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปในการสร้างภาพสามมิติที่ผู้สนใจในด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกควรจะศึกษาไว้เป็นพื้นฐานเบื้องต้น

บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนในการสร้างภาพ ซึ่งได้แก่ การแบ่งกลุ่มข้อมูล, การแทรกค่าประมาณเข้าไปในช่วงหรือการอินเทอร์โพลเทท(Interpolate) แบบต่างๆ รวมถึงการประกอบภาพวิธีต่างๆและข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี

บทที่ 5 เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายถึงเทคนิคที่นำมาใช้ในการเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร นั่นคือการใช้ระยงทางแบบยูคลิเดียนต์ และกล่าวถึงการแปลงระยงทางแบบยูคลิเดียนต์สองมิติและสามมิติ รวมถึงการนำระยงทางที่ได้นั้นมาใช้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตร

บทที่ 6 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองต่างๆ

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการทดลอง ตลอดจนปัญหาและแนวคิดที่น่าจะศึกษาต่อไป

บทที่ 2

การสร้างภาพเชิงพื้นผิวและการสร้างภาพเชิงปริมาตร

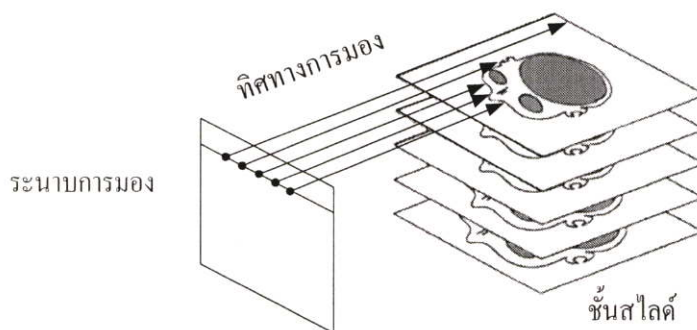
2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการสร้างภาพสามมิติที่เคยพบเห็นกันอยู่ในปัจจุบัน นั่นคือการสร้างภาพเชิงพื้นผิว และการสร้างภาพเชิงปริมาตร ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนและทฤษฎีโดยรวมต่างๆ ในการสร้างภาพอย่างคร่าวๆ เนื่องจากมีรายละเอียดต่างๆ มากมายไม่สามารถนำมาอธิบายในบทนี้ได้ทั้งหมด จึงขอออกไปอธิบายในบทต่อไป

2.2 การสร้างภาพเชิงพื้นผิว

2.2.1 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยการฉายภาพตามทิศทางการมอง

การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีนี้เป็นการฉายจุดข้อมูลภายในปริมาตรภาพลงมายังฉากหรือระนาบการมอง โดยในขั้นตอนแรกนั้น ชุดข้อมูลที่ต้องการสร้างภาพจะถูกหมุนไปในทิศทางที่ต้องการก่อน จากนั้นจะมีการกำหนดค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ขึ้นเพื่อเลือกแสดงอวัยวะส่วนที่สนใจ แล้วจึงทำการสแกนเข้าไปในชุดข้อมูลตามทิศทางการมองและตรวจสอบค่าระดับเทาของจุดข้อมูล ถ้ามีค่าระดับเทาสูงกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่ตั้งไว้ ก็จะถือว่าจุดนั้นเป็นขอบของอวัยวะที่เราสนใจ แล้วจึงหยุดการสแกนในเส้นสแกนนั้น กรณีที่เส้นสแกนทำการสแกนจนหมดทั้งปริมาตรแต่ก็ยังไม่เจอจุดข้อมูลใดมีค่าระดับเทาสูงกว่าค่าเทรชโฮลด์ ก็แสดงว่าไม่มีภาพในตำแหน่งเส้นสแกนนั้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การสแกนข้อมูลตามทิศทางการมอง

เมื่อได้ขอบของภาพอวัยวะแล้ว จะทำการคำนวณเวกเตอร์ปกติหรือเวกเตอร์ตั้งฉาก (Normal Vector) ของพื้นผิว ซึ่งวิธีในการคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติที่เหมาะสมและให้ผลในการสร้างภาพดีนั้นมี 2 วิธี คือ การคำนวณโดยอาศัยค่าจากพิกัดรอบข้างและการคำนวณจากเกรเดียนต์ของค่าระดับเทาซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

เมื่อได้ค่าเวกเตอร์ปกติแล้ว จะทำการคำนวณค่าแสงเงาของพื้นผิวนั้น โดยใช้กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ I คือ ค่าความเข้มแสงบนพื้นผิว

L คือ ค่าความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง

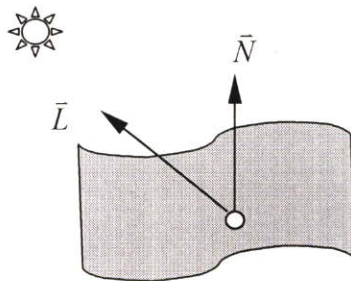
Θ คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ปกติกับทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง

ซึ่งค่า Θ สามารถคำนวณได้จากผลคูณภายในของเวกเตอร์ ดังสมการนี้

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

เมื่อ \vec{I}_L คือ เวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสง หรือก็คือทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง

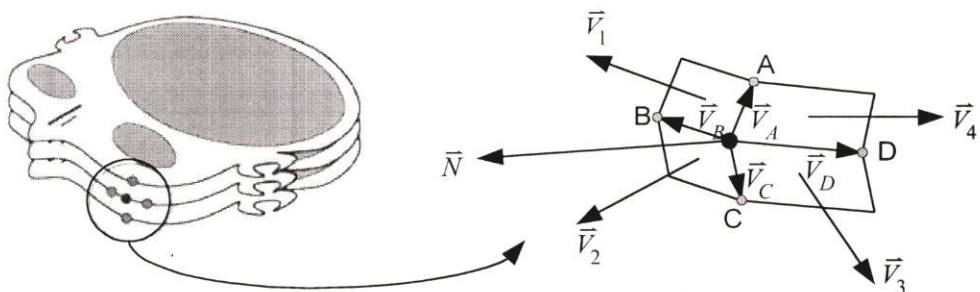
\vec{N} คือ เวกเตอร์ปกติของพื้นผิว



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ปกติกับเวกเตอร์แหล่งกำเนิดแสงของกฎของแลมเบิร์ต

2.2.2 การคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้ค่าของพิกัดรอบข้าง [2],[3]

การคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวด้วยวิธีนี้จะเป็นการนำค่าพิกัดของขอบอวัยวะที่อยู่รอบข้างจุดที่สนใจมาคำนวณประกอบกัน เพื่อสร้างเป็นเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การคำนวณหาเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวโดยใช้พิกัดรอบข้าง

จากรูป จุดทั้ง 4 จุดที่อยู่รอบข้างจุดที่สนใจนั้นจะเสมือนเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆล้อมรอบอยู่ และในสี่เหลี่ยมเล็กๆแต่ละชั้นก็จะมีเวกเตอร์ปกติของทุกๆชั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้ผลคูณไขว้ของเวกเตอร์ (Cross Product) ดังนี้

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_A \times \vec{V}_B \quad (2.3)$$

$$\vec{V}_2 = \vec{V}_B \times \vec{V}_C \quad (2.4)$$

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_C \times \vec{V}_D \quad (2.5)$$

$$\vec{V}_4 = \vec{V}_D \times \vec{V}_A \quad (2.6)$$

การคำนวณหาค่าเวกเตอร์ปกติของจุดที่สนใจสามารถหาได้จากการนำทิศทางของเวกเตอร์เหล่านี้มาทำการเฉลี่ยกันทั้งหมด ซึ่งในการเฉลี่ยนี้จะใช้การบวกแบบเวกเตอร์และพิจารณาเฉพาะทิศทาง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องนำขนาดของเวกเตอร์มาหารเวกเตอร์ที่บวกกันนี้ ดังสมการข้างล่างนี้

$$\vec{N} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 + \vec{V}_4 \quad (2.7)$$

2.2.3 การคำนวณเวกเตอร์ปกติจากเกรเดียนต์ของค่าระดับเทา [4]

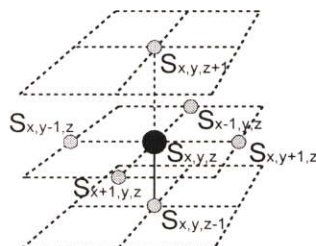
เกรเดียนต์ของค่าระดับเทาเป็นสิ่งที่สามารถบอกขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับเทาภายในชุดข้อมูลได้ ซึ่งทิศทางนี้จะนำมาใช้ในการพิจารณาเป็นเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวได้ ด้วยการนำสมการการคำนวณค่าเกรเดียนต์ดังนี้

$$N_x = S_{x+1,y,z} - S_{x-1,y,z} \quad (2.8)$$

$$N_y = S_{x,y+1,z} - S_{x,y-1,z} \quad (2.9)$$

$$N_z = S_{x,y,z+1} - S_{x,y,z-1} \quad (2.10)$$

เมื่อ N_x, N_y, N_z เป็นองค์ประกอบเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวในแกนต่างๆ และ $S_{x,y,z}$ เป็นค่าระดับเทาภายในภาพของข้อมูลที่ตำแหน่ง (x,y,z) พิจารณารูปที่ 2.4 เพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้น



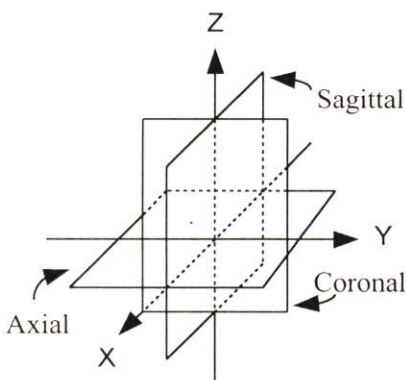
รูปที่ 2.4 จุดต่างๆทั้ง 3 แกนที่ใช้ในการพิจารณาหาค่าเกรเดียนต์ของค่าระดับเทา

และขนาดของเวกเตอร์ปกติจะหาได้จากกรากที่สองของผลบวกขององค์ประกอบเวกเตอร์ปกติทั้ง 3 แกนยกกำลังสอง ดังสมการที่ (2.11) นี้

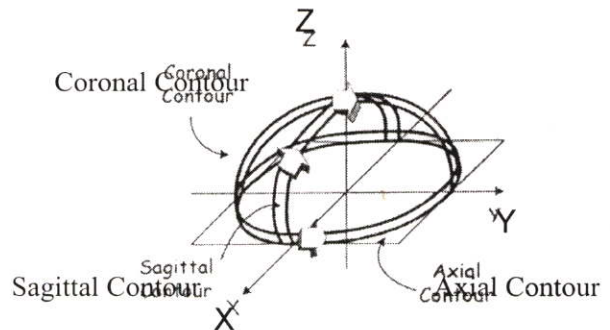
$$\|\vec{N}\| = \sqrt{(N_x)^2 + (N_y)^2 + (N_z)^2} \quad (2.11)$$

2.2.4 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยการใช้คอนทัวร์ของสามระนาบ [5]

การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีนี้จะใช้เส้นคอนทัวร์ของระนาบหลักทั้ง 3 ระนาบมาประกอบกันเป็นพื้นผิว ซึ่งได้แก่ แอ็กเซียล (Axial) , แซกกิททอล (Sagittal) และโคโรนอล (Coronal) ดังรูปที่ 2.5 แนวคิดของวิธีนี้คือการวาดเส้นคอนทัวร์เรียงซ้อนกันทั้ง 3 ระนาบจนประกอบเป็นภาพพื้นผิวที่สมบูรณ์ เหตุผลที่จะต้องใช้เส้นคอนทัวร์ทั้ง 3 ระนาบก็เนื่องมาจากหากใช้คอนทัวร์ของระนาบเดียวในทุกๆสไลซ์มาสร้างพื้นผิวจะปรากฏพื้นผิวบางส่วนที่ไม่เต็ม เช่นในการสร้างภาพกะโหลก ถ้าใช้เส้นคอนทัวร์ของระนาบแอ็กเซียลเพียงระนาบเดียวมาสร้างภาพ เมื่อประกอบภาพจนถึงส่วนบนสุดของกะโหลกจะพบว่าเป็นส่วนที่ไม่เต็มพื้นผิว ดังนั้นจึงต้องใช้คอนทัวร์ของอีก 2 ระนาบคือ ระนาบแซกกิททอลและระนาบโคโรนอล มาร่วมในการสร้างภาพด้วย จึงจะทำให้ได้พื้นผิวที่สมบูรณ์



(ก)



(ข)

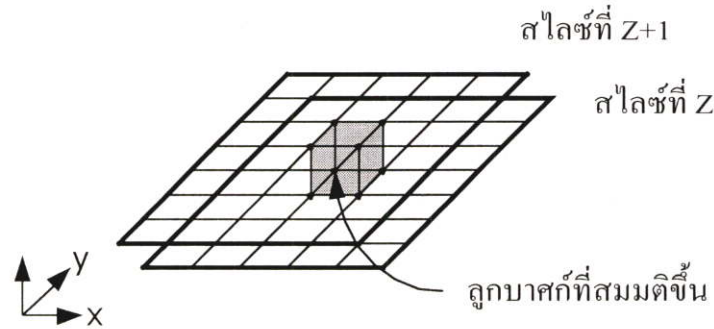
รูปที่ 2.5 ก) ระนาบหลักทั้ง 3 ระนาบที่ใช้ในการสร้างภาพเชิงพื้นผิว

ข) คอนทัวร์ของทั้ง 3 ระนาบที่ใช้ในการสร้างภาพเชิงพื้นผิว

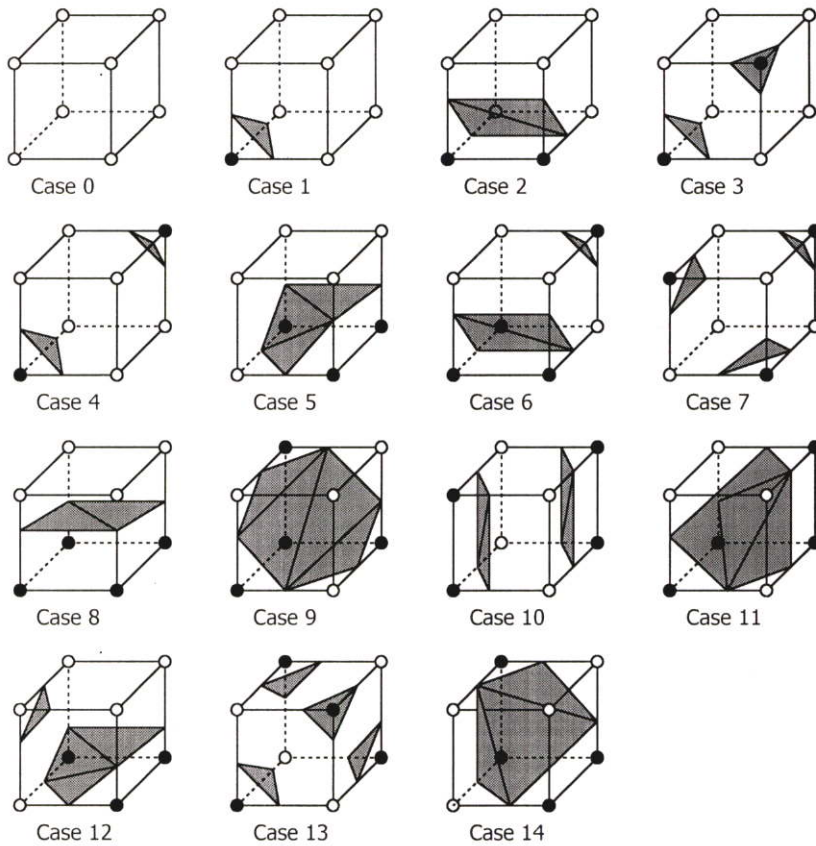
2.2.5 การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีมาร์ชชิงคิวบ์ (Marching Cubes Algorithm) [6]

การสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีการนี้ได้มีการเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Lorensen, W. E. และ Cline, H. E. เมื่อปี ค.ศ. 1987 หลักการของวิธีนี้เป็นการนำลูกบาศก์ขนาดเล็กที่ถูกสมมติขึ้นมา จากจุดข้อมูลของสไลซ์ที่ติดกัน 8 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยจะถือว่าแต่ละจุดเป็นมุมของลูกบาศก์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการจัดวางของสามเหลี่ยมเล็กๆในลูกบาศก์แบบต่างๆเท่าที่

เป็นไปได้เพื่อสร้างเป็นพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งรูปแบบการจัดวางของสามเหลี่ยมภายในลูกบาศก์จะมีทั้งหมด $2^8 = 256$ รูปแบบ และสามารถลดรูปด้วยคุณสมบัติการสะท้อนและการหมุน เหลือเป็นรูปแบบหลักได้เพียง 15 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.7



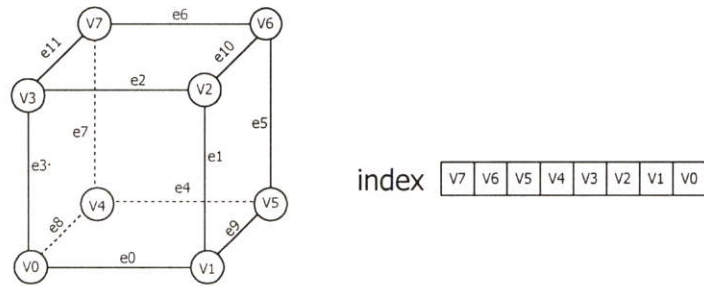
รูปที่ 2.6 ลูกบาศก์ที่สมมติขึ้นจากจุดข้อมูลของสไลซ์ที่อยู่ติดกัน 8 จุด



รูปที่ 2.7 รูปแบบการจัดเรียงของสามเหลี่ยมภายในลูกบาศก์ที่เป็นไปได้

ขั้นตอนการสร้างภาพด้วยวิธีนี้จะเริ่มจากการแยกกลุ่มวัตถุที่สนใจให้เป็นข้อมูลลักษณะแบบไบนารี โดยให้บริเวณวัตถุเป็น 1 และบริเวณจากหลังหรือส่วนที่ไม่ต้องการเป็น 0 จากนั้นหารูปแบบของสามเหลี่ยมที่เหมาะสมเพื่อสร้างพื้นผิวของวัตถุ โดยเปรียบเทียบจากรูปแบบการจัดวาง

ของสามเหลี่ยมภายในลูกบาศก์หลักทั้ง 15 รูปแบบซึ่งจะถูกสร้างเป็นตารางเก็บลำดับมุมของสามเหลี่ยม แล้วทำการสแกนต่อไปจนครบทั้งปริมาตร จะได้รูปสามเหลี่ยมเล็กๆต่อกันเป็นพื้นผิว



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเรียงลำดับมุมและขอบของลูกบาศก์ที่สมมติขึ้น

2.3 การสร้างภาพเชิงปริมาตร

การสร้างภาพเชิงปริมาตรเป็นเทคนิคหนึ่งในการสร้างภาพสามมิติ ซึ่งสามารถแสดงส่วนของอวัยวะที่มีขอบเขตไม่ชัดเจนได้ ตัวอย่างในทางการแพทย์ก็คือ เนื้อเยื่อต่าง ๆ นั้นเอง โดยจะแสดงภาพในลักษณะกึ่งโปร่งใส ทำให้สามารถมองเห็นอวัยวะหลายๆส่วนพร้อมกันได้

จากผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างภาพเชิงปริมาตรที่ผ่านมา Drebin [7] และ Ney [8] ได้นำเสนอวิธีการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการอาศัยความเข้มแสงของภาพมาเป็นตัวกำหนดค่าความทึบแสงแล้วสร้างภาพ ซึ่งในแต่ละมุมมองจะมีการแปลง (Transform) ให้จุดสไลซ์มาอยู่ในมุมมองที่ต้องการก่อน แล้วจึงทำการ โปรเจก (Projection) ลงบนฉากการมอง ซึ่งจำเป็นต้องมีการแก้ไขปัญหาของอะแลสซิ่ง (Aliasing) [9] อีกทั้งการที่ต้องแสดงภาพในทุกๆครั้งที่หมุนภาพ จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการสร้างค่อนข้างนาน งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งก็คือ Levoy [10] ได้ใช้วิธีการฉายแสงเข้าไปในปริมาตร และมีการติดตามแสงไปตลอดลำเส้นจนกว่าจะถึงตาของผู้สังเกต แล้วใช้การประกอบภาพแบบหลังไปหน้าซึ่งใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก และเป็นสิ่งที่ต่างกับการประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง [11] อย่างสิ้นเชิง ในการประกอบภาพแบบหน้าไปหลังจะเป็นการสะสมค่าความทึบแสงเพื่อหยุดการรวมองค์ประกอบภาพเมื่อค่าความทึบแสงมีค่ามากจนกระทั่งมีความทึบแสงโดยสมบูรณ์ โดยว็อกเซลที่อยู่ตามแนวลำแสงจะคัดลอกความทึบแสงนี้เอาไว้จนไม่สามารถมองเห็นได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ได้นำวิธีการนี้มาใช้ โดยมีอัลกอริทึมเช่นเดียวกับ [1] โดยจะเริ่มจากการนำชุดข้อมูลภาพมาแบ่งกลุ่ม ซึ่งได้ใช้ข้อมูลภาพ CT จึงแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ อากาศ, ไขมัน, กระดูก และเนื้อเยื่อ ตามค่าระดับเทา จากนั้นนำไปคำนวณตารางค่าความทึบแสงและกำหนดค่าสีให้แต่ละกลุ่ม ในขณะที่เดียวกันก็มีการแปลงระยะทางได้เป็นปริมาตรของระยะทาง พร้อมกันนั้นก็ฉายแสงเข้าไปในปริมาตรโดยอาศัยการอ่านข้อมูลระยะทางจากปริมาตรระยะทางมาเป็นตัวช่วยให้ลำแสงกระโดดข้ามขึ้นไปแทนการกระโดดทีละขั้น ซึ่งในการฉายแสงนี้เองจากวิธีเดิม [1] จะให้

แสงพุ่งเข้าไปในปริมาตรเพียงทิศทางเดียว แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิคให้แสงพุ่งเข้าไปในปริมาตรทั้งสองทิศทางเพื่อให้แสงเข้าถึงวัตถุได้เร็วขึ้น หลังจากนั้นจะมีการคำนวณค่าแสงเงา ตามด้วยขั้นตอนสุดท้ายคือการรวมองค์ประกอบภาพ ซึ่งจะอาศัยพารามิเตอร์สามตัวได้แก่ ค่าความทึบแสง, ความเข้มแสงที่ผ่านการให้แสงเงามาแล้ว และค่าเกรเดียนต์ แล้วแสดงภาพผลลัพธ์

นั่นคือวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การแปลงแบบผกผัน (Inverse Transform) เพื่อไม่ต้องใช้หน่วยความจำชั่วคราวในการแปลงชุดสไลซ์, ใช้การประกอบภาพแบบหน้าไปหลังเพื่อให้หยุดการรวมองค์ประกอบภาพได้เร็วขึ้น และใช้การกระโดดข้ามขั้นของลำแสงทั้งสองด้านเพื่อไม่ให้ลำแสงเสียเวลาในการเดินทางที่ละขั้น



รูปที่ 2.9 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

2.4 สรุป

จากที่กล่าวมาในบทนี้ก็ทำให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างการสร้างภาพเชิงพื้นผิวและการสร้างภาพเชิงปริมาตร นั่นคือการสร้างภาพเชิงพื้นผิวสามารถทำได้เร็วกว่าเพราะเป็นการพิจารณาเพียงตำแหน่งใหม่ที่ต้องการแสดงเท่านั้น จึงใช้เวลาสร้างในมุมมองต่างๆน้อย ส่วนการสร้างภาพเชิงปริมาตรจะต้องใช้องค์ประกอบหลายอย่างในการแสดงภาพ เช่น ขนาดเกรเดียนต์, ค่าความทึบแสง, การให้แสงเงา และการประกอบภาพ จึงใช้เวลาในการคำนวณนาน แต่ถึงอย่างไรก็ตามภาพเชิงปริมาตรก็ยังให้รายละเอียดของภาพได้ดีกว่าภาพเชิงพื้นผิว

บทที่ 3

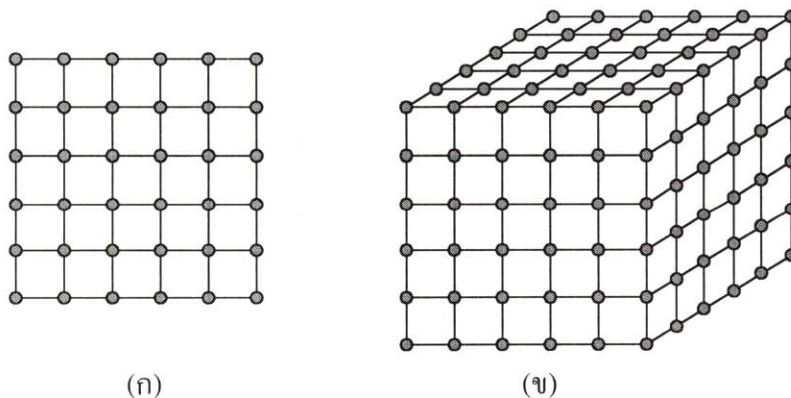
ทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นในการสร้างภาพสามมิติ

3.1 บทนำ

การสร้างภาพสามมิติทั้งการสร้างภาพเชิงพื้นผิว (Surface Rendering) และการสร้างภาพเชิงปริมาตร (Volume Rendering) ล้วนต้องใช้ความรู้ขั้นพื้นฐานทางคอมพิวเตอร์กราฟิกมาประยุกต์ใช้ทั้งสิ้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาทฤษฎีทางคอมพิวเตอร์กราฟิกขั้นพื้นฐาน เช่น การอ้างอิงระบบพิกัด, การหมุน หรือการแปลงเรขาคณิตให้แม่นยำ เพื่อที่จะสามารถนำไปช่วยในการทำงานได้อย่างถูกต้อง เนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการสร้างภาพเพื่อมุ่งเน้นสำหรับเป็นความรู้เบื้องต้นก่อน ส่วนรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนของการสร้างภาพจะกล่าวถึงในบทต่อไป

3.2 องค์ประกอบพื้นฐาน [12]

โดยทั่วไปภาพดิจิทัลจะประกอบไปด้วยอาเรย์สองมิติที่เป็นข้อมูลแสดงสีหรือความเข้มของแสง ซึ่งองค์ประกอบของข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกว่า "พิกเซล" (Pixel) หรือก็คือองค์ประกอบของภาพ ในทำนองเดียวกันกรณีการสร้างภาพสามมิติก็จะใช้อาเรย์สามมิติเป็นองค์ประกอบของภาพ ซึ่งองค์ประกอบของข้อมูลนี้เรียกว่า "ว็อกเซล" (voxel) นิยามของว็อกเซลคือจุดในปริภูมิสามมิติซึ่งไม่มีขนาด เปรียบได้กับรูปเรขาคณิตที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานในการสร้างภาพทางคอมพิวเตอร์กราฟิก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้คำว่าว็อกเซลแสดงตำแหน่งของจุดข้อมูลในปริมาตรต้นฉบับ เมื่อจุดข้อมูลถูกทำการสุ่มตัวอย่างซ้ำหรือรีแซมปลิง (Resampling) ว็อกเซลเหล่านี้จะถูกอ้างอิงใหม่ในชื่อว่าจุดแซมเปิล (Sample point)



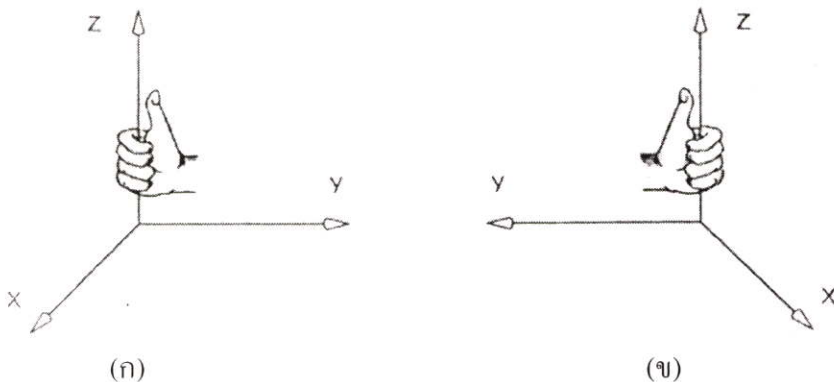
รูปที่ 3.1 ลักษณะความแตกต่างระหว่างพิกเซลกับว็อกเซล

(ก) พิกเซล (ข) ว็อกเซล

3.3 ระบบพิกัด (Coordinate System)

เนื่องจากการระบุตำแหน่งของสิ่งใด ๆ ล้วนต้องมีจุดอ้างอิงเสมอ ในทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกก็เช่นกัน ระบบพิกัดเป็นสิ่งที่ถูกใช้ในการอ้างอิงถึงตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ในปริภูมิ (Space) ในระบบสองมิติ นั้นระบบพิกัดจะประกอบด้วยแกนอ้างอิง 2 แกนคือ แกน X และแกน Y ส่วนในระบบสามมิติ นั้นจะมีแกน Z เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งแกน นั่นคือระบบพิกัดของระบบสามมิติจะมีแกนอ้างอิง 3 แกน คือ แกน X, แกน Y, แกน Z ระบบพิกัดสามมิติมี 2 ระบบตามทิศทางของแกน Z ซึ่งได้แก่ ระบบพิกัดมือขวาและระบบพิกัดมือซ้าย

ระบบพิกัดมือขวามักนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทางคณิตศาสตร์, ภูมิศาสตร์, วิศวกรรมศาสตร์ และการอ้างอิงตำแหน่งของวัตถุทั่วไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ระบบพิกัดแบบนี้เป็นหลัก ส่วนระบบพิกัดมือซ้ายมักนิยมใช้กับงานทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกโดยจะกำหนดให้แกน Z เป็นแกนที่แสดงระยะความลึกที่เข้าไปในจอภาพและมีค่าเป็นบวก และระนาบของจอภาพเป็นระนาบ XY



รูปที่ 3.2 ระบบพิกัดสามมิติ (ก) ระบบพิกัดมือขวา (ข) ระบบพิกัดมือซ้าย

3.4 การแปลงเรขาคณิต

ในงานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟฟิกนั้น บางครั้งจำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้ายภาพไปยังตำแหน่งใหม่, ย่อ-ขยายภาพ หรือมีการหมุนภาพให้อยู่ในมุมมองที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้การแปลงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

ในการพิจารณาการแปลงนั้นจะพิจารณาได้ว่าเป็นการแปลงจุดในปริภูมิสามมิติ และเพื่อความเข้าใจที่ง่ายจึงมักจะเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ โดยกำหนดให้จุดที่ต้องการแปลงเป็นจุด P มีพิกัดเป็น (x, y, z) ใดๆ เมื่อต้องการย้ายตำแหน่งของจุด P นี้ไปยังพิกัดใหม่คือ P' ซึ่งมีพิกัด (x', y', z') ก็ทำได้โดยการนำพิกัดของจุด P ไปบวกกับเมตริกซ์การแปลงซึ่งก็คือ T สามารถแสดงเมตริกซ์ของการแปลง [12], [13] ได้ดังนี้

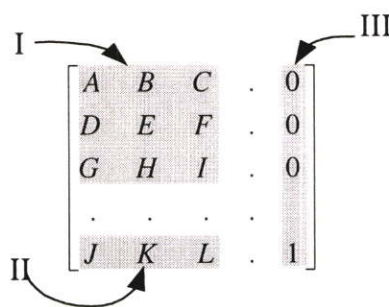
$$P' = P + T = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

นอกจากนี้เมื่อนำพิกัดของจุด P มาคูณกับเมตริกซ์การแปลง T ให้ได้พิกัดใหม่คือ P' นั้น จะเป็นการสเกล, การหมุน, การสะท้อน หรืออื่นๆ ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ภายในเมตริกซ์การแปลงนั้น สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์การแปลงได้ดังนี้

$$P' = PT = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

สำหรับการแปลงเรขาคณิตในทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกนั้นโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยการแปลงหลายๆชนิดประกอบกัน และเนื่องจากการคำนวณในรูปของเมตริกซ์จึงทำให้ยากในการคำนวณเมตริกซ์ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน จึงได้มีการนำระบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate System) เข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้

ในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส จุดในระบบสามมิติ (x, y, z) จะถูกแทนด้วยระบบสี่มิตินั้นคือ (x, y, z, H) โดยจะมี H เป็นค่าแฟกเตอร์ที่มีหน้าที่สเกลซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จุด (x, y, z, H) จะถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalize) เป็น $(x/H, y/H, z/H, 1)$ โดยทั่วไปแล้วค่า H จะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นจุด (x, y, z) ใดๆจะมีค่าในระบบพิกัดโฮโมจีเนียสเป็น $(x, y, z, 1)$ เพื่อความเข้าใจในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส รูปที่ 3.3 จะบอกถึงส่วนประกอบต่างๆของระบบนี้



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบต่างๆของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส

จากรูปที่ 3.3 เมตริกซ์ย่อย I เป็นส่วนที่กำหนดว่าเป็นการแปลงแบบใด เช่น การหมุน, การสเกล หรือการสะท้อน เป็นต้น ส่วนเมตริกซ์ย่อย II เป็นส่วนของการย้ายตำแหน่งแบบเชิงเส้น และในส่วนสุดท้ายเมตริกซ์ย่อย III ใช้ในการรวมระหว่างการเคลื่อนย้ายพิกัดและการแปลงที่อยู่ในการคูณ โดยมีรายละเอียดของการแปลงแบบต่างๆดังนี้

3.4.1 การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง

เมตริกซ์การแปลง (T) ที่ใช้สำหรับการแปลงที่ต้องการเคลื่อนย้ายตำแหน่งมีลักษณะดังสมการที่ 3.3 ดังนี้

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_X & T_Y & T_Z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

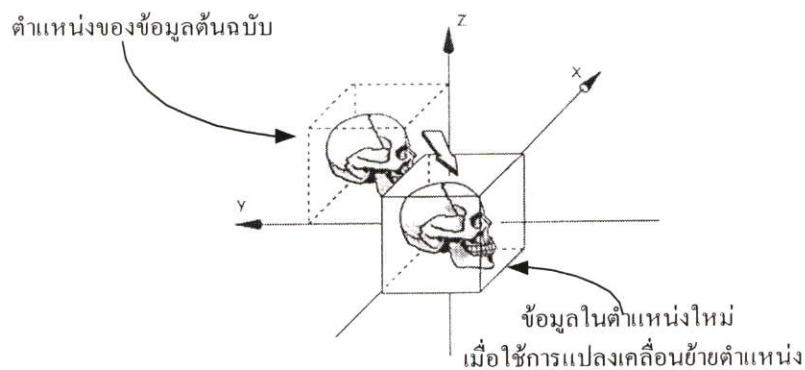
จะได้พิกัดของจุดในระบบโฮโมจีเนียส (x', y', z', h) ดังสมการที่ 3.4 ข้างล่างนี้

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_X & T_Y & T_Z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ได้ผลลัพธ์เป็นดังสมการที่ 3.5

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + T_X & y + T_Y & z + T_Z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดยที่ค่า T_X , T_Y และ T_Z แสดงถึงระยะทางที่ต้องการเคลื่อนย้ายตำแหน่งไปในแนวแกน X, แกน Y และแกน Z ตามลำดับ เนื่องจากข้อมูลภาพต้นฉบับที่นำมาใช้จะมีตำแหน่งอยู่ในด้านบวกเท่านั้น ดังนั้นในการสร้างภาพทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกจะต้องมีการย้ายตำแหน่งพิกัดกึ่งกลางของชุดข้อมูลต้นฉบับให้มาอยู่ที่จุดกำเนิด (0, 0, 0) เสียก่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จึงถือได้ว่าการแปลงแบบเคลื่อนย้ายตำแหน่งนี้เป็นพื้นฐานสำคัญของการสร้างภาพทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิก



รูปที่ 3.4 การย้ายตำแหน่งจุดกึ่งกลางของปริมาตรต้นฉบับมาอยู่ที่จุดกำเนิด

3.4.2 การสเกล (Scaling)

การสเกลเป็นการแปลงเพื่อปรับเปลี่ยนขนาดของวัตถุที่ต้องการ ซึ่งมีเมตริกซ์การแปลง (S) ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} S_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

จะได้พิกัดของจุดในระบบโฮโมจีเนียส (x', y', z', h) ดังสมการที่ 3.7 ข้างล่างนี้

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ได้ผลลัพธ์เป็นดังสมการที่ 3.8

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xS_X & yS_Y & zS_Z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

โดยที่ S_X , S_Y และ S_Z เป็นสัมประสิทธิ์การสเกลสำหรับพิกัด X, Y และ Z ตามลำดับ ค่าของสัมประสิทธิ์ทั้งสามจะเป็นตัวบอกว่าเป็นการย่อหรือขยายรูป กล่าวคือถ้า S มีค่ามากกว่า 1 จะเป็นการขยายภาพ และถ้า S มีค่าน้อยกว่า 1 จะเป็นการย่อขนาดภาพ

3.4.3 การหมุนวัตถุ (Rotation)

การหมุนวัตถุจะเป็นการหมุนวัตถุรอบแกนต่างๆทั้งสามแกน ซึ่งได้แก่ แกน X, แกน Y และแกน Z โดยจะอ้างอิงการมองในลักษณะมองออกจากจุดกำเนิดไปตามแนวแกน เมตริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกนต่างๆในทิศทางตามเข็มนาฬิกา มีดังนี้

3.4.3.1 เมตริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกน X ไปเป็นมุม θ คือ

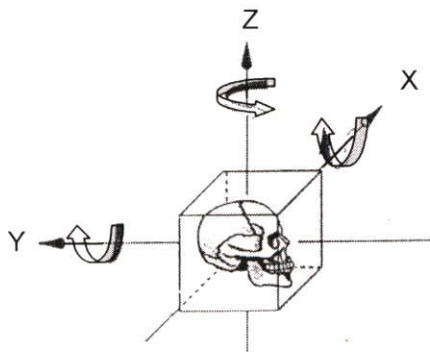
$$R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.4.3.2 เมตริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกน Y ไปเป็นมุม ϕ คือ

$$R_Y = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.4.3.3 เมตริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกน Z ไปเป็นมุม φ คือ

$$R_Z = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.5 การแปลงแบบหมุนรอบแกนทั้งสาม

3.4.4 การแปลงแบบผสม (Multiple Transformations)

โดยทั่วไปในการใช้งานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟฟิก การหมุนภาพสามมิติมักจะใช้หลายๆเมตริกซ์ร่วมกัน ซึ่งเป็นการแปลงหลายๆชนิดร่วมกันนั่นเอง สำหรับการหมุนในสองแกนก็สามารถหาเมตริกซ์การแปลงของการหมุนรอบสองแกนได้โดยการนำเมตริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกนเดียวมาคูณกัน แต่ต้องพึงระวังว่าการคูณเมตริกซ์นั้น ไม่มีคุณสมบัติการสลับที่ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เมื่อกำหนดให้เมตริกซ์ (M) เป็นเมตริกซ์การแปลงแบบผสม

$$\begin{aligned}
 M = R_X \times R_Y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ \sin \theta \sin \phi & \cos \theta & \sin \theta \cos \phi & 0 \\ \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta & \cos \theta \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M' = R_Y \times R_X &= \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & -\cos \theta \sin \phi & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \phi & -\sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.14}
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าเมตริกซ์ M เป็นการหมุนรอบแกน X ก่อน แล้วจึงหมุนรอบแกน Y ส่วนเมตริกซ์ M' จะเป็นการหมุนรอบแกน Y ก่อน แล้วค่อยหมุนรอบแกน X ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะไม่เท่ากัน

ส่วนในกรณีที่มีการหมุนหลายแกนและมีการเคลื่อนย้ายพิคัดด้วย ก็สามารถหาเมตริกซ์การแปลงได้ดังตัวอย่างนี้ โดยมีลำดับการแปลงก็จะเคลื่อนย้ายจุดก่อนแล้วจึงหมุนในแนวแกน X และ Y ตามลำดับ ก็จะได้เป็น

$$M = [T][R_X][R_Y]$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_X & T_Y & T_Z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

สำหรับกรณีที่มีการสเกลหรือหมุนรอบแนวแกนอื่น ก็สามารถหาเมตริกซ์การแปลงได้ในทำนองเดียวกันนี้

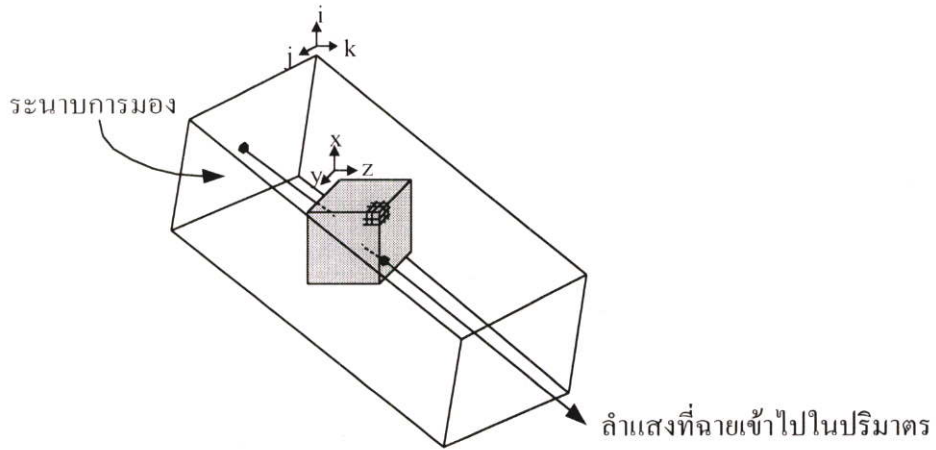
3.5 การโปรเจกชัน (Projections)

โดยทั่วไปการโปรเจกชันจะเป็นการแปลงจาก n มิติไปเป็น n-1 มิติ การโปรเจกชันนี้ แบ่งเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Projections) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear Projections) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการโปรเจกชันแบบเชิงเส้นเท่านั้นซึ่งได้แก่ การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections) และการโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟ (Perspective Projections)

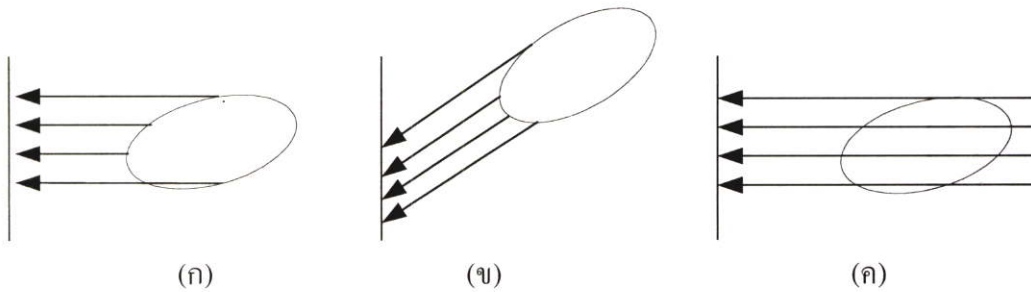
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อสมมติให้มีวัตถุสามมิติที่จะถูกโปรเจก (projected) ลงบนระนาบการโปรเจก (projection plane) โดยมีผู้สังเกตลักษณะการโปรเจกชันของวัตถุ และเพื่อให้สามารถมองลักษณะการโปรเจกชันได้จึงต้องกำหนดให้วัตถุและผู้สังเกตอยู่คนละข้างกันของระนาบการโปรเจก และถ้าให้ระนาบการโปรเจก อยู่ในระดับตั้งฉากกับระดับสายตาของผู้สังเกต ก็จะทำให้สามารถมองเห็นภาพวัตถุในมุมมองที่แสดงบนฉากได้

3.5.1 การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

หลักการของการโปรเจกชันแบบขนานทุกวิธีอธิบายอย่างคร่าวๆ ได้ว่าจะเริ่มต้นจากเลือกทิศทางของแสง แล้วสร้างแนวลำแสงจากพิคัดของว็อกเซลในปริมาตรต้นฉบับซึ่งเป็นสามมิติ ฉายไปตามทิศทางที่กำหนดไว้ นั้น ไปปรากฏเป็นจุดใหม่บนระนาบการโปรเจกซึ่งเป็นสองมิติ กระบวนการที่กล่าวนี้จะกระทำกับทุกๆ ว็อกเซลในปริมาตรต้นฉบับ นั่นคือจะกลายเป็นแนวลำแสงที่ขนานกัน ซึ่งเป็นที่มาของการถูกเรียกว่า “การโปรเจกชันแบบขนาน” นั่นเอง [14] ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การฉายแสงแบบขนานเข้าไปในปริมาตร



รูปที่ 3.7 การโปรเจกชันแบบขนาน

ในรูปที่ 3.7ก เป็นลักษณะการตั้งฉากกันระหว่างลำแสงที่ฉายกับระนาบการโปรเจก และรูปที่ 3.7ข เป็นลำแสงที่มุมมองอื่นๆ เรียกว่า การโปรเจกชันแบบเอียง (Oblique Projections) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการโปรเจกชันแบบขนาน ส่วนรูปที่ 3.7ค แสดงถึงความแตกต่างของหลักการของการโปรเจกชันแบบขนาน เราสามารถจินตนาการให้จุดกำเนิดของทุกๆ ลำแสงอยู่ที่จุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน (Center of Projection) และสิ่งนี้เองที่เป็นตัวแยกว่าเป็นการโปรเจกชันแบบขนานหรือการโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟ ซึ่งจะนำไปตามกฎของการโปรเจกชันดังนี้

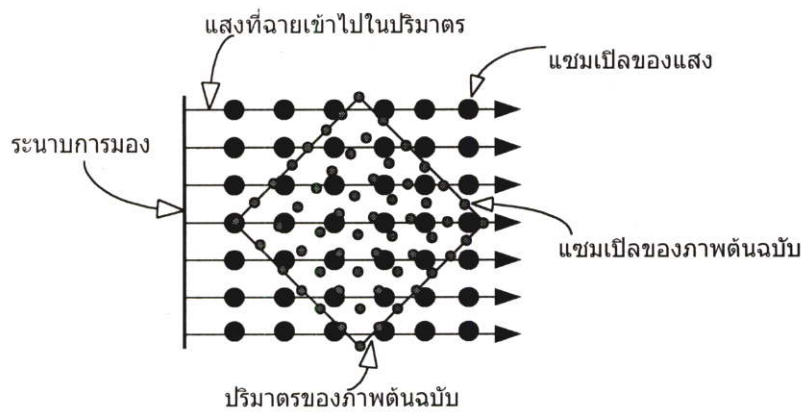
กฎของการโปรเจกชัน [14] คือ กำหนดระนาบการโปรเจกและให้วัตถุอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของระนาบนั้น จากนั้นเลือกจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันที่บริเวณอีกด้านหนึ่งของระนาบการโปรเจก แล้วสร้างลำแสงให้ฉายออกจากจุดศูนย์กลางนี้ผ่านระนาบการโปรเจก ไปยังพิคคของว็อกเซลบนวัตถุให้ครบทุกๆ ว็อกเซลทั้งวัตถุ ถ้าจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันอยู่ที่จุดสังเกตจุดหนึ่งจะเป็นการโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟ

จากหลักการของการโปรเจกชันแบบขนานดังกล่าว เมื่อมีการแปลงและฉายแสงในลักษณะดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้จากการกระทำทางกระบวนการคณิตศาสตร์ของการแปลงและการฉายมักมีค่าเป็นทศนิยม ซึ่งจำเป็นต้องปัดค่าเหล่านี้ให้เป็นจำนวนเต็มก่อน เพราะการอ้างอิง

ตำแหน่งของว็อกเซลเป็นเลขจำนวนเต็มหน่วย ทำให้การส่งจุดของว็อกเซลบางตำแหน่งมีการซ้อนทับกัน เกิดเป็นจุดดำขึ้นบนภาพบนฉากการมองเห็นเนื่องจากข้อมูลบางตำแหน่งขาดหายไป เพื่อแก้ไขปัญหานี้งานวิจัยนี้จึงได้ใช้การพิจารณาจากระนาบการมองย้อนกลับไปที่ปริมาตรภาพ โดยใช้เมตริกซ์การแปลงผกผัน ซึ่งจะเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดจุดว่างได้เนื่องจากจุดทุกจุดบนระนาบการมองสองมิติจะถูกพิจารณาทั้งหมด ซึ่งเมตริกซ์ผกผันที่ใช้คือเมตริกซ์การแปลงแบบหมุนรอบแกน Y และแกน X ดังสมการที่ 3.15

$$(R_{YX})^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi \sin \theta & \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & 0 \\ -\sin \phi \cos \theta & -\sin \theta & \cos \phi \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ลักษณะของแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตรและถูกสุ่ม (sampling) ออกเป็นระยะทางเท่าๆกัน เรียกว่า จุดแซมเปิลของแสง เมื่อมองเทียบกับจุดแซมเปิลของปริมาตรต้นฉบับ จะเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะของลำแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตร

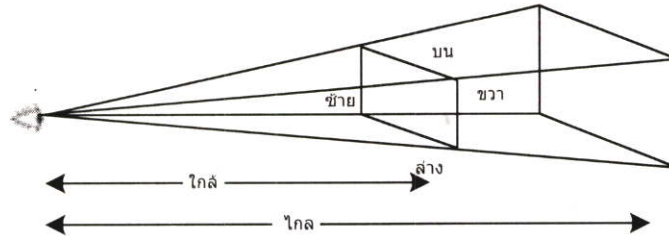
3.5.2 การโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟ (Perspective Projections)

การโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟมีความสำคัญยิ่งเพราะเป็นการมองเห็นวัตถุในลักษณะเดียวกับโลกของความจริง การโปรเจกชันวิธีนี้สามารถอธิบายได้ตามกฎของการโปรเจกชันที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้ว คือมีจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันอยู่ที่จุดๆหนึ่งดังรูปที่ 3.9 แนวลำแสงที่ฉายจะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมเหมือนปิรามิด การโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟนี้มีคุณสมบัติตามที่เราได้สัมผัสในชีวิตประจำวันอยู่ 3 ประการ [14] คือ

ก.) ผู้สังเกตจะเห็นวัตถุที่อยู่ระยะไกลมีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริง (ซึ่งเป็นสิ่งตรงข้ามกับการโปรเจกชันแบบขนานอย่างสิ้นเชิง)

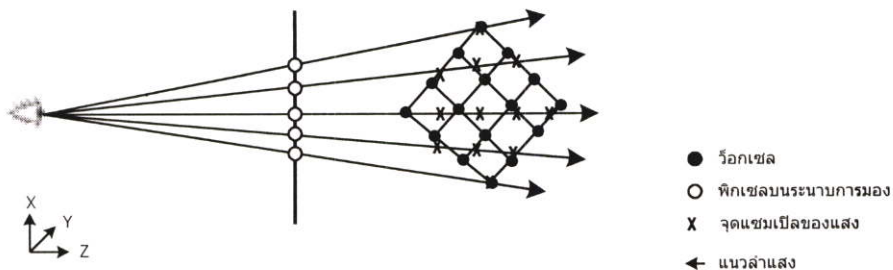
ข.) ทุกๆ เส้นขนานจากวัตถุที่ขนานกับสายตาของผู้สังเกตจะลู่เข้าหาจุดที่บรรจบกันของเส้นขนาน (Vanishing Point)

ค.) การมองเห็นด้วยวิธีเปอร์สเปกทีฟจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับวัตถุนั้นคือ ผู้สังเกตที่อยู่ใกล้วัตถุก็จะเห็นวัตถุขนาดใหญ่กว่าผู้สังเกตที่อยู่ไกลจากวัตถุ



รูปที่ 3.9 การฉายแสงแบบเปอร์สเปกทีฟ

ลักษณะของลำแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตรและถูกส่งออกเป็นระยะทางเท่าๆกัน เมื่อมองเทียบกับจุดแซมเปิลของวัตถุ เป็นดังรูปที่ 3.10 นี้

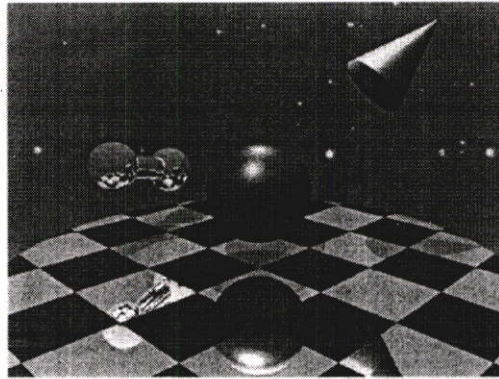


รูปที่ 3.10 ลักษณะของลำแสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตร

3.6 การส่องสว่างและการให้แสงเงา (Illumination and Shading) [12],[15],[16]

การส่องสว่างและการให้แสงเงาเป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีในทางคอมพิวเตอร์กราฟิก ซึ่งนิยมใช้สำหรับการเน้นให้กราฟิกสามมิติดูสมจริงขึ้น การให้แสงเงาจะพยายามจำลองผลกระทบของเงา, การกระเจิงของแสง และการดูดกลืน ซึ่งจะปรากฏขึ้นในโลกจริงเมื่อแสงตกกระทบวัตถุ เป้าหมายทางคอมพิวเตอร์กราฟิกก็เพื่อที่จะสร้างภาพสามมิติให้ได้ภาพที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับภาพถ่ายที่ได้จากโลกจริงดังรูปที่ 3.11 เป็นตัวอย่างของภาพที่ได้จากโลกจริงถูกสร้างเป็นภาพสามมิติบนฉาก

แบบจำลองการส่องสว่างจะอธิบายถึงการกำหนดสีไปยังจุดบนปริภูมิ โดยมีพื้นฐานอยู่บนการที่แสงฉายลงไปยังจุด, มุมระหว่างผู้สังเกตกับแสง, คุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ และทิศทางการหันเหกับตำแหน่งบนปริภูมิ แบบจำลองการให้แสงเงาจะเป็นเค้าโครงให้แบบจำลองการส่องสว่าง โดยที่แบบจำลองการให้แสงเงาเป็นการพิจารณาว่าเมื่อใช้แบบจำลองการส่องสว่างกับจุดนั้นแล้ว พาราเมเตอร์ใดที่จะได้ออกมาจากแบบจำลองการส่องสว่าง ซึ่งความแตกต่างของแบบจำลองทั้งสองล้วนเป็นสิ่งสำคัญและจะกล่าวถึงในภายหลัง



รูปที่ 3.11 คอมพิวเตอร์กราฟฟิก

สำหรับการสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้น ในการสร้างภาพให้มีลักษณะเหมือนภาพถ่ายไม่ใช่เป้าหมายประการแรก แต่เป้าหมายประการแรกของการให้แสงเงาจะเป็นการเน้นให้การแสดงชุดข้อมูลที่พิจารณาอยู่ทำได้ดีขึ้น ชุดข้อมูลเชิงปริมาตรสามารถแสดงวัตถุและสิ่งที่อยู่ภายในวัตถุนั้น ตัวอย่างเช่น ส่วนต่างๆของอวัยวะมนุษย์, ชิ้นส่วนภายในเครื่องจักร หรือชั้นต่างๆของเปลือกโลก ซึ่งเมื่อเรามองสิ่งต่างๆเหล่านี้ในโลกจริงจะไม่สามารถมองเห็นส่วนภายในได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะทำแสงเงาของสิ่งที่อยู่ภายในเหล่านี้ให้เหมือนโลกจริง เนื่องจากไม่สามารถอ้างอิงได้ว่าในโลกความเป็นจริงแล้วส่วนภายในนั้นควรเป็นอย่างไร ลำดับต่อไปจะอธิบายถึงองค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในการคำนวณค่าแสงเงา [12]

3.6.1 เกรเดียนต์ (Gradient)

เกรเดียนต์เป็นการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงของว็อกเซลในชุดข้อมูลและเป็นตัวบอกทิศทางการเปลี่ยนแปลงด้วย ข้อมูลนี้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการสร้างภาพเชิงปริมาตรอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นตัวบอกสิ่งเกี่ยวกับโครงสร้างของชุดข้อมูล ตัวอย่างเช่น โลหะสองชนิดที่แตกต่างกันภายในโลหะชิ้นหนึ่งๆนั้น จะมีค่าความเข้มแสงของว็อกเซลที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่าเกรเดียนต์จะมีค่าสูงในบริเวณที่แบ่งขอบเขตของโลหะทั้งสองชนิดนั้น สำหรับกระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรจึงต้องมีการคำนวณเกรเดียนต์ทุกๆว็อกเซลในชุดข้อมูล

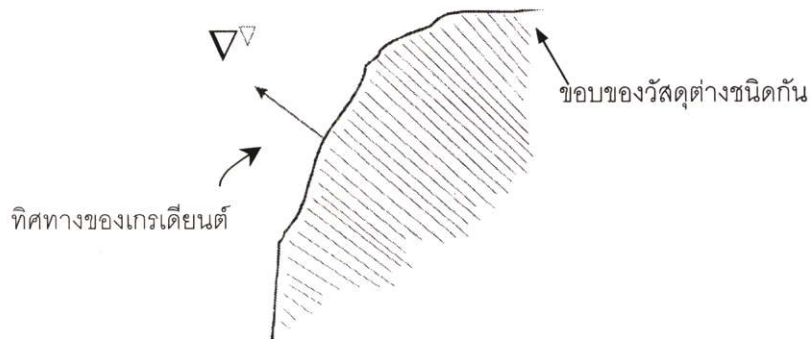
พิจารณารูปที่ 3.12 จะเห็นว่าเกรเดียนต์เป็นเวกเตอร์สามมิติตั้งสมการที่ 3.16 ซึ่งสามารถบอกทิศทางซึ่งไปยังจุดที่มีตำแหน่งแน่นอนในปริภูมิสามมิติ ดังนั้นจึงสามารถบอกสิ่งเกี่ยวกับทิศทาง การหันเหของโครงสร้างในชุดข้อมูลได้

$$\nabla = [X \ Y \ Z] \quad (3.16)$$

เมื่อ ∇ เป็นสัญลักษณ์แทนเกรเดียนต์

สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งก็คือขนาดของเกรเดียนต์ ซึ่งสามารถมองได้ในรูปของความยาวเวกเตอร์ คำนวณได้ตามสมการที่ 3.17 ต่อไปนี้

$$|\nabla| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.12 ขอบเขตของวัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกัน และทิศทางของเกรเดียนต์

ขนาดของเกรเดียนต์มีสัญลักษณ์คือ $|\nabla|$ จะเป็นตัวบอกความเร็วในการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงภายในชุดข้อมูล ถ้าขนาดของเกรเดียนต์เท่ากับศูนย์ นั่นหมายถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของว็อกเซลรอบข้างจุดสนใจ และถ้าพิจารณาในแง่คณิตศาสตร์จะพบว่าเกรเดียนต์ก็คือการหาอนุพันธ์ ซึ่งเป็นสิ่งที่ใช้วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน หรือก็คือฟังก์ชันค่าความเข้มแสงของว็อกเซลในชุดข้อมูลนั่นเอง จากสมการที่ 3.16 และ 3.17 ก็จะเขียนได้เป็นสมการที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับดังนี้ โดยที่ f เป็นฟังก์ชันความเข้มแสง

$$\nabla f(x, y, z) = \left[\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z} \right] \quad (3.18)$$

$$|\nabla f(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z} \right)^2} \quad (3.19)$$

3.6.1.1 ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ (The Central Difference Gradient Estimator)

วิธีการคำนวณค่าเกรเดียนต์สามารถทำได้หลากหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปก็คือ ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่ตัวดำเนินการที่ดีที่สุดในแง่ของคุณภาพ แต่วิธีนี้ก็ทำให้หาค่าได้เร็วและง่ายในการคำนวณ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีนี้ในการคำนวณค่าเกรเดียนต์

ตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์มีนิยามดังต่อไปนี้

$$D_x = f(x-1, y, z) - f(x+1, y, z) \quad (3.20)$$

$$D_y = f(x, y-1, z) - f(x, y+1, z) \quad (3.21)$$

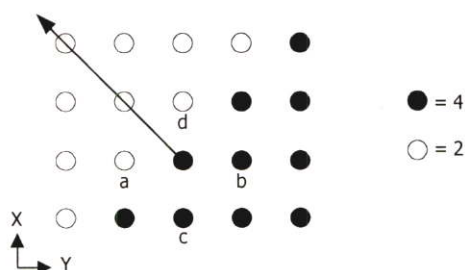
$$D_z = f(x, y, z-1) - f(x, y, z+1) \quad (3.22)$$

เมื่อ $f(x, y, z)$ เป็นค่าของว็อกเซลที่ตำแหน่ง x, y, z ในชุดข้อมูล

D_x, D_y, D_z เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์เกรเดียนต์สามมิติดังสมการที่ 3.23

$$D = [D_x \quad D_y \quad D_z] \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.20 ถึง 3.22 และรูปที่ 3.13 ข้างล่างนี้ จะเห็นว่าตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ ประกอบไปด้วยการลบเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงง่ายต่อทั้งการเขียนซอฟต์แวร์และการสร้างฮาร์ดแวร์ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ใช่ตัวประมาณค่าที่แม่นยำนัก บางครั้งตัวดำเนินการนี้ถูกเรียกว่า ตัวดำเนินการแบบหกจุด (Six-point Operator) เพราะใช้การพิจารณาจุดว็อกเซล 6 จุดในการคำนวณ



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ ในสองมิติ

ผลของการประมาณที่ได้คือเวกเตอร์ $(a-b, c-d) = (-2, 2)$

อีกทางหนึ่งเลือกในการเขียนตัวประมาณค่าเกรเดียนต์แบบเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์คือการเขียนแบบเคอร์เนลคอนโวลูชัน (Convolution Kernel) เนื่องจากตัวดำเนินการนี้มีลักษณะที่เหมือนกันในแนวแกน X, Y และ Z จึงสามารถเขียนในลักษณะเคอร์เนลหนึ่งมิติได้เป็นสมการที่ 3.24

$$D_{x,y,z} = [-1 \quad 0 \quad 1] \quad (3.24)$$

3.6.1.2 การใช้เกรเดียนต์ในการสร้างภาพเชิงปริมาตร

ในกระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้นเกรเดียนต์จะถูกนำไปใช้สองขั้นตอนคือใช้ในการให้การให้แสงเงาและขั้นการแบ่งกลุ่มข้อมูล ซึ่งจะกล่าวถึงกรณีที่น่าไปใช้ในการให้แสงเงาเท่านั้น

ในคอมพิวเตอร์กราฟฟิกแต่ดั้งเดิมนั้น เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวเป็นสิ่งจำเป็นต่อการให้แสงเงาแก่พิกเซลของโพลิกอนที่ถูกสร้างภาพขึ้น และจะถูกใช้ในแบบจำลองการให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong [15], [16] ร่วมกับข้อมูลอื่นเช่น ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง, สี และคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดให้แก่โพลิกอน โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะสร้างให้ภาพที่ปรากฏบนฉากมีความเหมือนจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรนั้น การคำนวณหาเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวเป็นสิ่งที่ทำได้ยากเพราะพื้นผิวในชุดข้อมูลมีตำแหน่งไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงนำเกรเดียนต์มาใช้แทนเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวในแบบจำลองการส่องสว่าง

3.6.2 แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong [12]

เป้าหมายของแบบจำลองการส่องสว่างก็เพื่อจำลองการสะท้อนของแสงบนพื้นผิวและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสีบนพื้นผิวที่ผู้สังเกตมองเห็น ตัวอย่างเช่น ภาพลูกโบว์ลิ่งสีดำ เมื่อมีแสงสีขาวฉายไปบนผิวของลูกโบว์ลิ่ง ก็จะมองเห็นการสะท้อนของแสงบนพื้นผิวลูกโบว์ลิ่งกล่าวคือพื้นผิวที่แสงส่องลงไปในนั้นจะมองเห็นเป็นสีที่ไม่ใช่สีดำและจะถูกเปลี่ยนไปจนเกือบเป็นสีขาว ซึ่งนี่เป็นผลกระทบที่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการส่องสว่าง สำหรับจุดมุ่งหมายอื่นของการออกแบบแบบจำลองการส่องสว่างก็คือ การทำให้แบบจำลองนั้นมีรูปแบบที่ง่าย ซึ่งทำให้สามารถคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในอดีตเมื่อแบบจำลองการส่องสว่างถูกพัฒนาขึ้น ความถูกต้องทางกายภาพจะถูกสนใจน้อยลงเพราะความถูกต้องทางกายภาพและปรากฏการณ์ที่อยู่เบื้องหลังการส่องสว่างเช่น การให้แสงเงา, เงา และอื่นๆนั้นไม่มีความสำคัญ แต่สิ่งที่สำคัญกว่าคือการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพนั่นเอง

แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong อธิบายได้ด้วยผลกระทบจากแสงแวดล้อม (Ambient Light) รวมถึงการสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse Reflection) และการสะท้อนแบบกระจก (Specular Reflection) ของแสงที่ส่องลงบนพื้นผิว แต่ละจุดบนพื้นผิวถูกให้ค่าด้วยแบบจำลองการส่องสว่าง ดังนั้นแบบจำลองการส่องสว่างจะมีพื้นฐานจากการพิจารณาจุดบนพื้นผิวที่แสงตกกระทบลงไป

3.6.2.1 แสงแวดล้อม (Ambient Light)

แหล่งกำเนิดแสงแวดล้อมคือแสงที่มีความเข้มแสงเท่ากันทุกจุดบนฉากที่สร้างขึ้น ซึ่งค่าความเข้มของแสงนี้จะไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมของแสงที่สัมผัสกับผิว และแหล่งกำเนิดแสงแวดล้อมนี้ก็ไม่ได้เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยตรง สำหรับสีของพื้นผิวที่ถูกกระทบด้วยแสงแวดล้อมนั้นสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 3.25

$$C_o = C_a k_a O_d \quad (3.25)$$

โดยที่ C_o เป็นค่าผลลัพธ์ของสีที่ได้หลังถูกกระทบด้วยแสงแวดล้อมที่มีค่าสี C_a ส่งไปยังจุดบนวัตถุ ส่วน k_a เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงแวดล้อม ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 และเป็นตัวแยกความแตกต่างของวัสดุที่ปรากฏบนฉากด้วย ตัวอย่างเช่น วัสดุสีดำจะดูดกลืนแสงได้ดีกว่าวัสดุสีขาว ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงแวดล้อมจึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และ O_d คือค่าสีการกระจายของจุดบนวัตถุ จึงต้องมีการคำนวณถึงสามครั้งสำหรับแต่ละองค์ประกอบสี ซึ่งได้แก่ สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน

3.6.2.2 การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse Reflection)

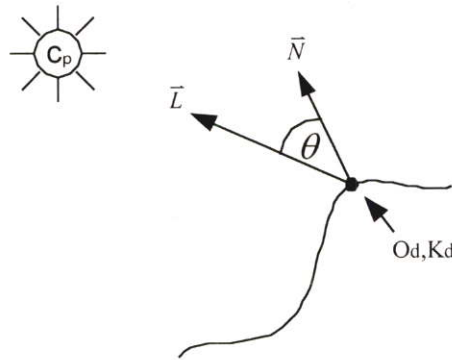
การสะท้อนแบบกระจายเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดที่แผ่รังสีออกมาเท่ากันทุกทิศทาง สีของจุดบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างจุดนั้นกับแหล่งกำเนิดแสง และทิศทางการหันเหของพื้นผิวกับแหล่งกำเนิดแสง โดยทั่วไปจะไม่พิจารณาถึงระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับพื้นผิวซึ่งจะถือว่าแหล่งกำเนิดอยู่ที่อนันต์ ในกรณีนี้จะถือว่าแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบจุด เรียกว่า Directional light ดังนั้นพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องพิจารณาจึงเป็นมุมระหว่างพื้นผิวกับแหล่งกำเนิดแสงเท่านั้น

ทิศทางการหันเหของพื้นผิวสามารถอธิบายได้ด้วยเวกเตอร์ปกติ N ที่จุดที่ต้องการให้แสงเงา เวกเตอร์จากจุดบนพื้นผิวถึงแหล่งกำเนิดแสงแทนด้วย L สำหรับกรณีที่เป็น Directional light นั้น ค่า L จะเป็นค่าคงที่ ส่วนมุมระหว่าง L กับ N จะแทนด้วย θ ดังรูปที่ 3.14 สิ่งสำคัญคือจะต้องทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalize) N และ L ก่อนที่จะนำมาใช้ในแบบจำลองการส่องสว่าง ซึ่งจะได้เป็น \vec{N} และ \vec{L} ตามลำดับ แบบจำลองการส่องสว่างของ Phong ที่มีการสะท้อนแบบกระจายรวมอยู่ด้วยเป็นดังสมการที่ 3.26

$$C_o = C_a k_a O_d + C_p k_d O_d \cos \theta \quad (3.26)$$

จากสมการจะเห็นว่าเป็นการเพิ่มจากสมการของแสงแวดล้อมเข้าอีกหนึ่งพจน์ โดยที่ C_p

คือค่าสีของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด, k_d คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบกระจาย และ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสงกับเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว พิจารณาพจน์ที่สองของสมการที่ 3.26 จะพบว่า ถ้ามุม θ เป็น 90 องศาจะได้ $\cos\theta$ เท่ากับ 0 นั่นคือจะไม่มี การสะท้อนแบบกระจายเกิดขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้ามุม θ เป็น 0 องศา ก็จะเกิดผลของการสะท้อนแบบกระจายมากที่สุด เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าถ้ามุม θ มีค่ามากกว่า 90 องศา ผลของการสะท้อนแบบกระจายก็จะหมดไป ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่พื้นผิวด้านหลังของวัตถุ



รูปที่ 3.14 การสะท้อนแบบกระจาย

เมื่อ \bar{L} และ \bar{N} ถูกนอร์มอลไลซ์ ในทางคณิตศาสตร์จะสามารถหาได้ว่าค่ามุม θ ที่อยู่ในรูปของเวกเตอร์สองเวกเตอร์เป็นอย่างไร นั่นคือผลคูณภายในของ \bar{L} และ \bar{N} จะเท่ากับ $\cos\theta$ จึงสามารถเขียนแบบจำลองการส่องสว่างในสมการที่ 3.26 ได้ใหม่เป็นดังสมการที่ 3.27

$$C_o = C_a k_a O_d + C_p k_d O_d (\bar{N} \cdot \bar{L}) \quad (3.27)$$

สมการที่ 3.27 ที่ได้นี้จะต้องคำนวณสามครั้งสำหรับแต่ละองค์ประกอบสี ซึ่งได้แก่ สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน

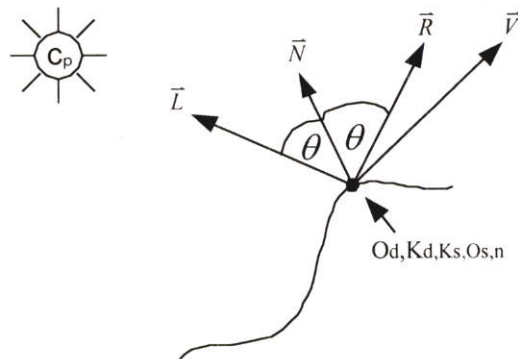
3.6.2.3 การสะท้อนแบบกระจก (Specular Reflection)

การสะท้อนแบบกระจกในแบบจำลองการส่องสว่างเกิดขึ้นจากการเน้นจุดสว่างในการฉายแสง (Shiny Highlight) ตัวอย่างของการสะท้อนแบบกระจกก็เช่น จุดสีขาวที่สว่างกว่าบริเวณอื่นบนลูกโบว์ลิ่งที่ได้เคยยกตัวอย่างไปหัวข้อก่อนหน้านี้ ในความเป็นจริงตาคนเราสามารถมองเห็นลูกโบว์ลิ่งได้ทั้งลูกที่เกิดจากแสงแวดล้อมและลูกที่เกิดจากแบบจำลองการส่องสว่างของการสะท้อนแบบกระจาย การสะท้อนแบบกระจกนี้จะส่งผลไปยังตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่แน่นอน และความเข้มแสงที่ตกกระทบบก็จะมีลักษณะชัดเจนรอบจุดที่ตกกระทบ การสะท้อนแสงแบบนี้จะมีตัวแปร n เป็นเลขยกกำลังที่เป็นตัวควบคุมผลของการสะท้อนแสง สำหรับวัตถุที่มีการสะท้อนแสงอย่าง

สมบูรณ์ เช่น กระจกจะมีค่า n เป็นอนันต์ และถ้าตาของผู้สังเกตอยู่ในแนวเดียวกับแสงที่ถูกสะท้อน ผู้สังเกตก็จะเห็นเฉพาะผลของการสะท้อนแสงแบบกระจกเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วการสะท้อนแบบ กระจกจะไม่ขึ้นอยู่กับสีของพื้นผิววัตถุ ดังนั้นจึงสมมติว่าสีที่ผู้สังเกตเห็นบนพื้นผิวนี้เป็นสีขาว เสมอ บางครั้งอาจพบว่าแบบจำลองการส่องสว่างที่แยกสี O_s ของกระจกออก จะได้เป็นแบบ จำลองการส่องสว่างของ Phong ดังสมการข้างล่างนี้

$$C_o = C_d k_d O_d + C_p [k_d O_d (\vec{N} \cdot \vec{L}) + k_s O_s (\vec{R} \cdot \vec{V})^n] \quad (3.28)$$

จากสมการจะเห็นว่าไม่มีการนำพจน์ของแหล่งกำเนิดแสงมารวมอยู่ในสมการด้วย แต่จะมีการนำพจน์บางพจน์มารวมเมื่อมีการส่องสว่างบนพื้นผิวจากแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดดังรูปที่ 3.15 ค่า k_s คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบกระจกและเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ, \vec{R} เป็นเวกเตอร์ การสะท้อน (Reflection Vector) ที่ถูกนอร์มอลไลซ์แล้วและยังเป็นตัวบอกทิศทางของแสงเมื่อมีการสะท้อนกลับจากวัตถุที่มีการสะท้อนแสงอย่างสมบูรณ์ หรือในอีกแง่หนึ่งก็คือเวกเตอร์ของ แหล่งกำเนิดแสง \vec{L} ที่สะท้อนออกมาจากเวกเตอร์ปกติ \vec{N} นั้นเอง ส่วน \vec{V} คือเวกเตอร์จากจุดที่ถูก ให้แสงเงาไปยังตาของผู้สังเกต ผลคูณภายในระหว่าง \vec{R} กับ \vec{V} เกิดขึ้นเนื่องจากในความเป็นจริง แล้ว ผู้สังเกตไม่สามารถมองตรงจุดของการสะท้อนได้เสมอไป ซึ่งนั่นก็คือ \vec{R} และ \vec{V} ไม่อยู่ใน แนวเดียวกัน ผลของผลคูณภายในจะถูกทำให้มีน้ำหนักขึ้นด้วยการยกกำลัง n ซึ่ง n ก็คือเลขยกกำลัง ของการสะท้อนแบบกระจกเพื่อสร้างลักษณะการสะท้อนที่เด่นชัดขึ้น



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการสะท้อนแบบกระจก ค่าสีของจุดบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับมุมระหว่างเวกเตอร์ การสะท้อนกับผู้สังเกต

3.6.3 การให้แสงเงาแบบ Gouraud และ Phong (Gouraud and Phong Shading)

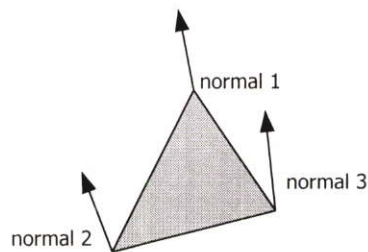
ในเอกสารอ้างอิงทางคอมพิวเตอร์กราฟิกมักจะปรากฏคำว่า การให้แสงเงาหรือการส่อง สว่างของ Phong และ Gouraud ซึ่ง Heri Gouraud ได้นำเสนอผลงานของเขาในปี 1971 และ Bui Tuong Phong นำเสนอในปี 1975 ทั้งสองได้เสนอเทคนิคการพัฒนาให้การสร้างภาพรูปทรง

เรขาคณิตบนคอมพิวเตอร์มีลักษณะดูเหมือนจริง ในแบบจำลองการให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong จะกล่าวถึงแบบจำลองการให้แสงเงาสองแบบที่ต่างกัน ซึ่งจะนำไปใช้กับโพลิกอน โดยแบบจำลองของ Gouraud จะเป็นพื้นฐานของแบบจำลองทั้งสอง และแบบจำลองการให้แสงเงาทั้งสองนี้ก็สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong ได้ด้วย จะเห็นว่าค่อนข้างสับสน เนื่องจาก Phong มีทั้งแบบจำลองการให้แสงเงาและการส่องสว่าง ส่วน Gouraud มีเพียงแบบจำลองการให้แสงเงาเท่านั้น

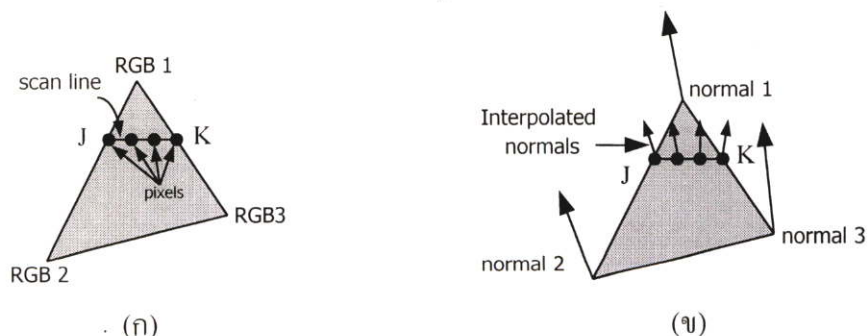
3.6.4 ความแตกต่างของแบบจำลองการให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong

แบบจำลองการให้แสงเงาของ Gouraud และ Phong ล้วนเป็นตัวอย่างของการนำแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong มาใช้ ซึ่งมีความแตกต่างกันอยู่ที่ว่าจะนำแบบจำลองการส่องสว่างมาใช้เมื่อไหร่และที่ไหนเท่านั้น

เมื่อจะมีการจำลองการให้แสงเงาแก่โพลิกอน ซึ่งประกอบด้วยรูปทรงเรขาคณิตและเวกเตอร์ปกติที่มุมยอดของโพลิกอนดังรูปที่ 3.16 เวกเตอร์ปกติเหล่านี้จะผ่านแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong ทุกมุม และได้ผลลัพธ์เป็นสีของแต่ละมุมออกมา หลังจากนั้นจะถูกนำไปผ่านกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งในสองกระบวนการที่ต่างกัน นั่นคือ การให้แสงเงาของ Gouraud และ การให้แสงเงาของ Phong



รูปที่ 3.16 โพลิกอนที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ปกติที่มุมยอด



รูปที่ 3.17 ก) การให้แสงเงาของ Gouraud ข) การให้แสงเงาของ Phong

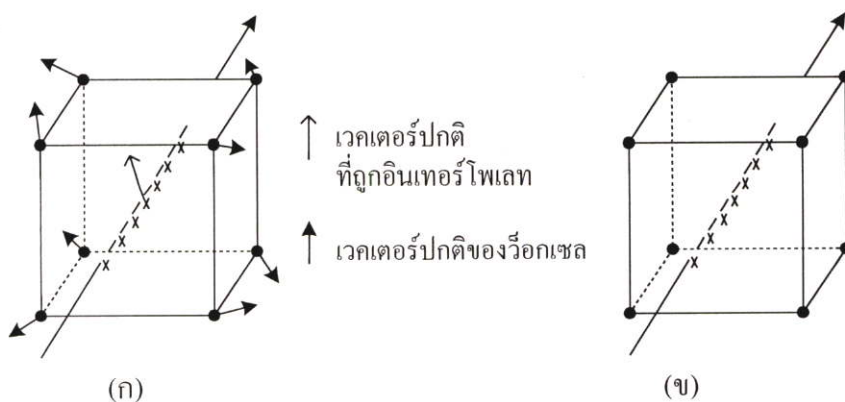
การให้แสงเงาของ Gouraud จะนำเอาสีที่มุมยอดของโพลิกอน ซึ่งได้จากการผ่านกระบวนการส่องสว่างนั้น มาทำการอินเทอร์โพลเลทค่าสีระหว่างขอบของโพลิกอนและระหว่างเส้นสแกน

ดังแสดงในรูปที่ 3.17ก) โดยจะใช้การอินเทอร์โพลเนชัน (Linear Interpolation) แต่ก็สามารถใช้การอินเทอร์โพลเนชันแบบอื่นที่ดีกว่าก็ได้ ค่าสีที่จุด J ได้จากการอินเทอร์โพลเนชันสีที่จุด RGB1 กับ RGB2 ค่าสีที่จุด K ได้จากการอินเทอร์โพลเนชันสีที่จุด RGB1 กับ RGB3 ส่วนค่าสีที่พิกเซลต่างๆบนเส้นสแกนจะได้ออกมาจากการอินเทอร์โพลเนชันสีที่จุด J กับ K หลังจากอินเทอร์โพลเนชันบนเส้นสแกนเสร็จหนึ่งเส้น ก็จะกระทำกระบวนการนี้กับเส้นสแกนเส้นอื่นๆไปจนกระทั่งครบทุกเส้นทั้งโพลิกอน

การให้แสงเงาของ Phong จะนำเอาเวกเตอร์ปกติที่มุมยอดมาอินเทอร์โพลเนชันระหว่างขอบของโพลิกอนและระหว่างเส้นสแกนดังรูปที่ 3.17ข) เวกเตอร์ปกติที่ J และ K ได้จากการอินเทอร์โพลเนชันเวกเตอร์ปกติระหว่างมุม ส่วนเวกเตอร์ปกติที่อยู่บนเส้นสแกนก็ได้ออกมาจากการอินเทอร์โพลเนชันเวกเตอร์ปกติระหว่างจุด J กับ K จากนั้นทุกๆพิกเซลบนเส้นสแกนจะถูกนำไปผ่านกระบวนการส่องสว่างของ Phong ทำให้ได้แสงเงาที่ถูกต้องเนื่องจากมีการให้การส่องสว่างทุกๆจุดบนโพลิกอนแทนการอินเทอร์โพลเนชันสีที่มุมยอด อย่างไรก็ตามแบบจำลองการให้แสงเงาของ Phong ก็มีข้อด้อยคือใช้การคำนวณที่มากกว่าแบบจำลองของ Gouraud ซึ่งสาเหตุไม่เพียงแต่เป็นเพราะการใช้แบบจำลองการส่องสว่างบ่อยๆเท่านั้น แต่เป็นเพราะจำเป็นต้องมีการนอร์มอลไลซ์เวกเตอร์ปกติที่ได้จากการอินเทอร์โพลเนชันด้วย

3.6.5 การให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตร

ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรสามารถแยกความแตกต่างระหว่างการให้แสงเงาของ Phong กับ Gouraud ได้เช่นเดียวกับการสร้างภาพของโพลิกอนดังในหัวข้อก่อนหน้านี้ กระบวนการสร้างภาพจะเริ่มต้นด้วยการอินเทอร์โพลเนชัน จากนั้นแบ่งกลุ่มข้อมูล ตามด้วยขั้นตอนการให้แสงเงา ซึ่งหมายถึงจะต้องอินเทอร์โพลเนชันความเข้มแสงของพิกเซลและค่าเวกเตอร์ปกติที่จุดแซมเปิล และใช้ค่าที่อินเทอร์โพลเนชันแล้วทั้งสองอย่างนี้กับแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong จากรูปที่ 3.18ก) เป็นลักษณะการสร้างภาพเชิงปริมาตรที่ใช้การให้แสงเงาแบบ Phong



รูปที่ 3.18 การให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตร ก) แบบ Phong ข) แบบ Gouraud

ส่วนการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การให้แสงเงาของ Gouraud จะเริ่มต้นฉายแสงและแบ่งกลุ่มข้อมูลก่อน จากนั้นจะนำค่า RGB ที่ได้ในแต่ละว็อกเซลไปอินเทอร์โพลค่า RGB เหล่านี้ไปยังจุดแซมเปิลที่ต้องการ พิจารณารูปที่ 3.18ข) มีการคำนวณค่าเวกเตอร์ปกติที่ตำแหน่งว็อกเซลที่ต้องการและนำไปใช้ในแบบจำลองการส่องสว่างของ Phong เพื่อให้ได้ค่า RGB แล้วนำไปอินเทอร์โพลค่าต่อไป

จากที่กล่าวในข้างต้นว่าเป้าหมายหลักของการให้แสงเงาในการสร้างภาพเชิงปริมาตร คือการช่วยให้เกิดความเข้าใจในการมองชุดข้อมูลภาพ ส่วนการสร้างภาพให้มีลักษณะเหมือนภาพถ่ายนั้นไม่ใช่จุดประสงค์หลักของการสร้างภาพเชิงปริมาตร ดังนั้นสิ่งสำคัญในการให้แสงเงาจึงมีเพียงองค์ประกอบการสะท้อนแบบกระจายและแหล่งกำเนิดแสงสีขาว 1 ถึง 2 แหล่งที่อยู่รอบๆ เท่านั้น ส่วนองค์ประกอบการสะท้อนแบบกระจกและแสงแวดล้อมเป็นเพียงสิ่งที่ช่วยให้ภาพที่สร้างขึ้นดูแปลกตาไปเท่านั้น จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

3.7 สรุป

ความรู้พื้นฐานทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกดังที่กล่าวถึงในบทนี้ เช่น ระบบพิกัด, การแปลงเรขาคณิต, การให้แสงเงา และอื่นๆ ล้วนมีความสำคัญต่อการสร้างภาพเชิงปริมาตร เพราะจะเป็นส่วนประกอบในแต่ละขั้นตอนของการสร้างภาพเชิงปริมาตร เช่น การแบ่งกลุ่มข้อมูล, การอินเทอร์โพลค่า และการประกอบภาพ ซึ่งล้วนต้องอาศัยพื้นฐานทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกมาช่วยเพื่อให้ภาพที่สร้างขึ้นมีคุณภาพดีและสมจริงขึ้น

การประมวลผลภาพในการสร้างภาพเชิงปริมาตร

4.1 บทนำ

ดังที่ได้ทราบถึงประโยชน์ของการสร้างภาพเชิงปริมาตรที่มีต่อโครงสร้างและองค์ประกอบในชุดข้อมูลมาแล้ว นั่นคือช่วยให้สามารถมองเห็นบริเวณที่มีขอบเขตไม่ชัดเจนได้ และแบ่งขอบเขตของวัตถุหลายๆชนิดที่อยู่ในวัตถุชิ้นเดียวให้ออกจากกันได้ ซึ่งการสร้างภาพเชิงพื้นผิวนั้นไม่สามารถทำได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับค่าความทึบแสงของวัตถุแต่ละชนิดที่ถูกแบ่งกลุ่มเอาไว้ในขั้นตอนเริ่มต้น มาร่วมกับองค์ประกอบอื่นๆ แล้วประกอบกันแสดงเป็นภาพผลลัพธ์ออกมา ซึ่งในการรวมกันนี้จะมีการกระทำทางคณิตศาสตร์ด้วย เป็นผลให้เกิดตัวเลขทศนิยม จึงจำเป็นต้องมีการปัดค่าเพื่อให้ได้ตัวเลขจำนวนเต็มไปใช้ในกระบวนการ ดังนั้นจึงมีอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญก็คือ การแทรกค่าหรือการอินเทอร์โพลต (Interpolate) เพื่อให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆในการสร้างภาพเชิงปริมาตรที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ได้แก่ การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Classification), การอินเทอร์โพลต และการประกอบภาพ (Composition) ซึ่งล้วนเป็นหัวใจของการสร้างภาพ และถือเป็นทฤษฎีการประมวลผลภาพเชิงปริมาตรที่สำคัญส่วนหนึ่ง

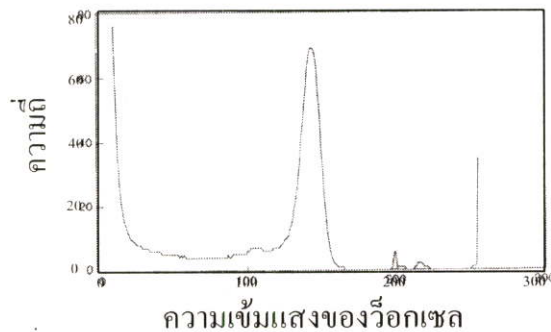
4.2 การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Classification) [12]

การแบ่งกลุ่มข้อมูลและการให้แสงเงาจากที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้านี้นั้นล้วนเป็นสิ่งสำคัญกับการสร้างภาพเชิงปริมาตรอย่างยิ่ง ขั้นตอนการแบ่งกลุ่มข้อมูลในกระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตร จะช่วยให้สามารถสร้างภาพของชุดข้อมูลที่มีโครงสร้างซับซ้อนคลุมเครือได้ ทำให้มองเห็นสิ่งที่อยู่ภายในและโครงสร้างของวัตถุ แทนที่จะเห็นเพียงแค่พื้นผิวภายนอกวัตถุตั้งแต่เดิม

ในส่วนของการแบ่งกลุ่มข้อมูลนี้จะมีการกำหนดคุณสมบัติใหม่ให้แต่ละว็อกเซลในชุดข้อมูล ซึ่งเรียกว่า “ค่าความทึบแสง” (Opacity) ค่าความทึบแสงนี้จะเป็นตัววัดความโปร่งแสงของว็อกเซลและจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นตัวอธิบายปริมาณของแสงที่ตกกระทบว็อกเซล และถูกดูดกลืนไว้โดยว็อกเซลนั้น หรือกล่าวง่ายก็คือการมองทะลุผ่านว็อกเซลนั้นไป การกำหนดค่าความเข้มแสงให้ว็อกเซลจำเป็นต้องมีการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง เพื่อจัดความสัมพันธ์ที่ควรจะเป็นระหว่างค่าความทึบแสงกับว็อกเซล และเครื่องมือสำคัญในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนตัวหนึ่งก็คือ ฮิสโตแกรม ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.2.1 ฮิสโตแกรม (Histogram)

ฮิสโตแกรมเป็นตัวบอกจำนวนของว็อกเซลหรือพิกเซลที่มีค่าความเข้มแสงที่ระดับใดๆ ภายในชุดข้อมูล โดยแสดงในรูปกราฟที่มีแกนอนเป็นค่าของว็อกเซลหรือพิกเซล และมีแกนตั้งเป็นตัวเลขของความถี่ (ดังรูปที่ 4.1) ฮิสโตแกรมนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายค่าของว็อกเซลหรือพิกเซลที่เป็นไปได้ทั้งหมด ทำให้สามารถทราบถึงการกระจายของความเข้มแสงของว็อกเซลซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการพิจารณาที่จะนำฟังก์ชันถ่ายโอนมาใช้ในการแบ่งกลุ่มข้อมูล และฟังก์ชันถ่ายโอนนี้นับเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างให้ภาพเหมือนจริงจากทุกภาพหรือทุกชุดข้อมูล



รูปที่ 4.1 ฮิสโตแกรม

4.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

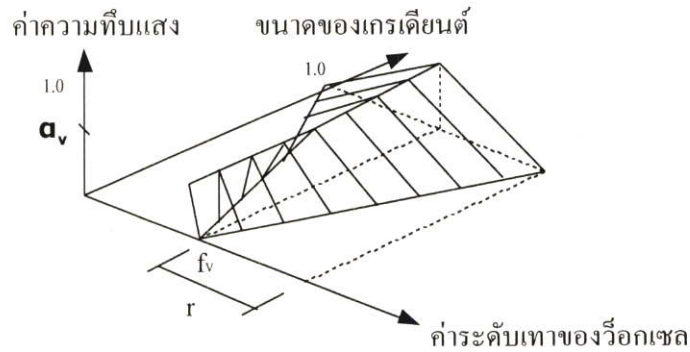
การแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นขั้นตอนการกำหนดค่าความทึบแสงให้แก่ว็อกเซล ซึ่งการกำหนดค่าความทึบแสงนี้ก็เป็นฟังก์ชันหนึ่งของคุณสมบัติของว็อกเซลเช่นเดียวกับความเข้มแสงหรือขนาดของเกรเดียนต์ และฟังก์ชันนี้จะถูกเรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง (Opacity Transfer function) ฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสงนี้สามารถนำคุณสมบัติหลายๆประการของว็อกเซลมาใช้เป็นอินพุตได้ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เพียงฟังก์ชันความเข้มแสงเท่านั้น หรือบางครั้งใช้ทั้งฟังก์ชันความเข้มแสงของว็อกเซลและขนาดของเกรเดียนต์ ลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง (α) ที่กล่าวมานี้สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$\alpha = o(I_i, |\nabla_i|, \dots) \quad (4.1)$$

เมื่อ $o(\dots)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสง, I_i เป็นฟังก์ชันความเข้มแสง และ $|\nabla_i|$ เป็นขนาดของเกรเดียนต์ ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลโดยใช้ค่าความเข้มแสงเพียงอย่างเดียวนั้นเหมาะกับชุดข้อมูลภาพจากเครื่อง CT ซึ่งสามารถแยกช่วงของว็อกเซลแต่ละค่าได้ง่าย แต่สำหรับชุดข้อมูลภาพที่ได้จากเครื่อง MRI นั้น ค่าระดับเทาของว็อกเซลที่อวัยวะแตกต่างกันอาจเป็นค่าเดียวกันได้ ซึ่งกรณีนี้การแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยการใช้ค่าความเข้มแสงของว็อกเซลเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้ผล

ลัพธ์ที่ถูกต้องได้ ดังนั้นจึงต้องมีการนำชุดข้อมูลส่วนอื่นมาพิจารณาร่วมด้วย และข้อมูลเพิ่มเติมที่นำมาใช้นี้ก็คือขนาดเกรเดียนต์ ซึ่งเกรเดียนต์คือการวัดความเร็วและทิศทางการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ดังนั้นบริเวณที่มีค่าเกรเดียนต์สูงจึงหมายถึงการที่บริเวณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอย่างรวดเร็ว จากคุณสมบัตินี้ค่าเกรเดียนต์จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับการหาขอบเขตระหว่างวัสดุ 2 อย่าง เช่น บริเวณระหว่างเนื้อเยื่อและกระดูกในชุดข้อมูลทางการแพทย์

ดังนั้นฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลจึงเป็นการรวมเอาค่าขนาดของเกรเดียนต์กับค่าความเข้มแสงของว็อกเซลเข้าด้วยกัน เพื่อใช้กำหนดให้ว็อกเซลที่อยู่บนพื้นผิวหรืออยู่ใกล้กับจุดต่อของวัสดุสองชนิดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรเดียนต์อย่างรวดเร็วให้มีค่าความทึบแสงมากๆ



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลสำหรับวัตถุเนื้อเดียว

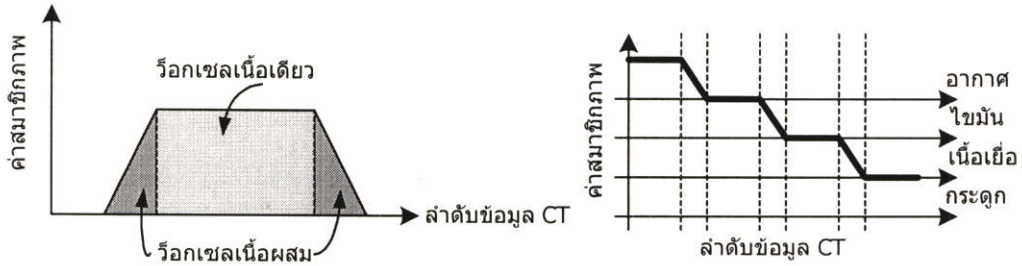
รูปที่ 4.2 เป็นฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบหนึ่ง [10] ซึ่งใช้แสดงวัตถุเนื้อเดียว โดยกำหนดให้ค่าความเข้มแสงของว็อกเซลอยู่บนแกน X ส่วนแกน Y เป็นขนาดของเกรเดียนต์ และแกน Z เป็นค่าความทึบแสง ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับกระโจมฟ้าใบ ในการใช้งานฟังก์ชันนี้จะถูกวางไปบนว็อกเซลซึ่งมีค่าความเข้มแสงที่ต้องการ (f_v) ว็อกเซลทั้งหมดที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ f_v และว็อกเซลอื่นๆรอบว็อกเซลนั้นที่มีขนาดของเกรเดียนต์ใกล้เคียงกันจะมีค่าความทึบแสงสูง 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 α_i คือค่าความทึบแสงของว็อกเซล i ซึ่งอยู่บริเวณรอบๆว็อกเซลที่สนใจ, α_v คือค่าความทึบแสงที่กำหนดให้ว็อกเซลที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ f_v , f_i เป็นค่าความเข้มแสงของว็อกเซล i ซึ่งอยู่บริเวณรอบๆว็อกเซลที่สนใจ, $|\nabla f_i|$ คือขนาดของเกรเดียนต์ที่ว็อกเซล i ซึ่งมีค่าความ

เข้มแสง f_i และ r คือค่าความเข้มแสงสูงสุดที่กำหนดให้ป้ายเบนจาก f_v เมื่อค่าเกรเดียนต์เปลี่ยนแปลงไป

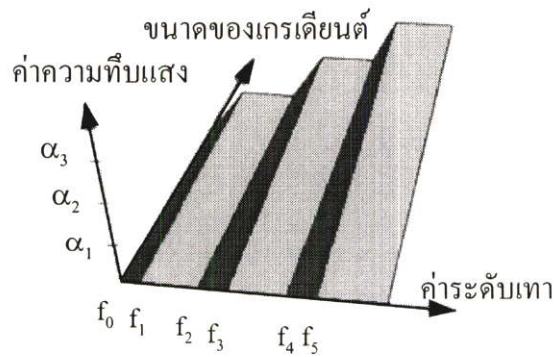
สำหรับฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบขึ้นจากขนาดของเกรเดียนต์และลักษณะโดยทั่วไปของว็อกเซลภายในชุดข้อมูล ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือว็อกเซลเนื้อเดี่ยวและว็อกเซลเนื้อผสม ซึ่งว็อกเซลเนื้อเดี่ยวนั้นจะมีวัสดุเพียงชนิดเดียวอยู่ในว็อกเซลนั้น ส่วนว็อกเซลเนื้อผสมเกิดจากการที่มีวัสดุ 2 ชนิดซึ่งมีกลุ่มข้อมูลติดกันประกอบอยู่ภายใน เช่น ไขมันและเนื้อเยื่อ [15] ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะโดยทั่วไปและการแบ่งกลุ่มข้อมูลของว็อกเซลในชุดข้อมูลจากเครื่อง CT

ฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความทึบแสงที่สร้างขึ้นจากขนาดเกรเดียนต์และลักษณะของว็อกเซลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 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 ในปัจจุบันวิธีการที่นิยมใช้กันอยู่คือ การตรวจสอบชุดข้อมูลและทำการลองผิดลองถูก [7], [8], [10], [11] (Trial and Error) ฟังก์ชันถ่ายโอนจะถูกปรับปรุงแบบซ้ำไปซ้ำมา แล้วเลือกภาพผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่สามารถแสดงถึงโครงสร้างซึ่งสนใจได้อย่างชัดเจน ในความเป็นจริงนั้นยังมีตัวแปรอีกหลายตัวซึ่งมีผลกับภาพผลลัพธ์ เช่น แบบจำลองการให้แสงเงา, ทิศทางการมอง และตัวดำเนินการการรวมองค์ประกอบภาพ ดังนั้นการปรับปรุงฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นจึงเป็นสิ่งที่สร้างความยุ่งยากมาก แม้ว่าจะเป็นการคำนวณแบบง่ายก็ตาม

4.3 การอินเทอร์โพลเลต (Interpolation) [12]

การกระทำทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการฉายแสง (Ray Casting) เพื่อทำการสร้างภาพนั้นในบางครั้งจำเป็นต้องมีการเข้าถึงข้อมูลในตำแหน่งที่อยู่ระหว่างจุดแซมเปิลซึ่งเป็นบริเวณที่ข้อมูลขาดหายไป ดังนั้นจึงต้องมีการแทรกค่าประมาณในช่วงหรือเรียกว่าการอินเทอร์โพลเลตค่าของจุดแซมเปิลที่ขาดหายไปเหล่านี้ การอินเทอร์โพลเลตมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะถูกควบคุมโดยเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลต (Interpolation Kernel) และรูปร่างของเคอร์เนลนี้จะเป็นตัวกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สำหรับถ่วงน้ำหนักการบวกและคุณภาพของการอินเทอร์โพลเลต โดยรูปร่างของเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลตแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5

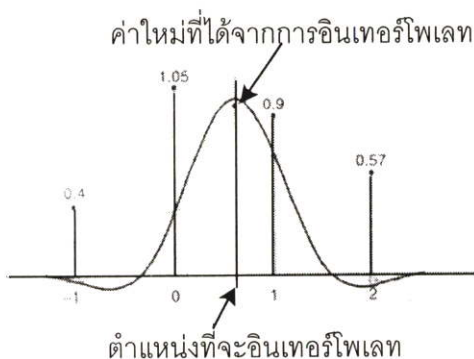


รูปที่ 4.5 เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลตแบบต่างๆ

การคำนวณค่าของฟังก์ชันในตำแหน่งที่ต้องการอินเทอร์โพลเลต ทำได้โดยนำเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลตไปคอนโวลูชันกับฟังก์ชันนั้นดังตัวอย่างที่ 4.1

ตัวอย่างที่ 4.1 พิจารณารูปที่ 4.6 ค่าของฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง (Discrete function) ฟังก์ชันหนึ่ง มีค่าเป็นดังนี้

$f[-1] = 0.4$, $f[0] = 1.05$, $f[1] = 0.9$ และ $f[2] = 0.57$ และมีค่าของฟังก์ชันการอินเทอร์โพลเลต (Interpolation function) ที่ตำแหน่งเหล่านี้ ได้แก่ -0.02 , 0.38 , 0.66 และ -0.07



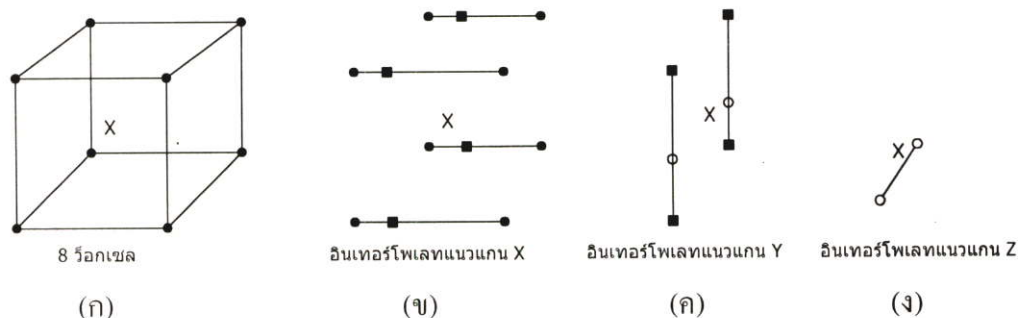
รูปที่ 4.6 กระบวนการอินเทอร์โพลเลท

เมื่อทำการอินเทอร์โพลเลทให้ได้ค่าใหม่ก็ทำได้โดยการคูณค่าฟังก์ชันการอินเทอร์โพลเลทกับฟังก์ชันนั้น จะได้เป็น $0.04 \times -0.02 + 1.05 \times 0.38 + 0.9 \times 0.66 + 0.57 \times -0.07 = 0.945$ ซึ่งนั่นก็คือค่าใหม่ที่ได้จากการอินเทอร์โพลเลทมีค่าเท่ากับ 0.945

เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลทหนึ่งมิติสามารถประยุกต์ใช้กับการอินเทอร์โพลเลทในสองมิติและสามมิติได้ ซึ่งสมการการอินเทอร์โพลเลทสองมิติสามารถทำได้ด้วยสมการที่ 4.4

$$f(x, y) = g(x, y) \cdot h(x, y) \tag{4.4}$$

ค่าที่ได้จากการอินเทอร์โพลเลทสามมิติจะเริ่มจากการอินเทอร์โพลเลทหนึ่งมิติไปที่ละหนึ่งแกน ได้แก่ แกน X, แกน Y และแกน Z ดังรูปที่ 4.7

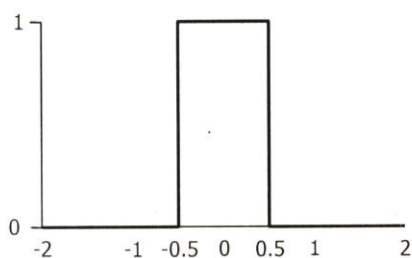


รูปที่ 4.7 การอินเทอร์โพลเลทสามมิติ

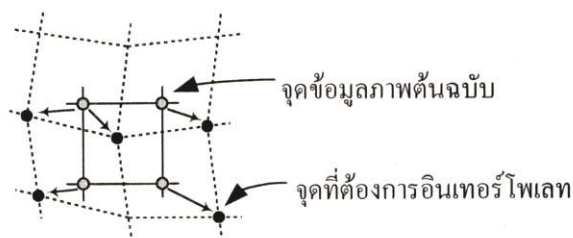
4.3.1 การอินเทอร์โพลเลทแบบเนียร์สเนบอร์ (Nearest Neighbor)

การอินเทอร์โพลเลทแบบเนียร์สเนบอร์เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด และมีความละเอียดน้อยที่สุด วิธีนี้จะเป็นการนำค่าที่อยู่ใกล้กับจุดที่จะอินเทอร์โพลเลทมากที่สุดมาเป็นคำตอบ โดยมีลักษณะของเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลเลทแสดงดังรูปที่ 4.8ก) ซึ่งจะเห็นว่า มีค่าเพียงค่าเดียวที่ถูกนำไปใช้ในการ

ประมวลผล ทำให้การคำนวณในแต่ละวงรอบมีน้อยมาก ส่วนลักษณะของการอินเทอร์โพลेटด้วยวิธีนี้เป็นดังรูปที่ 4.8ข)



(ก)



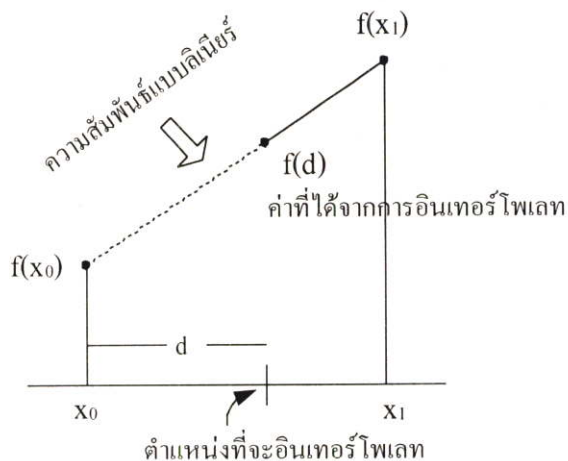
(ข)

รูปที่ 4.8 ก) เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลेटแบบเนยเรสเนบอร์
ข) ลักษณะของการอินเทอร์โพลेटแบบเนยเรสเนบอร์

ปัญหาที่พบในการอินเทอร์โพลेटด้วยวิธีนี้ก็คือ จุดที่อยู่ใกล้กับจุดที่จะอินเทอร์โพลेटมีมากกว่าหนึ่งจุด จึงไม่สามารถระบุได้ว่าจะเลือกจุดใดมาเป็นค่าของการอินเทอร์โพลेट ซึ่งเรียกปัญหานี้ว่า การเกิดอะแลสซิ่ง (Aliasing) และข้อด้อยอีกข้อหนึ่งของวิธีนี้คือ การเลื่อนของภาพ ซึ่งเกิดจากการปิดค่าของเนยเรสเนบอร์ ทำให้ภาพเลื่อนขึ้นไปครึ่งถึงหนึ่งพิกเซล ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากในการประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของวัตถุในภาพ แต่ถ้ามองถึงจำนวนรอบในการประมวลผลด้วยวิธีนี้แล้ว จะใช้จำนวนรอบน้อยซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของวิธีอินเทอร์โพลेटแบบเนยเรสเนบอร์

4.3.2 การอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์ (Linear Interpolation)

เทคนิคการอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เมื่อนำไปใช้ในสองมิติจะเรียกว่า การอินเทอร์โพลेटแบบไบลิเนียร์ (Bilinear Interpolation) และในทำนองเดียวกันถ้านำไปใช้ในสามมิติก็จะเรียกว่า การอินเทอร์โพลेटแบบไตรลิเนียร์ (Trilinear Interpolation) การอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์นี้จะให้ภาพผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการอินเทอร์โพลेटแบบเนยเรสเนบอร์ วิธีนี้จะสมมติให้จุดที่อยู่ล้อมรอบจุดที่ต้องการอินเทอร์โพลेटมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (Linear relationship) ดังรูปที่ 4.9

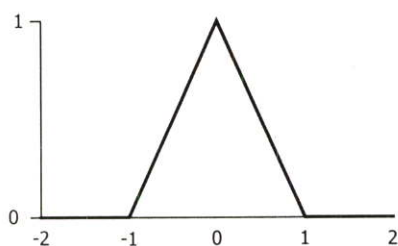


รูปที่ 4.9 การอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่า ค่าที่จะถูกอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์จะอยู่บนเส้นที่ลากระหว่างจุดสองจุด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

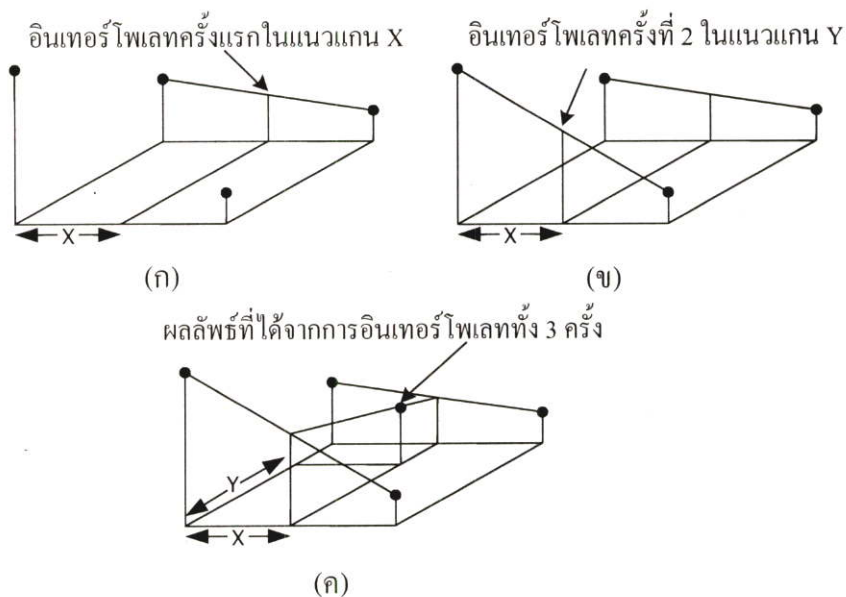
$$f(d) = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \cdot d + f(x_0) \quad (4.5)$$

เมื่อ d คือระยะทางระหว่างจุดแซมเปิลจุดแรกที่ตำแหน่ง x_0 ส่วนใหญ่แล้วระยะห่างของการสุ่ม จะกำหนดให้มีค่าคงที่และเท่ากันตลอด (ปกติมีค่าเท่ากับ 1) ซึ่งลักษณะของเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลेटเป็นดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์

การอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์สามารถนำไปใช้ในมิติที่สูงขึ้นได้อย่างง่ายดาย พิจารณารูปที่ 4.11 เป็นลักษณะการอินเทอร์โพลेटในสองมิติซึ่งก็คือ การอินเทอร์โพลेटแบบไบลิเนียร์ โดยวิธีการเริ่มต้นด้วยการหาจุดที่ทราบค่า 4 จุดที่อยู่รอบข้างจุดที่ต้องการอินเทอร์โพลेट จากนั้นทำการอินเทอร์โพลेटในแนวแกน X ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปใช้อินเทอร์โพลेटในแนวแกน Y ต่อไปเป็นขั้นตอนสุดท้าย ดังรูปที่ 4.11ก), 4.11ข) และ 4.11ค) ตามลำดับขั้นตอน

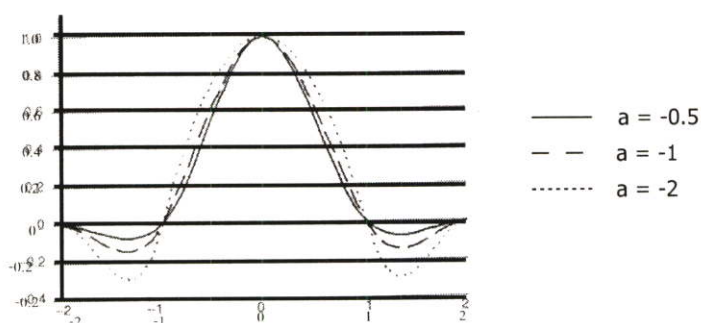


รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการอินเทอร์โพลेटแบบไบลิเนียร์ 3 ขั้นตอน

สำหรับการอินเทอร์โพลेटแบบไตรลิเนียร์นั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.7 ก่อนหน้าแล้ว โดยการคำนวณเริ่มจากการอินเทอร์โพลेटแบบไบลิเนียร์ก่อน 2 ครั้ง ซึ่งครั้งแรกสำหรับด้านหน้าของลูกบาศก์ (รูปที่ 4.7ข) และครั้งที่สองที่ด้านหลังของลูกบาศก์ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้อินเทอร์โพลेटในแนวแกน Y (รูปที่ 4.7 ค) และสุดท้ายจะเป็นการอินเทอร์โพลेटในแนวแกน Z (รูปที่ 4.7ง)

4.3.3 การอินเทอร์โพลेटแบบคิวบิกคอนโวลูชัน (Cubic Convolution)

การอินเทอร์โพลेटแบบคิวบิกคอนโวลูชันเป็นวิธีการที่ให้คุณภาพของภาพผลลัพธ์สูงกว่าการอินเทอร์โพลेटแบบไบลิเนียร์ แต่ใช้การคำนวณที่มากกว่า ในรูปที่ 4.12 จะเป็นการแสดงลักษณะของเคอร์เนลของการอินเทอร์โพลेटที่ใช้ในการอินเทอร์โพลेटแบบนี้ สังเกตว่าจะมีความกว้าง 4 หน่วย ในขณะที่แบบลิเนียร์จะมีเพียง 2 หน่วย นั่นคือ การอินเทอร์โพลेटแบบลิเนียร์จะคำนวณค่าใหม่ได้จากการใช้จุดแซมเปิล 2 จุด ส่วนการอินเทอร์โพลेटแบบคิวบิกคอนโวลูชันจะใช้การคำนวณค่าใหม่จากจุดแซมเปิล 4 จุดในหนึ่งมิติ



รูปที่ 4.12 เคอร์เนลของการอินเทอร์โพลेटแบบคิวบิกคอนโวลูชัน

การอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชันจะมี a เป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งใช้สำหรับควบคุมรูปร่างและความชันของเคอร์เนล โดยลักษณะของเคอร์เนลที่แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อ a มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น รูปร่างของเคอร์เนลจะชันและกินบริเวณออกไปด้านข้างมากขึ้น นิยามของฟังก์ชันคิวบิกคอนโวลูชันแสดงดังสมการที่ 4.6

$$f(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1 & ; 0 \leq |x| \leq 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a & ; 1 \leq |x| \leq 2 \\ 0 & ; |x| \geq 2 \end{cases} \quad (4.6)$$

ในทางปฏิบัติแล้ว ค่า a จะอยู่ระหว่าง -3 กับ 0 ซึ่งภาพผลลัพธ์จะเบลอมากขึ้นเมื่อ a มีค่าเข้าใกล้ 0 และจะคมชัดขึ้นเมื่อ a มีค่าเข้าใกล้ -3 ตามปกติการใช้ค่า a เท่ากับ -0.5 จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สำหรับสมการการอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชันในรูปสัมประสิทธิ์ของเคอร์เนลที่จุด d เขียนได้ดังนี้

$$f(d) = c_0 \cdot p_0 + c_1 \cdot p_1 + c_2 \cdot p_2 + c_3 \cdot p_3 \quad (4.7)$$

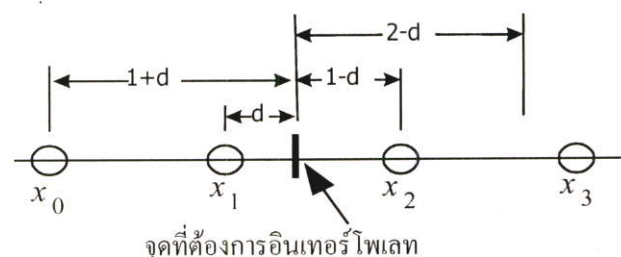
เมื่อ p_0, p_1, p_2 และ p_3 คือค่าของฟังก์ชันที่จุด x_0, x_1, x_2 และ x_3 ส่วน c_0, c_1, c_2 และ c_3 คือค่าสัมประสิทธิ์ของเคอร์เนลซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c_0 &= a(1+d)^3 - 5a(1+d)^2 + 8a(1+d) - 4a \\ &= ad^3 - 2ad^2 + ad \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$c_1 = (a+2)d^3 - (a+3)d^2 + 1 \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} c_2 &= (a+2)(1-d)^3 - (a+3)(1-d)^2 + 1 \\ &= (-1)(a+2)d^3 + (2a+3)d^2 - ad \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} c_3 &= a(2-d)^3 - 5a(2-d)^2 + 8a(2-d) - 4a \\ &= -ad^3 + ad^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.13 การอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชันที่จุด d

4.4 การประกอบภาพ (Image Composition) [12]

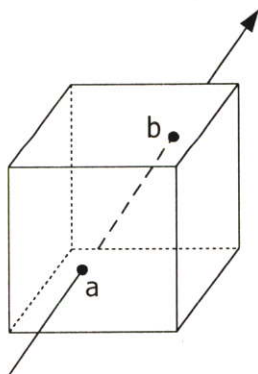
การประกอบภาพนับเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการสร้างภาพเชิงปริมาตรก่อนที่จะนำไปแสดงผลที่หน้าจอ โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการรวมจุดแซมเปิลต่างๆที่เกิดจากการเดินทางของแสงแต่ละชั้นและการอินเทอร์โพลเลท เพื่อพิจารณาค่าสีผลลัพธ์ของพิกเซลของการสร้างภาพ ซึ่งภาพของวัตถุต่างชนิดกันที่มีค่าความทึบแสงไม่เท่ากัน จะถูกแสดงออกมาพร้อมกันทั้งปริมาตร การรวมองค์ประกอบภาพเป็นการกระทำที่ซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำให้ยากแก่การทำนายสีผลลัพธ์ของพิกเซลที่เกิดจากจุดแซมเปิลเหล่านี้

4.4.1 สมการในการสร้างภาพเชิงปริมาตร

การสร้างภาพด้วยการฉายแสงดังที่กล่าวมาแล้วเป็นการประมวลจุดข้อมูลทั้งหมดภายในปริมาตรที่บรรจุจุดข้อมูล โดยที่สมมติว่าพฤติกรรมภายในว็อกเซลมีลักษณะการกระเจิง, การดูดซับ, การกำเนิด และการสะท้อนของแสงที่แน่นอน ผลกระทบของแสงที่ตกกระทบกับแซมเปิลของจุดข้อมูลตามแนวแสงจะถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อคำนวณหาสีผลลัพธ์ของพิกเซลหนึ่งจุดดังสมการที่ 4.12 ซึ่งเป็นสมการของการสร้างภาพเชิงปริมาตร [17]

$$I(a,b) = \int_a^b g(s) e^{-\int_a^s \tau(x) dx} ds \quad (4.12)$$

เมื่อ $I(a,b)$ คือค่าความเข้มแสงของพิกเซลหนึ่งจุด, ds คือทิศทางของแสง และลำแสงวิ่งจากจุด a ไปยังจุด b (รูปที่ 4.14) ส่วน $g(s)$ คือเทอมของแหล่งกำเนิดซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการอธิบายแบบจำลองการส่องสว่างที่ใช้การฉายแสง และ $\tau(x)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดับลงของแสง (Extinction coefficient) และเป็นตัวบอกรัตราการถูกดูดซับของแสงต่อหน่วยความยาว เนื่องจากการกระเจิงหรือการดับลงของแสง ค่า $g(s)$ และ $\tau(x)$ จะถูกใช้ในการทำนายค่าของว็อกเซลเพื่อหาค่าความเข้มแสงและความทึบแสงต่อไป ซึ่งเราเรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนนั่นเอง



รูปที่ 4.14 ลักษณะของลำแสงที่พุ่งเข้าไปในปริมาตรจากจุด a ไปยังจุด b ตามทิศทาง ds

วิธีการรวมค่าต่อเนื่อง (continuous integral) ที่ง่ายที่สุดคือ ผลรวมของรีมันน์ (Riemann sum) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังสมการที่ 4.13

$$\int_0^d h(x) \approx \sum_{i=0}^n h(x_i) \Delta x \quad (4.13)$$

สมการนี้อธิบายถึงการคำนวณผลรวมในกรณีที่เซตของแซมเปิลจากฟังก์ชันต้นฉบับเป็นแบบดิสครีท (Discrete set) เท่านั้น ช่วงระหว่าง 0 ถึง d จะถูกรวมไปจนถึง n หรือเท่ากับจำนวนช่วงความยาว Δx ในแต่ละช่วงความยาวจะสมมติให้ $h(x)$ เป็นค่าคงที่ ซึ่งก็คือ $h(x_i)$ นั่นเอง

เมื่อคำนวณความเข้มแสงและความโปร่งแสงบนลำแสงหนึ่งเส้นที่จุดแซมเปิลแล้วการรวมค่าที่ได้จากแนวลำแสงทั้งหมดด้วยวิธีหน้าไปหลังจะเป็นดังสมการที่ 4.14

$$I(a,b) = \sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=0}^{i-1} T_j \quad (4.14)$$

เมื่อ I_i คือแสงทั้งหมดที่ถูกฉายหรือความเข้มแสงที่จุด i บนแนวลำแสง และ T_j คือความโปร่งแสงของจุดๆหนึ่งบนแนวลำแสงมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นการบอกปริมาณของแสงที่ทะลุผ่านจุดนั้น สมการที่ 4.14 นี้จะใช้ในการคำนวณค่าทุกลำแสงที่ผ่านเข้าไปในชุดข้อมูล

บ่อยครั้งจะพบว่ามีการใช้ค่าความทึบแสงแทนค่าความโปร่งแสง ซึ่งค่าความทึบแสงนี้จะนิยามในรูปของความโปร่งแสงได้เป็นดังสมการที่ 4.15

$$\alpha = 1 - T \quad (4.15)$$

สมการที่ 4.14 ซึ่งเป็นสมการการประกอบภาพตามแนวลำแสงนั้น สามารถเขียนพิสูจน์ได้ดังนี้

นำสมการที่ 4.13 ไปแทนในสมการที่ 4.12 ได้เป็น

$$I(a,b) = \sum_{i=0}^n g(s_i) e^{-\sum_{j=0}^{i-1} \tau(x_j) \Delta x} \Delta s \quad (4.16)$$

เมื่อกำหนด $\tau_j = \tau(x_j)$ และ $g_i = g(s_i)$ จะได้ว่า

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

ลดรูปสมการ 4.17 ด้วยคุณสมบัติผลบวกของเลขยกกำลัง จะได้

$$I(a,b) = \sum_{i=0}^n \mathcal{E}_i \Delta s \prod_{j=0}^{i-1} e^{-\phi_j \Delta x} \quad (4.18)$$

เมื่อนิยามค่าความทึบแสง สัญลักษณ์คือ α_j ความเข้มแสงที่สะท้อนจากพื้นผิว (I_i) และค่าสีของจุดแซมเปิลที่ผ่านการให้แสงเงามาแล้ว สัญลักษณ์คือ c_i เป็นดังนี้

$$\alpha_j = 1 - e^{-\phi_j \Delta x} \quad (4.19)$$

$$I_i = \mathcal{E}_i \Delta s \quad (4.20)$$

$$c_i = \frac{I_i}{\alpha_i} \quad (4.21)$$

แทนค่าสมการที่ 4.19, 4.20, 4.21 ลงในสมการที่ 4.18 จะได้สมการการรวมองค์ประกอบภาพตามแนวลำแสงซึ่งประกอบขึ้นจากพจน์ของค่าความทึบแสงและค่าความเข้มแสงที่ผ่านการให้แสงเงามาแล้วเป็นสมการที่ 4.22

$$I(a,b) = \sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \alpha_j) \quad (4.22)$$

และเมื่อพิจารณาตามสมการที่ 4.15 ก็จะได้ว่าผลลัพธ์เป็นดังสมการที่ 4.14 นั่นเอง

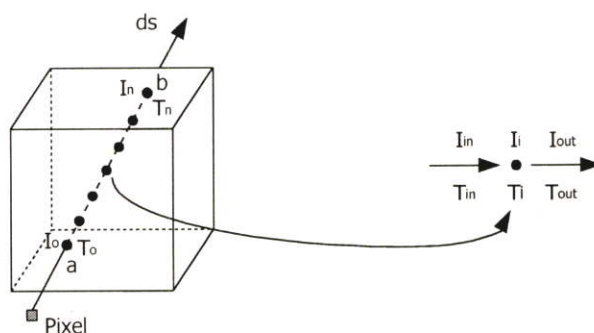
4.4.2 การประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง (Front-To-Back Composition) [21], [22]

สมการที่ 4.22 ที่ผ่านมาสามารถเรียกอีกอย่างว่าสมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง สมการนี้เป็นการอธิบายถึงความเข้มแสง I ทั้งหมดที่ถูกสะสมมาตามแนวลำแสงจนถึงจุดแซมเปิลซึ่งมีความเข้มแสงเป็น I_i ควบคู่กับค่าความทึบแสงที่สะสมมาจนถึงปัจจุบันบนลำแสงนั้น จะเห็นได้ว่า I_i ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยจุดแซมเปิลที่อยู่ก่อนหน้าทั้งหมด ในรูปที่ 4.15 ทางด้านซ้ายเป็นตัวอย่างของการรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลังบนลำแสงหนึ่งเส้น จุดแซมเปิลที่ถูก

ประกอบเข้าไปในภาพจะเริ่มจากจุด a ไปยังจุด b ส่วนทางด้านขวาเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนจุด
 แคมเบิ้ลหนึ่งจุด กล่าวคือค่าความเข้มแสง I_{in} และค่าความโปร่งแสง T_{in} จะถูกประกอบเข้าไปใน
 จุดแคมเบิ้ลนี้ และการรวมองค์ประกอบของภาพแบบหน้าไปหลังของ I_i และ T_i กับ I_{in} และ T_{in}
 จะทำให้ได้ I_{out} และ T_{out} เป็นค่าใหม่เกิดขึ้น

$$I_i = C_i * \alpha_i \quad (4.23)$$

นั่นคือค่าความเข้มแสงหาได้จากผลคูณระหว่างค่าสีของจุดแคมเบิ้ลกับค่าความทึบแสงของ
 จุดแคมเบิ้ลนั้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ใช่วิธีที่ให้ค่าความเข้มแสงที่ถูกต้องแน่นอนได้



รูปที่ 4.15 การประกอบภาพแบบหน้าไปหลัง

ในการคำนวณหาค่า $I(a,b)$ นั้นจำเป็นต้องทำการคำนวณสมการการฉายแสงแบบรีเคอร์ซีฟ
 (Recursive) ซึ่งการคำนวณนี้จะอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นเมื่อกระจายสมการที่ 4.22 ออกมาดังนี้

$$\sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \alpha_j) = I_0 + I_1(1 - \alpha_0) + I_2(1 - \alpha_0)(1 - \alpha_1) + \dots + I_n(1 - \alpha_0) \dots (1 - \alpha_{n-1}) \quad (4.24)$$

จากสมการที่ 4.24 นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นได้อีกโดยใช้ตัวดำเนินการ over ซึ่ง
 ตัวดำเนินการนี้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย T. Porter และ T. Duff และให้นิยามไว้ว่า

$$CoverI = C + (1 - \alpha)I \quad (4.25)$$

เมื่อนำตัวดำเนินการ over นี้ไปใช้กับสมการที่ 4.24 จะได้

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

นอกจากนี้สมการที่ 4.26 ยังสามารถเขียนแบบรีเคอร์ซีฟได้อีกคือ

$$I_{out} = I_{in} + T_{in} I_i \quad (4.27)$$

$$T_{out} = T_{in} I_{in} \quad (4.28)$$

โดยที่ I_{out} และ T_{out} คือค่าความเข้มแสงที่ถูกสะสมและค่าความโปร่งแสงที่เพิ่งออกมาจากจุดแซมเปิลปัจจุบัน ค่า I_{in} และ T_{in} คือค่าความเข้มแสงและค่าความโปร่งแสงสะสมก่อนที่แสงจะเข้าไปกระทบจุดแซมเปิล ค่า I_i และ T_i คือความเข้มแสงและค่าความโปร่งแสงของจุดแซมเปิลปัจจุบัน

จะเห็นได้ว่าในการประกอบภาพแบบนี้จำเป็นต้องติดตามและสะสมค่าความทึบแสงเอาไว้ ซึ่งการทำเช่นนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อเสียคือการสร้างภาพใช้เวลานานขึ้นเนื่องจากโปรเซสเซอร์จำเป็นต้องคำนวณสมการค่าความทึบแสงที่จุดแซมเปิลทุกจุด แต่ข้อดีก็คือในการเขียนโปรแกรมนี้สามารถหยุดการคำนวณได้เมื่อค่าความทึบแสงสะสมมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1.0 ซึ่งเหตุผลของปรากฏการณ์นี้มาจากหลักความจริงที่ว่า ถ้ามีวัตถุเรียงซ้อนกันอยู่โดยที่แต่ละชั้นมีค่าความทึบแสงไม่เท่ากัน ตาของมนุษย์จะสามารถมองทะลุไปได้ถึงวัตถุชั้นใดชั้นหนึ่ง ก็ขึ้นอยู่กับว่าจะมีความทึบแสงโดยสมบูรณ์ที่ชั้นใด นั่นคือความทึบแสงที่สะสมมาในแต่ละชั้นจะรวมกัน ทำให้ความทึบแสงมีค่ามากขึ้นจนสามารถตีความได้ว่าวัตถุในชั้นนั้นทึบแสงโดยสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นการคำนวณค่าบิลลาแสงเส้นนั้นต่อไปอีกจึงเป็นการคำนวณที่ไร้ประโยชน์ ซึ่งวิธีการนี้ถูกเรียกว่า การสิ้นสุดก่อนของลำแสง (Early Ray Termination)

4.4.3 การประกอบภาพแบบหลังไปหน้า (Back-To-Front Composition) [10]

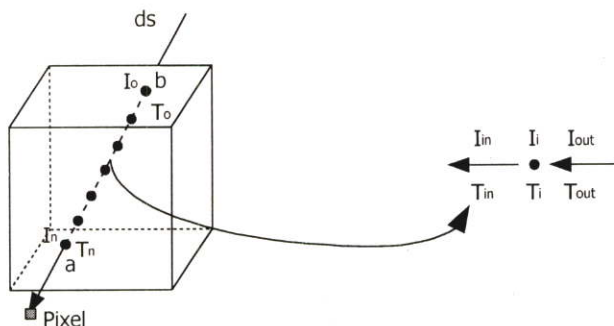
การประกอบภาพแบบหลังไปหน้าแสดงดังรูปที่ 4.16 การประกอบภาพแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับวิธีแบบหน้าไปหลังที่ผ่านมา จากรูปจะเห็นได้ว่าระนาบภาพอยู่ในตำแหน่งเดียวกับรูปที่ 4.15 แต่ต่างกันที่ลำดับของจุดแซมเปิลที่จะถูกประมวล สมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้าแสดงดังสมการที่ 4.29

$$I(a,b) = \sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=i+1}^n (1 - \alpha_j) \quad (4.29)$$

หรือเขียนเป็นสมการแบบรีเคอร์ซีฟดังนี้

$$I_{out} = I_{in} T_i + I_i \quad (4.30)$$

เมื่อ I_{out} และ T_{out} คือค่าความเข้มแสงที่ถูกสะสมและค่าความโปร่งแสงทั้งหมดหลังจากที่แสงกระทบกับจุดแซมเปิดปัจจุบัน ค่า I_{in} และ T_{in} คือค่าความเข้มแสงและค่าความโปร่งแสงสะสมก่อนที่จะเข้าไปกระทบจุดแซมเปิด ค่า I_i และ T_i คือความเข้มแสงและค่าความโปร่งแสงของจุดแซมเปิดปัจจุบัน



รูปที่ 4.16 การประกอบภาพแบบหลังไปหน้า

ผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีการนี้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่ความแตกต่างของทั้งสองวิธีนั้นเห็นได้ชัดจากอัลกอริทึม โดยที่การรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลังนั้นจำเป็นต้องมีการสะสมค่าความทึบแสงทุกครั้งที่ทำกรรวมองค์ประกอบภาพในขณะที่การประกอบภาพแบบหลังไปหน้านั้นไม่จำเป็น แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้ไม่สามารถนำการสิ้นสุดก่อนลำแสงมาใช้ได้ จะต้องคำนวณค่าบนเส้นลำแสงมาเรื่อยๆจนกว่าจะถึงตาของผู้สังเกต

4.4.4 การใช้ความทึบแสงแทนความโปร่งแสง

ในปี 1988 Levoy ได้เสนอบทความเกี่ยวกับการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้ค่าความทึบแสงในการคำนวณแทนการใช้ความโปร่งแสง เขาได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับค่าสีที่มีลักษณะเหมือนสมการที่ 4.23 นั่นคือ ค่าความเข้มแสงในสมการที่ 4.22, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 และ 4.30 จะถูกแทนที่ด้วยค่าสีของจุดแซมเปิดที่ถูกคูณกับค่าความทึบแสง อาจกล่าวได้ว่าความทึบแสงมีค่าเท่ากับหนึ่งลบกับความโปร่งแสง และสาเหตุที่ใช้ความโปร่งแสงอธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ก็เนื่องจากการใช้การคำนวณที่น้อยกว่าความทึบแสง และเมื่อเขียนสมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหน้าไปหลังโดยใช้ความทึบแสงแทนแล้ว จะได้ดังสมการที่ 4.31 และ 4.32

$$C_{out} = C_{in} + (1 - \alpha_{in}) \alpha_i C_i \quad (4.31)$$

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

ซึ่งสามารถเปรียบเทียบ C_{out} ได้กับ I_{out} ในสมการที่ 4.27, 4.28 เพื่อคำนวณ α_{out} จึงต้องจัดสมการให้อยู่ในรูปของพจน์บวกและพจน์ลบเพื่อเปรียบเทียบกับ T_{out} ในสมการที่ 4.31, 4.32

ในการทำงานเดียวกันก็จะสามารถเขียนสมการการรวมองค์ประกอบภาพแบบหลังไปหน้าได้
เป็นดังสมการข้างล่างนี้

$$C_{out} = C_i \alpha_i + C_{in} (1 - \alpha_i) \quad (4.33)$$

4.5 สรุป

จากเนื้อหาที่เกี่ยวกับการสร้างภาพเชิงปริมาตรที่ได้อธิบายในบทที่ผ่านมา จะพบว่ามีการขึ้น
ตอนการสร้างที่ยู่ยากซับซ้อนอย่างยิ่ง ซึ่งการคำนวณจำนวนมากนี้เองส่งผลให้ใช้เวลาในการสร้าง
ภาพแต่ละมุมมองนานมาก ดังนั้นหากสามารถลดเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพได้จะนับเป็นผลดีอย่าง
ยิ่ง ซึ่งเทคนิคหนึ่งในงานวิจัยนี้นำมาใช้ก็คือการแปลงระยะทางสองทิศทาง ซึ่งจะอธิบายสิ่งที่เกี่ยวข้อง
ข้องในบทถัดไป

บทที่ 5

การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตร ด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

5.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวถึงความสำคัญของการสร้างภาพเชิงปริมาตรในบทที่ผ่านมาแล้ว ทำให้ทราบว่ากระบวนการสร้างภาพจำเป็นต้องมีการเข้าถึงข้อมูลในชุดข้อมูลทุกๆจุดเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์มีมากไป ด้วย นั่นคือต้องใช้เวลาในการสร้างภาพนาน ซึ่งถือเป็นข้อด้อยของการสร้างภาพเชิงปริมาตรอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างภาพเชิงพื้นผิว แต่เนื่องจากจุดเด่นของภาพเชิงปริมาตรสามารถแสดงโครงสร้างส่วนที่เกี่ยวข้องกันของอวัยวะต่างๆได้เป็นอย่างดี ทำให้มีความพยายามคิดหาวิธีที่จะทำให้การสร้างภาพในแต่ละมุมมองทำได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งแนวคิดหนึ่งที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำมาใช้ก็คือ การใช้การแปลงระยะทางแบบสองทิศทาง (Bidirectional Distance Transform) และเลือกใช้ระยะทางแบบยูคลิดเบียนต์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงระยะทางแบบต่างๆที่รู้จักกันโดยทั่วไปและการแปลงระยะทางแบบยูคลิดเบียนต์เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่ดีที่สุดซึ่งได้รับการพิสูจน์มาแล้วจาก [1] ที่จะช่วยเพิ่มให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรมีความรวดเร็วขึ้น

5.2 การวัดระยะทาง (Distance Measures) [18]

ในงานประยุกต์หลายๆด้านจำเป็นต้องหาระยะทางระหว่างพิกเซลสองพิกเซล หรือระหว่างวัตถุกับตำแหน่งในภาพ แม้ว่าจะไม่มีวิธีที่ดีที่สุดในการหาค่าระยะทางในภาพดิจิทัลก็ตาม แต่ก็มีการให้คำจำกัดความของระยะทางในภาพดิจิทัลว่า สำหรับทุกพิกเซล p , q และ r ที่อยู่ภายในภาพ เมตริกซ์ระยะทาง (distance metric) จะต้องเป็นไปตามคุณสมบัติทั้งสามข้อข้างล่างนี้ทุกประการ

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

เมื่อกำหนดให้ $d(p,q)$ เป็นระยะทางระหว่างจุด p และ q เมตริกซ์ระยะทางมีอยู่หลายแบบ และที่ถูกนำมาใช้ในทางเรขาคณิตดิจิทัล (digital geometry) กันอย่างแพร่หลายได้แก่

5.2.1 ระยะทางยูคลิดีเนียนต์ (Euclidean Distance)

ระยะทางแบบนี้นิยมใช้ในการหาระยะทางระหว่างจุดสองจุด ลักษณะของระยะทางที่ได้จะมีลักษณะกระจายในทุกทิศทาง เมื่อกำหนดให้จุดสองจุดนั้นคือ p และ q ซึ่งมีพิกัด (i_1, j_1) และ (i_2, j_2) ตามลำดับ ค่าระยะทางแบบยูคลิดีเนียนต์ระหว่าง p และ q จะสามารถหาได้ตามสมการที่ 5.1

$$D_{Euclidean}(p, q) = D_{Euclidean}([i_1, j_1], [i_2, j_2]) = \sqrt{(i_1 - i_2)^2 + (j_1 - j_2)^2} \quad (5.1)$$

5.2.2 ระยะทางแบบซิตีบล็อก (City-Block Distance)

การหาระยะทางแบบนี้เป็นการพิจารณาจุดรอบข้าง 4 จุด เรียกว่า Four Neighborhood Connection ซึ่งจะเป็นการประมาณแบบหยาบๆของระยะทางยูคลิดีเนียนต์ แต่จะให้ระยะทางที่มากกว่า สมการการหาระยะทางแบบซิตีบล็อกเป็นดังสมการที่ 5.2 โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆเช่นเดิม

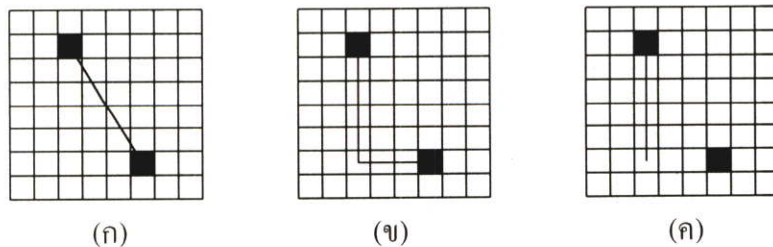
$$D_{City}(p, q) = |i_1 - i_2| + |j_1 - j_2| \quad (5.2)$$

5.2.3 ระยะทางแบบเชสบอร์ด (Chessboard Distance)

การวัดระยะทางแบบเชสบอร์ดนี้เป็นการพิจารณาจุดรอบข้าง 8 จุด เรียกว่า Eight Neighborhood Connection วิธีนี้ก็เป็นการประมาณค่าแบบหยาบๆอีกวิธีหนึ่งของระยะทางยูคลิดีเนียนต์เช่นกัน แต่ให้ระยะทางที่สั้นกว่า ซึ่งระยะทางระหว่างจุด p และ q เป็นไปตามสมการที่ 5.3

$$D_{Chessboard}(p, q) = \max(|i_1 - i_2|, |j_1 - j_2|) \quad (5.3)$$

เมื่อนำลักษณะการคำนวณของฟังก์ชันทั้งสามมาแสดงเปรียบเทียบการหาระยะทาง จะได้การวัดแต่ละแบบเป็นดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างลักษณะการวัดระยะทางแบบต่างๆ

ก) ยูคลิดีเนียนต์

ข) ซิตีบล็อก

ค) เชสบอร์ด

การแปลงระยะทางแบบยูคลิเดียนต์สองมิติแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน เมื่อกำหนดให้ $\{v_{r,c} \in \{0,1\} \mid 0 \leq r < n_r, 0 \leq c < n_c\}$ แทนอินพุตที่เป็นข้อมูลภาพแบบไบนารี, n_r เป็นจำนวนแถวในภาพ และ n_c เป็นจำนวนคอลัมน์ในภาพ

5.3.1 การแปลงครั้งที่ 1

ภาพอินพุต ($v_{r,c}$) จะถูกแปลงในลักษณะพิกเซลต่อพิกเซล โดยทำการคำนวณค่าของแต่ละพิกเซลตามสมการที่ 5.5 ได้ผลลัพธ์ เป็น $f_{r,c}$

$$f_{r,c} = \min \left\{ (c-j)^2, v_{r,j} \mid 0 \leq j < n_c \right\} \quad (5.5)$$

5.3.2 การแปลงครั้งที่ 2

ภาพเอาต์พุตที่ได้จากการแปลงครั้งที่ 1 ($f_{r,c}$) จะถูกนำมาเป็นภาพอินพุตในขั้นตอนนี้ และจะถูกแปลงในลักษณะคอลัมน์ต่อคอลัมน์ โดยทำการคำนวณค่าของแต่ละคอลัมน์ตามสมการที่ 5.6 ได้ผลลัพธ์เป็น $g_{r,c}$ ซึ่งเป็นค่าระยะทางแบบยูคลิเดียนต์สองมิตินั้นเอง

$$g_{r,c} = \min \left\{ f_{i,c} + (r-i)^2 \mid 0 \leq i < n_r \right\} \quad (5.6)$$

5.4 การแปลงระยะทางยูคลิเดียนต์สามมิติ (3D Euclidean Distance)

จากลักษณะการวัดระยะทางแบบยูคลิเดียนต์ดังรูปที่ 5.1ก) เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณแบบสามมิติก็จะได้สมการการหาระยะทางสามมิติแบบยูคลิเดียนต์ดังสมการที่ 5.7

$$D_{Euclidean}(u,v) = \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2 + (u_z - v_z)^2} \quad (5.7)$$

อัลกอริทึมของ Saito และ Toriwaki [20] ในการแปลงระยะทางสามมิติแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปนี้

เมื่อกำหนด $\{v_{b,r,c} \in \{0,1\} \mid 0 \leq b < n_b, 0 \leq r < n_r, 0 \leq c < n_c\}$ แทนอินพุตที่เป็นข้อมูลปริมาตรภาพสามมิติแบบไบนารี โดยที่ n_b เป็นจำนวนสไลซ์ที่จะนำมาสร้างภาพ, n_r เป็นจำนวนแถวในภาพ และ n_c เป็นจำนวนคอลัมน์ในภาพ

5.4.1 การแปลงครั้งที่ 1

ภาพอินพุท ($v_{b,r,c}$) จะถูกแปลงในลักษณะวีอกเซลต่อวีอกเซล โดยทำการคำนวณค่าแต่ละวีอกเซลได้จากสมการที่ 5.8 และได้เอาท์พุทเป็น

$$f_{b,r,c} = \min \{ (c-j)^2, v_{b,r,j} \mid 0 \leq j < n_c \} \quad (5.8)$$

5.4.2 การแปลงครั้งที่ 2

เอาท์พุทที่ได้จากการแปลงครั้งที่ 1 ($f_{b,r,c}$) จะถูกนำมาเป็นอินพุทของขั้นตอนนี้ และถูกแปลงในลักษณะคอลัมน์ต่อคอลัมน์ โดยการคำนวณค่าแต่ละคอลัมน์ทำได้ดังสมการที่ 5.9 ซึ่งมีเอาท์พุทเป็น

$$g_{b,r,c} = \min \{ f_{b,i,c} + (r-i)^2 \mid 0 \leq i < n_r \} \quad (5.9)$$

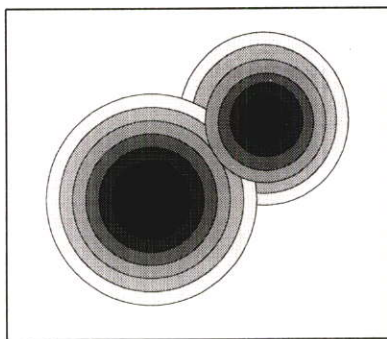
5.5.3 การแปลงครั้งที่ 3

เอาท์พุทที่ได้จากการแปลงครั้งที่ 2 ($g_{b,r,c}$) จะถูกนำมาเป็นอินพุทของการแปลงครั้งที่ 3 นี้ และจะถูกแปลงในลักษณะตามแนวแกนสไลซ์ ซึ่งการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ 5.10 ได้เอาท์พุทเป็น $h_{b,r,c}$ ซึ่งผลลัพธ์ก็คือค่าระยะทางสามมิติแบบยูคลิเดียนต้นนั่นเอง

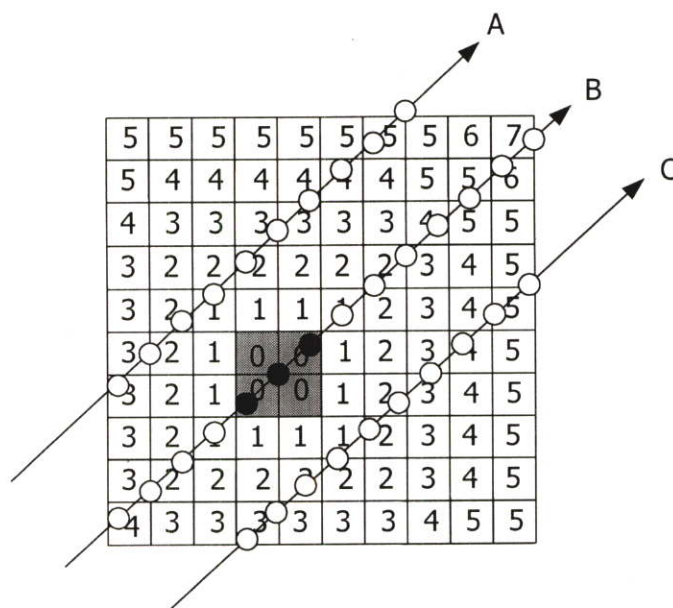
$$h_{b,r,c} = \min \{ g_{k,r,c} + (b-k)^2 \mid 0 \leq k < n_b \} \quad (5.10)$$

5.5 การใช้การแปลงระยะทางในการสร้างภาพเชิงปริมาตร [20], [21], [22]

การแปลงระยะทางของภาพที่ประกอบไปด้วยวัตถุหลายชิ้น ระยะทางที่คำนวณได้ที่พิกเซลตำแหน่งต่าง ๆ นั้นจะเป็นระยะทางที่น้อยที่สุดระหว่างวัตถุแต่ละชิ้น จากวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 1 นั้นคือเพื่อมุ่งเน้นพัฒนาให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทำได้เร็วขึ้น จึงได้เลือกใช้การแปลงระยะทางแบบยูคลิเดียนมาช่วยในการสร้างภาพเชิงปริมาตร โดยมีหลักการคร่าวๆว่า นำข้อมูลระยะทางนี้ไปเป็นข้อมูลให้แสงที่ฉายเข้าไปในปริมาตรกระโดดข้ามส่วนที่เป็นฉากหลังไป ซึ่งแต่เดิมนั้น [1], [21], [22] ได้กำหนดให้แสงกระโดดในทิศทางเดียว และในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มขั้นตอนให้แสงกระโดดเข้ามาในปริมาตรภาพทั้งสองด้าน ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า “การแปลงระยะทางแบบสองทิศทาง” นั่นเอง และจะอธิบายรายละเอียดให้ชัดเจนขึ้นต่อไป ลักษณะของระยะทางยูคลิเดียนที่แปลงได้จะมีลักษณะเป็นคิส์กซ้อนกันหลายชั้นเสมือนหุ้มวัตถุเอาไว้ ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ดิสก์หลายชั้นที่ซ้อนกันอยู่รอบวัตถุ



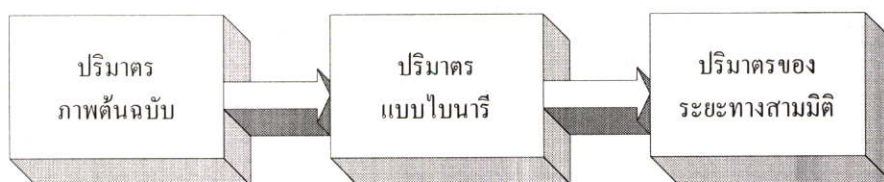
รูปที่ 5.5 การเดินทางของแสงภายในปริมาตรระยะทาง

การเดินทางของแสงภายในปริมาตรระยะทางซึ่งสร้างจากการแปลงระยะทางยูคลิดเดียนต์แสดงดังรูปที่ 5.5 ในการสร้างภาพสามมิติตามปกติ ลำแสง B จะต้องมีการคำนวณค่าต่างๆตามที่กล่าวถึงในบทที่ 4 ทุกๆแฉกเปิดของแสงตลอดแนวลำแสงเป็นจำนวน 14 ชั้นจึงจะสำเร็จในหนึ่งแนวลำแสง สังเกตว่าลำแสง B จะเดินทาง 4 ชั้นก่อนที่จะถึงวัตถุ เมื่อนำการแปลงระยะทางแบบทวิศทางเดียว [1] มาช่วย ก็จะทำให้ลำแสง B ซึ่งเคยเดินทางถึง 4 ชั้นก่อนเข้าถึงวัตถุมาเป็นเดินทางไม่ถึง 4 ชั้นโดยขึ้นอยู่กับตัวเลขของค่าระยะทาง ตามรูปเมื่อลำแสง B วิ่งเข้าหาปริมาตรก็จะอ่านข้อมูลระยะทางออกมาซึ่งคือ 4 แสงจะกระโดดข้ามการเดินทางตามปกติออกไป 4 ชั้น พบว่าเมื่อแสงกระโดดข้ามจุดแฉกเปิดอื่นตามค่าระยะทางที่อ่านได้แล้วจะถึงบริเวณที่เป็นวัตถุพอดี จากนั้นจึงเริ่มทำการคำนวณตามขั้นตอนต่างๆในการสร้างภาพ นั่นคือใช้การเดินทางเพียง 1 ชั้นก็สามารถเข้าถึงวัตถุได้ พิจารณาที่แฉกเปิดสุดท้ายก่อนที่จะออกจากวัตถุ สังเกตว่าลำแสง B จะต้องกระโดดอีกหลายครั้งจึงจะออกจากปริมาตร งานวิจัยนี้ได้พัฒนาการกระโดดของลำแสงส่วนนี้เอง ตามที่กล่าว

ข้างต้นแล้วทำให้แสงกระโดดเข้ามาในปริมาตรทั้งสองข้างก็หมายความว่า ให้ลำแสงกระโดดจากด้านหลังปริมาตรเข้ามาก่อนเพื่อหาขอบเขตของวัตถุ แล้วจึงให้กระโดดจากด้านหน้าเข้าไปตามเดิม ทั้งนี้ก็เพื่อจะไม่ให้เสียเวลาที่จะค่อยๆกระโดดออกจากปริมาตรนั่นเอง ตามรูปลำแสง B จะวิ่งเข้ามาจากด้านหลังของปริมาตร ก็จะอ่านค่าระยะทางซึ่งเท่ากับ 7 แล้วจะกระโดดข้ามการเดินทางไป 7 ขึ้น จะเห็นว่าเป็นจุดที่เป็นขอบของวัตถุพอดี จากนั้นให้ใช้การกระโดดของลำแสงจากด้านหน้าตามเดิม และเมื่อเดินทางไปถึงแหลมเปิดสุดท้ายของวัตถุ ก็จะพบว่าเป็นจุดเดียวกันกับแหลมเปิดที่พบว่าเป็นขอบแล้วในส่วนที่แสงกระโดดมาจากด้านหลังนั่นเอง และเมื่อนับจำนวนขั้นการเดินทางของลำแสงด้วยวิธีการแปลงระยะทางแบบสองทิศทางนี้ ก็จะทราบว่าใช้การเดินทางของแสงเพียงทั้งหมด 4 ขั้น ในขณะที่กรณีที่ใช้การแปลงระยะทางแบบทิศทางเดียว จะใช้การเดินทางของแสงทั้งหมด 7 ขั้น และกรณีที่เป็นการสร้างภาพแบบดั้งเดิม จะใช้การเดินทางของแสงทั้งหมดถึง 14 ขั้น

ส่วนลำแสง A ตามรูปถ้าใช้การสร้างภาพแบบวิธีดั้งเดิม แสงก็จะเดินทาง 10 ขั้นจึงจะออกจากปริมาตร แต่ถ้าใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางเข้ามาช่วย จะทำให้แสงเดินทางเพียง 3 ครั้งก็หลุดออกจากปริมาตร ในทำนองเดียวกันแนวลำแสง C ที่ใช้วิธีการดั้งเดิมก็จะเดินทาง 10 ขั้นจึงจะหลุดออกจากปริมาตร เมื่อใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางก็จะเดินทางเพียง 3 ขั้นเท่านั้น

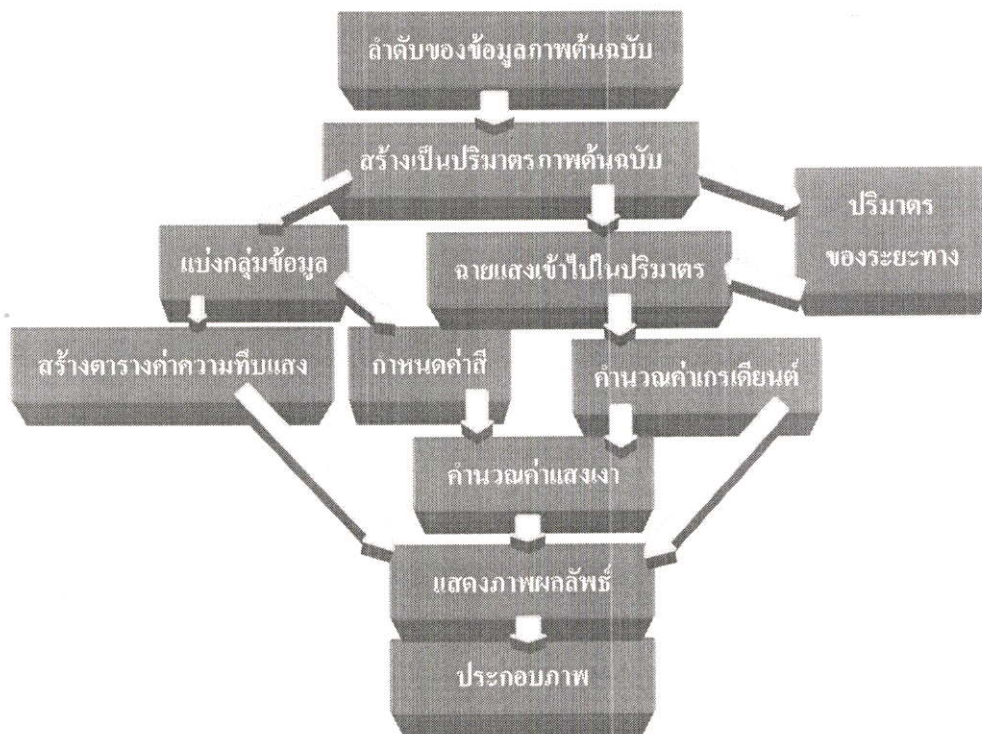
การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การแปลงระยะทางแบบทิศทาง ก็จะมีขั้นตอนการแปลงระยะทางเช่นเดียวกับการเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงด้วยการแปลงระยะทางแบบทิศทางเดียว กล่าวคือปริมาตรภาพจะถูกนำมาทำการประมวลผลก่อนเพื่อสร้างปริมาตรของระยะทางระหว่างวัตถุถึงโปร่งแสงกับฉากหลังภายในภาพโดยใช้การแปลงระยะทางสามมิติ ปริมาตรของระยะทางนี้มีส่วนสำคัญมากเนื่องจากมันจะถูกใช้เป็นข้อมูลสำหรับให้แสงกระโดดข้ามบริเวณที่เป็นฉากหลัง และเข้าถึงบริเวณที่เป็นวัตถุถึงโปร่งแสงในปริมาตรได้เร็วขึ้นดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ขั้นตอนการสร้างปริมาตรของระยะทางดังรูปที่ 5.6 เริ่มจากการนำปริมาตรภาพต้นฉบับมาทำการสร้างเป็นปริมาตรภาพแบบไบนารีโดยให้ส่วนที่เป็นฉากหลังมีค่าเป็น 0 และส่วนที่เป็นบริเวณวัตถุให้มีค่าเป็น 1 จากนั้นนำปริมาตรนี้ไปทำการแปลงระยะทางสามมิติ



รูปที่ 5.6 ขั้นตอนการสร้างปริมาตรของระยะทาง

กระบวนการการสร้างภาพเชิงปริมาตรโดยใช้การแปลงระยะทางสองทิศทาง เริ่มจากการนำชุดข้อมูลภาพทั้งหมดมาสร้างเป็นปริมาตรเรียกว่าปริมาตรภาพต้นฉบับ จากนั้นทำการแบ่ง

กลุ่มข้อมูลภาพต้นฉบับเพื่อสร้างตารางค่าความทึบแสงและกำหนดค่าสีของกลุ่มข้อมูลที่ทำกรแบ่งนั้น การกำหนดค่าความทึบแสงนี้จะกำหนดให้ค่าความทึบแสงของกลุ่มข้อมูลที่เป็นฉากหลังหรืออากาศมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือให้มีความโปร่งแสงโดยสมบูรณ์ ในส่วนของการประกอบภาพจะเป็นการฉายแสงเข้าไปในปริมาตร เพื่อทำการคำนวณหาส่วนที่มองเห็นได้ แสงจะถูกส่งออกเป็นระยะทางเท่าๆกัน และในการเดินทางของมันจะใช้ข้อมูลภายในปริมาตรของระยะทางเพื่อกระโดดข้ามข้อมูลที่เป็นฉากหลังทั้งด้านหน้าและด้านหลังของปริมาตรไป ในการติดตามแสงแต่ละชั้นจะมีการคำนวณค่าเกรเดียนต์ เพื่อใช้คำนวณการให้แสงเงาร่วมกับสีที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะประกอบภาพโดยอาศัยข้อมูลจากค่าเกรเดียนต์, ความเข้มแสงที่ผ่านการให้แสงเงามาแล้ว และค่าความทึบแสงมาเป็นพารามิเตอร์ในการคำนวณ



รูปที่ 5.7 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

5.6 สรุป

การวัดระยะทางดิจิทัลมีอยู่หลายแบบซึ่งแต่ละแบบก็จะมีวิธีการวัดที่แตกต่างกันไป แต่วิธีหนึ่งที่เหมาะสมที่จะใช้ในการวัดระยะทางระหว่างจุดสองจุดก็คือระยะทางยูคลิเดียนต์ ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าได้นำการแปลงระยะทางมาใช้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตร ก็เพื่อกำจัดขั้นตอนการคำนวณบริเวณที่เปล่าประโยชน์ทิ้งไปซึ่งหมายถึงบริเวณที่เป็นฉากหลังของภาพหรืออากาศซึ่งจะถูกกำหนดให้เป็นบริเวณที่มีความโปร่งแสงโดยสมบูรณ์นั่นเอง

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

6.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็น การทดลองและผลการทดลองสร้างภาพเชิงปริมาตรกับชุดข้อมูลภาพตัดขวางทางการแพทย์ในมุมมองต่างๆ ซึ่งในการทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบขบวนการสร้างภาพด้วยอัลกอริทึมที่กล่าวมาแล้วทั้งสาม ซึ่งได้แก่ วิธีสร้างภาพเชิงปริมาตรแบบดั้งเดิม [11], วิธีสร้างภาพที่อาศัยค่าระยะทางจากการแปลงโดยให้แสงเดินทางทิศทางเดียว [1] ซึ่งในที่นี้จะขอเรียกแทนสั้นๆว่าวิธีการสร้างภาพด้วยการแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีสร้างภาพที่อาศัยค่าระยะทางจากการแปลงโดยให้แสงเดินทางสองด้านตามที่นำเสนอ ซึ่งในที่นี้จะขอเรียกแทนสั้นๆว่าวิธีการสร้างภาพด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกจะเปรียบเทียบลักษณะภาพและเวลาที่ใช้ในรูปของกราฟและตารางระหว่างการสร้างภาพแบบดั้งเดิมกับการสร้างแบบใช้แสงสองทิศทาง และอีกส่วนเป็นการเปรียบเทียบลักษณะภาพและเวลาที่ใช้ในรูปของกราฟและตารางระหว่างการสร้างแบบใช้แสงทิศทางเดียวกับการสร้างภาพแบบใช้แสงสองทิศทาง นอกจากนี้จะมีการแสดงความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์เวลาที่ลดลงในการสร้างภาพของอัลกอริทึมเหล่านี้กับภาพที่มีลักษณะต่างกันด้วย รวมถึงผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อเวลาในการสร้างภาพด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

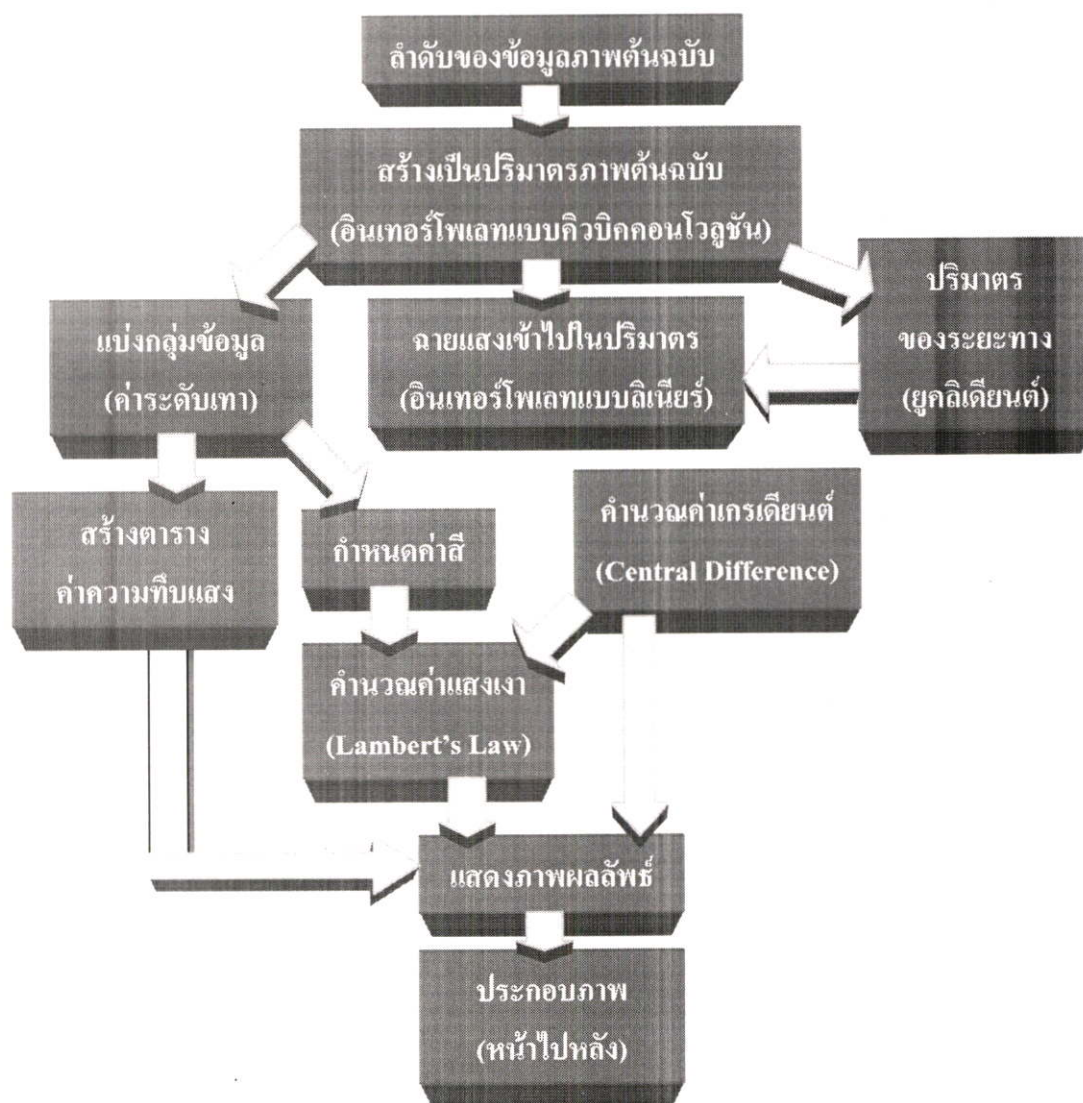
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ใช้ Visual C++ เป็นตัวคอมพิวเตอร์บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่มีตัวประมวลผลกลางคือ AMD 1GHz. และมีหน่วยความจำ 128 MB. โดยทดลองกับชุดภาพตัดขวางในระนาบแอ็กเซียล (Axial) ที่ได้จากเครื่อง CT ซึ่งมีค่าระดับเทาเท่ากับ 256 (8 บิต) ขนาด 256x256 จุดภาพ ของศีรษะเด็กจำนวน 80 สไลซ์ และบริเวณลำคอหรือโทรอยด์จำนวน 83 สไลซ์

6.2 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอนี้ สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมที่เจาะจงวิธีการที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนได้ดังรูปที่ 6.1

จากบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 6.1 ในขั้นตอนการสร้างภาพต้นฉบับนั้นได้แสดงวิธีการที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนไว้อย่างชัดเจน นั่นคือชุดภาพข้อมูลที่น่ามาทดลองมีจำนวนน้อย เมื่อนำมาสร้างภาพเชิงปริมาตรจะทำให้ภาพที่ได้มีลักษณะไม่สมดุลง่ายกับขนาดภาพ ดูแล้วได้รูปทรงที่ไม่สวยงาม จึงต้องมีการอินเทอร์โพลค่าเข้าไปเพื่อให้ได้รูปทรงที่สามารถให้รายละเอียดได้ดีขึ้น ซึ่งการอินเทอร์โพลค่าที่เลือกใช้ในขั้นตอนนี้เป็นแบบคิวบิกคอนโวลูชันเพราะให้ความถูกต้องของข้อมูลมากกว่า

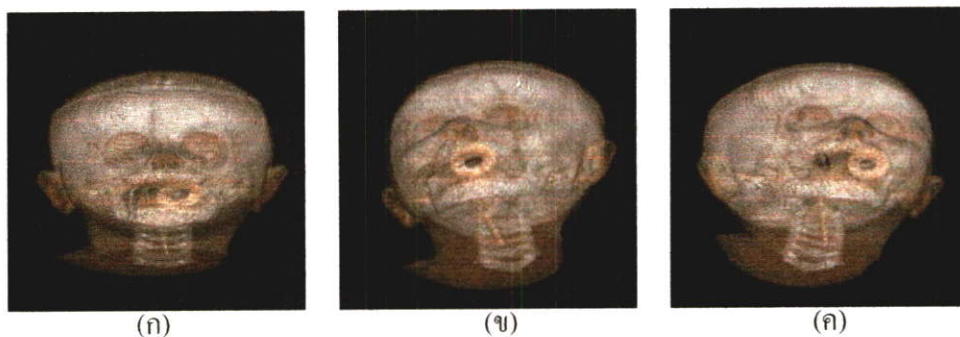
วิธีอื่น ส่วนขั้นตอนการฉายแสงนั้น เมื่อมีการมองภาพในมุมมองที่ต่างจากกัน ทำให้แฉมเปิดของแสงไม่ตรงกับแฉมเปิดของภาพ จึงต้องมีการอินเทอร์อินเทอร์โพลเพื่อให้ได้ค่าข้อมูลที่ถูกต้องตามหลักการที่กล่าวไปในบทก่อนหน้าแล้ว และได้เลือกใช้การอินเทอร์โพลแบบลิเนียร์เนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการอินเทอร์โพลแบบคิวบิกคอนโวลูชัน



รูปที่ 6.1 กระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

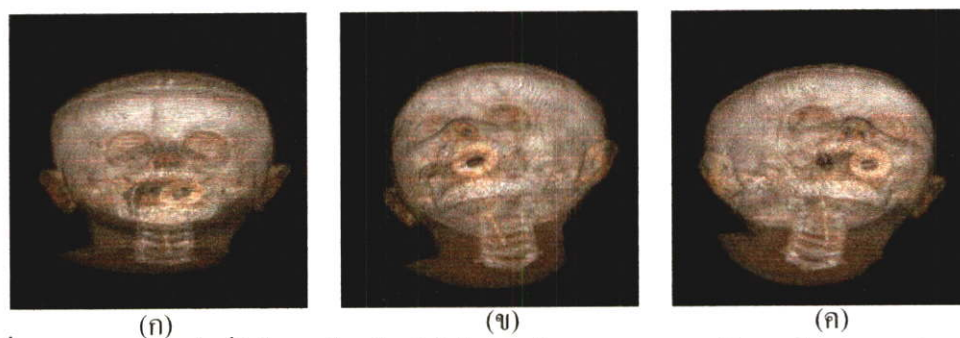
6.3 การสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ

การทดลองในข้อนี้เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของภาพที่ได้จากวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางว่าจะมีความแตกต่างจากภาพที่สร้างจากวิธีดั้งเดิมหรือไม่ และมีการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพในมุมมองต่างๆของวิธีทั้งสองกับชุดข้อมูลภาพศีรษะเด็กและชุดข้อมูลภาพไทรอยด์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ที่ต่างกัน ได้ผลดังนี้



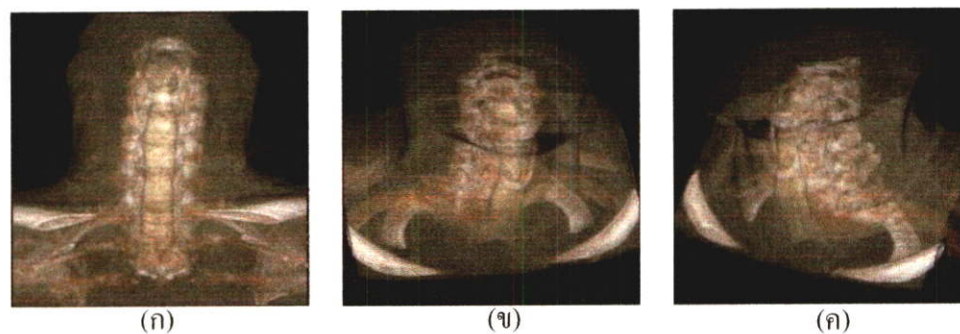
รูปที่ 6.2 ภาพศีรษะเด็กที่ได้จากสร้างด้วยวิธีดั้งเดิมในมุมมองต่างๆ

$$(ก) \theta = -15, \phi = 0 \quad (ข) \theta = -30, \phi = -20 \quad (ค) \theta = -30, \phi = 15$$



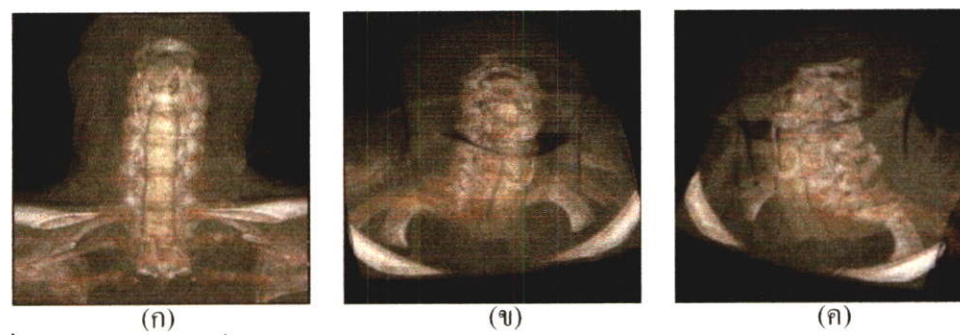
รูปที่ 6.3 ภาพศีรษะเด็กที่ได้จากสร้างด้วยวิธีใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ

$$(ก) \theta = -15, \phi = 0 \quad (ข) \theta = -30, \phi = -20 \quad (ค) \theta = -30, \phi = 15$$



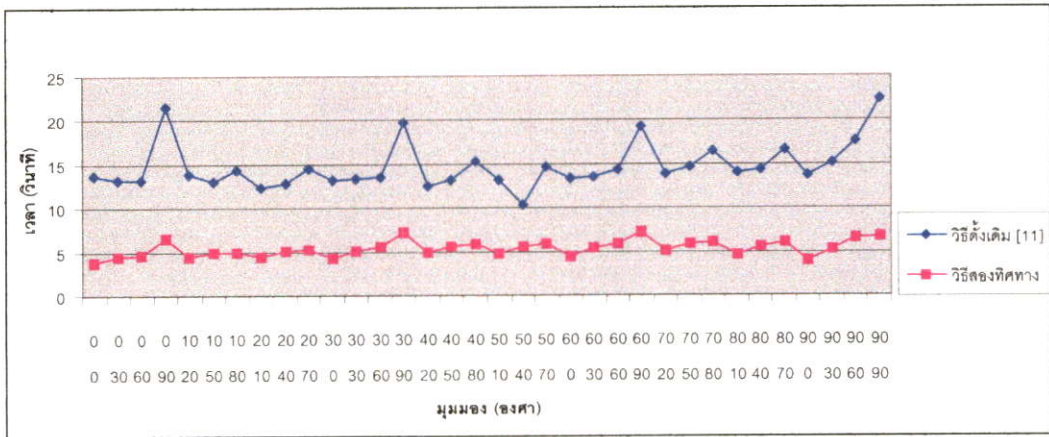
รูปที่ 6.4 ภาพทรวงอกที่ได้จากสร้างด้วยวิธีดั้งเดิมในมุมมองต่างๆ

$$(ก) \theta = -30, \phi = 0 \quad (ข) \theta = 30, \phi = 15 \quad (ค) \theta = 25, \phi = -30$$

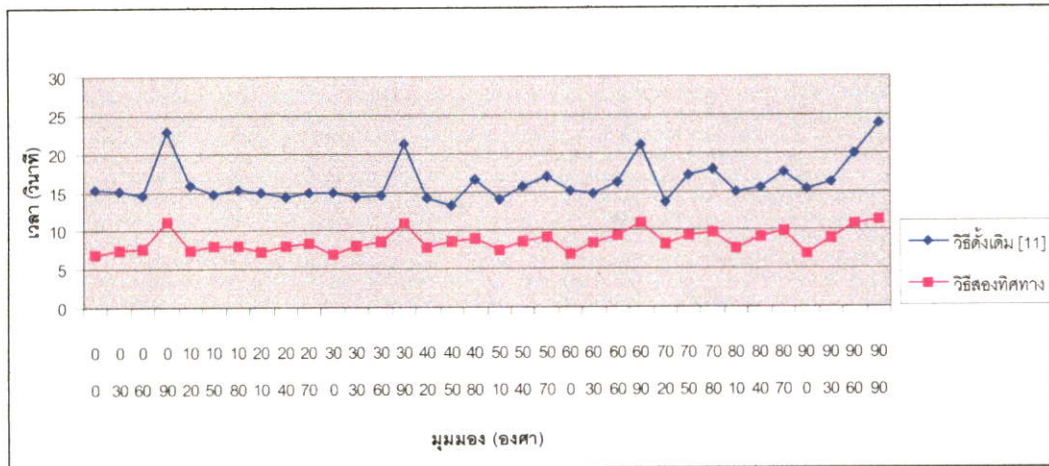


รูปที่ 6.5 ภาพทรวงอกที่ได้จากสร้างด้วยวิธีใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ

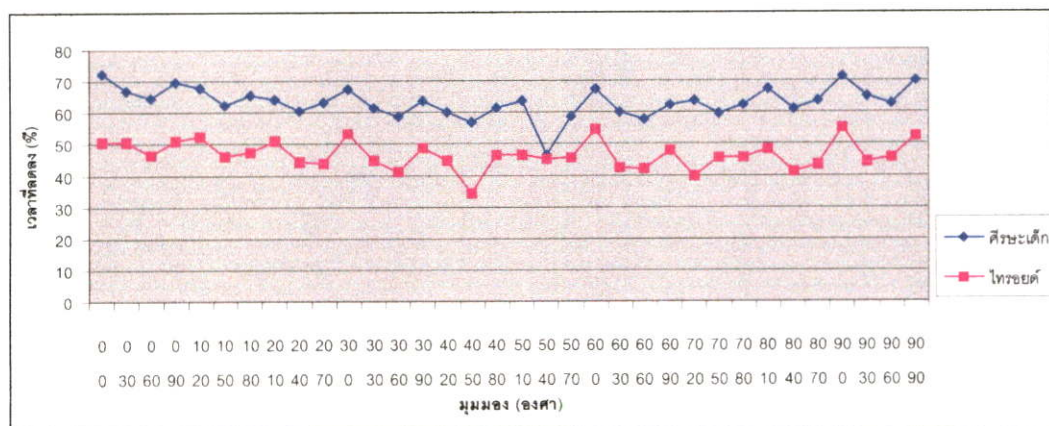
$$(ก) \theta = -30, \phi = 0 \quad (ข) \theta = 30, \phi = 15 \quad (ค) \theta = 25, \phi = -30$$



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพสี่ระยะเด็กในมุมมองต่างๆของวิธีดั้งเดิมและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพไพโรยด์ในมุมมองต่างๆของวิธีดั้งเดิมและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงเวลาที่ลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อใช้วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางแทนการใช้วิธีดั้งเดิมในการสร้างภาพสี่ระยะเด็กและไพโรยด์ในมุมมองต่างๆ

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรในมุมมองต่างๆด้วยวิธีดั้งเดิมและ
ใช้การแปลงระยะทางสองทิศทาง

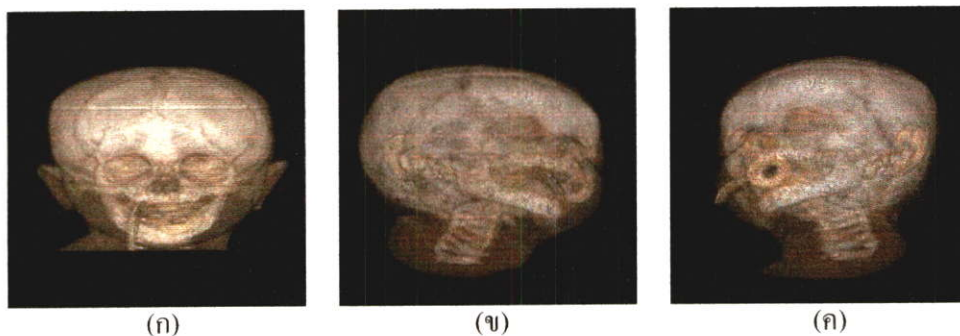
ภาพ	มุมมอง	เวลา (วินาที)		เปอร์เซ็นต์ ที่ลดลง (%)
		วิธีดั้งเดิม [11]	วิธีแปลงระยะทางสองทิศทาง	
ศรียะเด็ก 80 สไลซ์	$\phi = 0, \theta = 0$	13.58	3.77	72.23%
	$\phi = 20, \theta = 40$	12.79	5.06	60.44%
	$\phi = 50, \theta = 10$	13.19	4.77	63.84%
ไทรอยด์ 83 สไลซ์	$\phi = 0, \theta = 0$	15.27	6.95	54.40%
	$\phi = 20, \theta = 40$	14.29	7.96	44.29%
	$\phi = 60, \theta = 30$	14.66	8.45	42.36%

จากผลการทดลอง จะเห็นว่าภาพที่ได้จากการสร้างภาพด้วยวิธีดั้งเดิมกับภาพที่สร้างจากวิธีใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางดังรูปที่ 6.2-6.5 นั้น เป็นภาพที่เหมือนกัน ซึ่งได้ทดสอบง่าย ๆ โดยการนำจุดพิกเซลที่ตำแหน่งเดียวกันบนภาพที่ได้จากทั้งสองวิธีมาลบล้างกัน ปรากฏว่าได้เท่ากับศูนย์ นั่นหมายความว่าภาพทั้งสองมีความเหมือนกันทุกประการ นั่นคือวิธีการสร้างภาพด้วยการใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางนี้ยังคงความถูกต้องของภาพเมื่อเทียบกับการสร้างด้วยอัลกอริธึมดั้งเดิมไว้ตามวัตถุประสงค์

ส่วนกราฟในรูปที่ 6.6-6.8 นั้นจะแสดงความแตกต่างทางด้านเวลา โดยกราฟรูปที่ 6.6 เป็นการแสดงเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพศรียะเด็กด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอและกราฟในรูปที่ 6.7 แสดงเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพไทรอยด์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่นำเสนอ จะเห็นได้ว่าวิธีใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางสามารถสร้างภาพได้เร็วกว่าวิธีดั้งเดิมเป็นอย่างมาก เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วสามารถช่วยลดเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรในมุมมองต่างๆได้เฉลี่ยประมาณ 45%-65% ซึ่งนับว่าการสร้างภาพโดยการอาศัยข้อมูลระยะทางที่ได้จากแปลงโดยให้แสงกระโดดเข้าไปในปริมาตรทั้งด้านหน้าและด้านหลังช่วยให้การสร้างภาพทำได้รวดเร็วขึ้นตรงตามวัตถุประสงค์เช่นกัน ส่วนกราฟในรูปที่ 6.8 จะแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ลดลงจากการใช้วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางแทนการใช้วิธีดั้งเดิมระหว่างการสร้างภาพศรียะเด็กเทียบกับภาพไทรอยด์ จะเห็นว่าภาพศรียะเด็กมีเปอร์เซ็นต์เวลาที่ลดลงมากกว่าภาพไทรอยด์ ทั้งนี้ก็เนื่องจากภาพศรียะเด็กมีบริเวณที่เป็นอากาศมากกว่าและภาพไทรอยด์มีบริเวณที่เป็นวัตถุมากกว่าจึงต้องใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า และจากตารางที่ 6.1 เป็นการแสดงเวลาเป็นตัวเลขในหน่วยวินาทีที่ใช้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรในมุมมองต่างๆจะเห็นว่าการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางสามารถทำได้เร็วกว่าวิธีดั้งเดิม

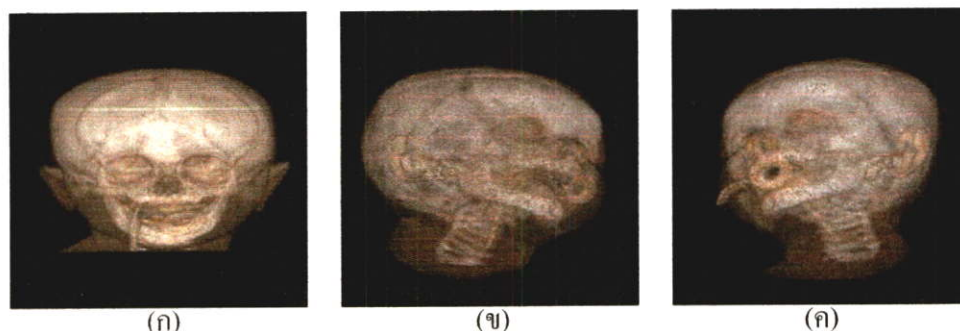
6.4 การสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางที่น่าเสนอ

การทดลองในข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบลักษณะของภาพผลลัพธ์และเวลาเช่นเดียวกัน แต่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีแปลงระยะทางสองทิศทาง ทั้งนี้เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 โดยการทดสอบนั้นจะทำกับชุดข้อมูลภาพศีรษะเด็กและชุดข้อมูลภาพไทรอยด์เช่นกัน ซึ่งได้ผลดังนี้



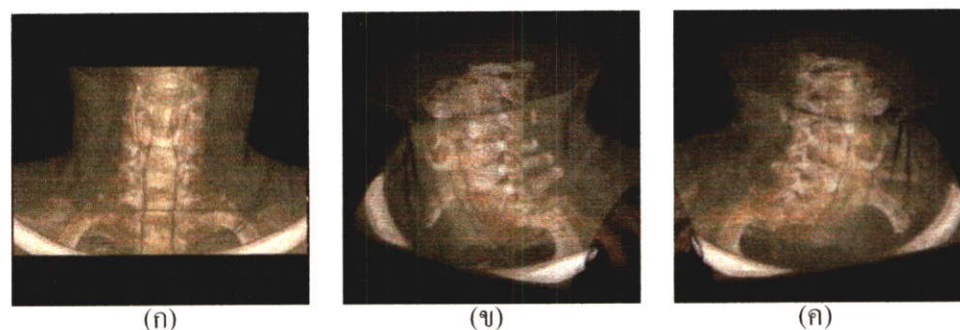
รูปที่ 6.9 ภาพศีรษะเด็กที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวในมุมมองต่างๆ

$$(ก)\theta = 0, \phi = 0 \quad (ข)\theta = -25, \phi = 45 \quad (ค)\theta = -25, \phi = -40$$



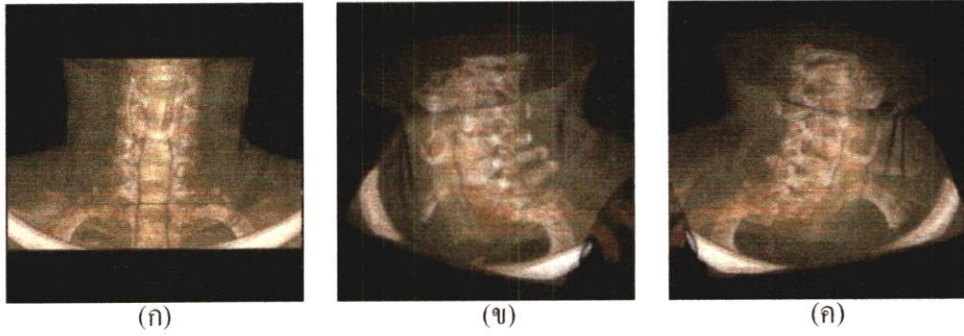
รูปที่ 6.10 ภาพศีรษะเด็กที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ

$$(ก)\theta = 0, \phi = 0 \quad (ข)\theta = -25, \phi = 45 \quad (ค)\theta = -25, \phi = -40$$



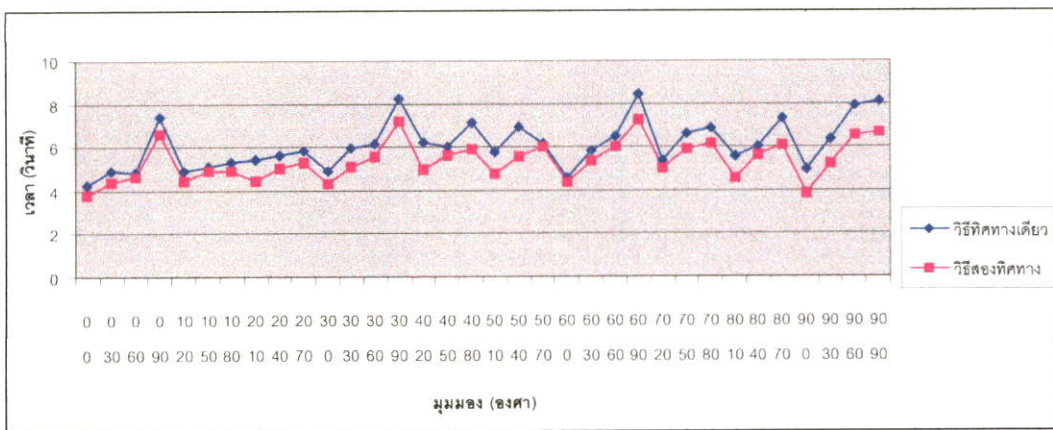
รูปที่ 6.11 ภาพไทรอยด์ที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวในมุมมองต่างๆ

$$(ก)\theta = 0, \phi = 0 \quad (ข)\theta = 20, \phi = -40 \quad (ค)\theta = 20, \phi = 30$$

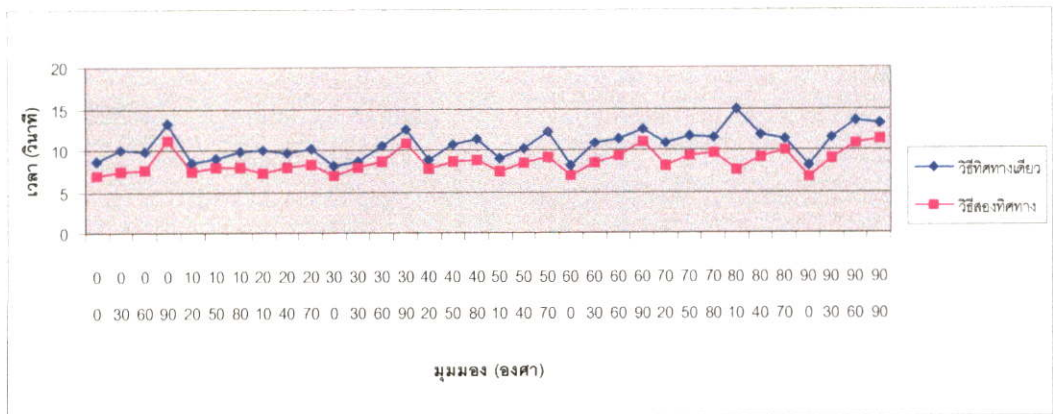


รูปที่ 6.12 ภาพโทรอยด์ที่ได้จากสร้างด้วยวิธีแปลงระยะทางสองทิศทางในมุมมองต่างๆ

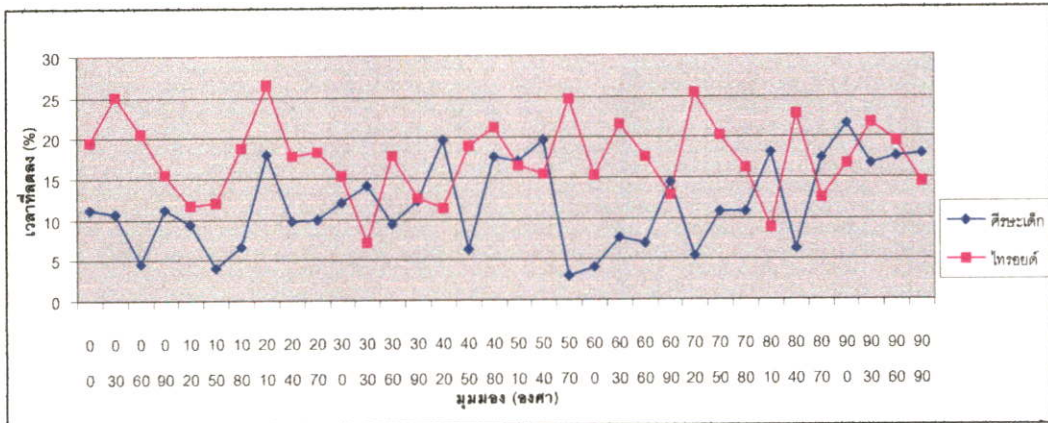
(ก) $\theta = 0, \phi = 0$ (ข) $\theta = 20, \phi = -40$ (ค) $\theta = 20, \phi = 30$



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพศีรษะเด็กในมุมมองต่างๆของวิธีการแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่น่าเสนอ



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงเวลาเป็นวินาทีในการสร้างภาพโทรอยด์ในมุมมองต่างๆของวิธีการแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางที่น่าเสนอ



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงเวลาที่ลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อใช้วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางแทนการใช้วิธีทิศทางเดียวในการสร้างภาพสี่เหลี่ยมและไทรอยด์ในมุมมองต่างๆ

ตารางที่ 6.2 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรในมุมมองต่างๆด้วยวิธีการใช้การแปลงระยะทางทิศทางเดียวและสองทิศทาง

ภาพ	มุมมอง	เวลา (วินาที)		เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง (%)
		ทิศทางเดียว [1]	สองทิศทาง	
สี่เหลี่ยม 80 สไลซ์	$\phi = 0, \theta = 0$	4.59	3.77	11.12%
	$\phi = 20, \theta = 40$	5.61	5.06	9.80%
	$\phi = 50, \theta = 10$	5.75	4.77	17.04%
ไทรอยด์ 83 สไลซ์	$\phi = 0, \theta = 0$	8.62	6.95	19.47%
	$\phi = 20, \theta = 40$	9.69	7.96	17.85%
	$\phi = 60, \theta = 30$	10.78	8.45	21.60%

ผลการทดลองพบว่า ภาพที่ได้จากวิธีทั้งสองเป็นภาพที่เหมือนกันทุกประการ ซึ่งใช้การทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่แล้ว และเมื่อนำเวลาในการสร้างมาพล็อตเป็นกราฟ นั่นคือ กราฟรูปที่ 6.13 จะแสดงเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพสี่เหลี่ยมด้วยวิธีการแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทาง และกราฟในรูปที่ 6.14 แสดงเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพไทรอยด์ด้วยวิธีการแปลงระยะทางทิศทางเดียวและวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทาง จะเห็นได้ว่าวิธีให้แสงกระโดดเข้าหาปริมาตรทั้งสองทิศทางสร้างภาพได้เร็วกว่าวิธีให้แสงกระโดดเข้าหาปริมาตรทิศทางเดียว เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วสามารถช่วยให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทำได้เร็วขึ้นเฉลี่ยประมาณ 10-20% ส่วนกราฟในรูปที่ 6.15 จะแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ลดลงจากการใช้วิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางแทนการใช้วิธีการแปลงระยะทางทิศทางเดียวกับการสร้าง

ภาพสี่เหลี่ยมและภาพไทรอยด์ จากกราฟได้แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ลดลงในการสร้างภาพไทรอยด์มีมากกว่าการสร้างภาพสี่เหลี่ยม ทั้งนี้เป็นเพราะในภาพไทรอยด์มีส่วนที่แสงจะกระโดดไปจนสุดลำเส้นออกจากปริมาตรมากกว่าภาพสี่เหลี่ยมส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากการกระโดดเข้ามาทางด้านหลังปริมาตร จึงทำให้ภาพไทรอยด์มีเปอร์เซ็นต์เวลาที่ลดลงสูงกว่าภาพสี่เหลี่ยม

6.5 เปรียบเทียบเวลาทั้งหมดในการสร้างภาพมุมมองต่างๆระหว่างวิธีดั้งเดิมและวิธีแปลงระยะทางสองทิศทาง

การทดลองนี้ทำเพื่อทดสอบว่าในวิธีสร้างภาพด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง เมื่อนำเวลาในการสร้างปริมาตรระยะทางรวมกับเวลาในการสร้างภาพแล้ว จะมีค่าเท่ากับการมองภาพด้วยวิธีดั้งเดิมเป็นจำนวนกี่ครั้ง หรือกล่าวให้เข้าใจง่ายๆ ก็จะต้องมองภาพด้วยวิธีดั้งเดิมที่มุมมองต่างๆกันกี่ครั้ง วิธีสร้างภาพด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทางจึงจะมีประโยชน์

ตารางที่ 6.3 เวลาทั้งหมดในกระบวนการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง

ชุดข้อมูลภาพ	เวลาในการสร้างปริมาตรระยะทาง	
สี่เหลี่ยม (80 สไลซ์)	5.67	นาที
ไทรอยด์ (83 สไลซ์)	6.01	นาที

ตารางที่ 6.4 เวลาที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการการสร้างภาพสี่เหลี่ยมมุมมองต่างๆด้วยวิธีดั้งเดิม

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8
มุมมอง (ϕ, θ)	(0,0)	(0,30)	(0,60)	(0,90)	(10,20)	(10,50)	(10,80)	(20,10)
เวลา (วินาที)	13.59	13.19	13.10	21.58	13.89	13.0	14.25	12.39
ครั้งที่	9	10	11	12	13	14	15	16
มุมมอง (ϕ, θ)	(20,40)	(20,70)	(30,0)	(30,30)	(30,60)	(30,90)	(40,20)	(40,50)
เวลา (วินาที)	12.79	14.42	13.16	13.25	13.42	19.81	12.52	13.17
ครั้งที่	17	18	19	20	21	22	23	24
มุมมอง (ϕ, θ)	(40,80)	(50,10)	(50,40)	(50,70)	(60,0)	(60,30)	(60,60)	(60,90)
เวลา (วินาที)	15.35	13.19	10.44	14.59	13.43	13.48	14.25	19.22
รวมเวลาในการสร้างภาพมุมมองต่างๆ						5.69	นาที	

ตารางที่ 6.5 เวลาที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการการสร้างภาพโทรยด์มุมมองต่างๆด้วยวิธีดั้งเดิม

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8
มุมมอง (ϕ, θ)	(0,0)	(0,30)	(0,60)	(0,90)	(10,20)	(10,50)	(10,80)	(20,10)
เวลา (วินาที)	15.28	15.11	14.45	22.95	15.83	14.65	15.29	14.93
ครั้งที่	9	10	11	12	13	14	15	16
มุมมอง (ϕ, θ)	(20,40)	(20,70)	(30,0)	(30,30)	(30,60)	(30,90)	(40,20)	(40,50)
เวลา (วินาที)	14.29	14.87	14.85	14.39	14.58	21.34	14.16	13.16
ครั้งที่	17	18	19	20	21	22	23	-
มุมมอง (ϕ, θ)	(40,80)	(50,10)	(50,40)	(50,70)	(60,0)	(60,30)	(60,60)	-
เวลา (วินาที)	16.67	14.01	15.57	16.87	15.12	14.66	16.17	-
รวมเวลาสร้างภาพมุมมองต่างๆ						5.99 นาที		

จากผลการทดลอง ตารางที่ 6.3 เป็นเวลาในการสร้างปริมาตรระยะทางของชุดข้อมูลภาพศีรษะเด็กและโทรยด์ เพื่อนำค่าระยะทางที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในขั้นตอนการสร้างภาพต่อไป ส่วนตารางที่ 6.4 และ 6.5 เป็นเวลารวมในการสร้างภาพด้วยวิธีดั้งเดิมหลายๆมุมมอง จะพบว่าเวลาในการสร้างปริมาตรระยะทางของชุดข้อมูลภาพศีรษะเด็กใช้เวลา 5.67 นาที และเวลานี้จะประมาณได้ว่าเท่ากับการมองภาพด้วยวิธีดั้งเดิมในมุมมองต่างๆจำนวน 24 มุมมอง และเวลาในการสร้างปริมาตรระยะทางของชุดข้อมูลภาพโทรยด์ใช้เวลา 6.01 นาที ก็จะประมาณได้ว่าเท่ากับการมองภาพด้วยวิธีดั้งเดิมในมุมมองต่างๆจำนวน 23 มุมมอง นั่นคือจะต้องมองภาพด้วยวิธีดั้งเดิมอย่างน้อย 23-24 มุมมอง จึงจะทำให้วิธีการสร้างภาพด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทางมีประโยชน์

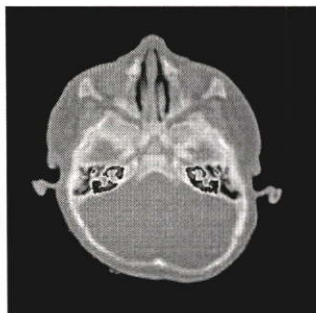
6.6 เปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีใช้การแปลงระยะทางสองทิศ

ทางระหว่างชุดข้อมูลภาพที่มีสัญญาณรบกวน (Noise) และไม่มีสัญญาณรบกวน

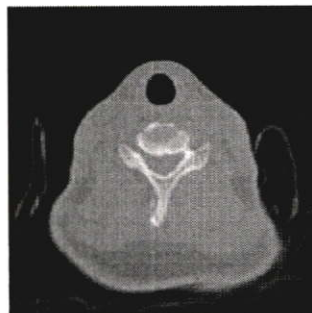
ชุดข้อมูลภาพที่นำมาใช้ในการทดลองก่อนหน้านี้ทั้งหมดถือได้ว่าเป็นภาพที่ไม่มีสัญญาณรบกวน เพราะได้จากเครื่อง CT ซึ่งมีความละเอียดสูง ส่วนการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าเมื่อชุดข้อมูลภาพมีสัญญาณรบกวนแล้ว เวลาในการสร้างภาพจะแตกต่างจากชุดข้อมูลภาพที่ไม่มีสัญญาณรบกวนมากหรือน้อยเพียงไร

สัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปในชุดข้อมูลเป็นสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian Noise) โดยมีค่าเฉลี่ย (Mean : \bar{X}) เท่ากับศูนย์ และมีการเปลี่ยนค่าความแปรปรวน (Variance : V) หลายๆค่า

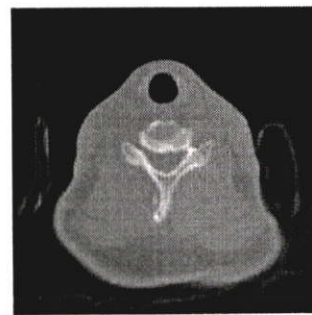
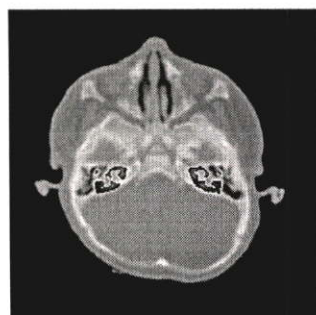
ศีรษะเด็ก



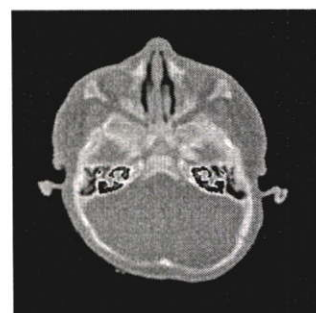
ไทรอยด์



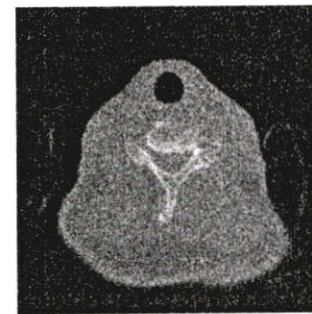
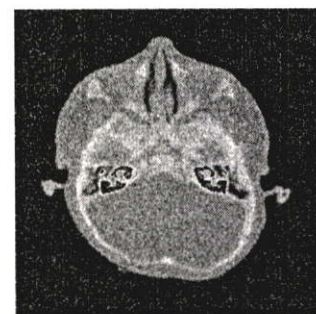
(ก) ภาพต้นฉบับ ไม่มีสัญญาณรบกวน



(ข) มีสัญญาณรบกวน $V = 0.0001$

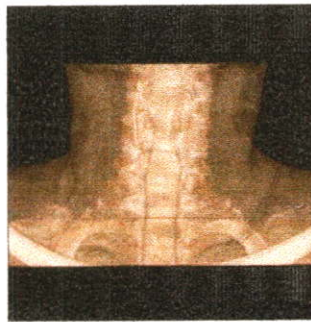


(ค) มีสัญญาณรบกวน $V = 0.001$

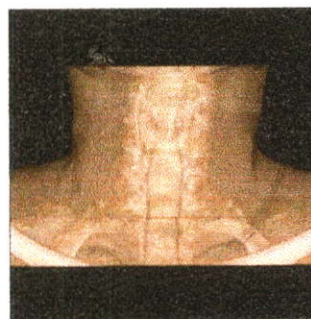
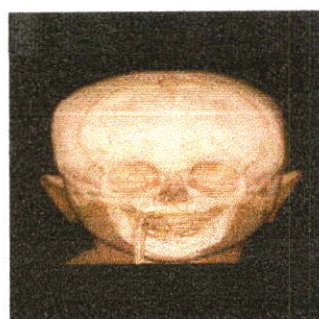


(ง) มีสัญญาณรบกวน $V = 0.01$

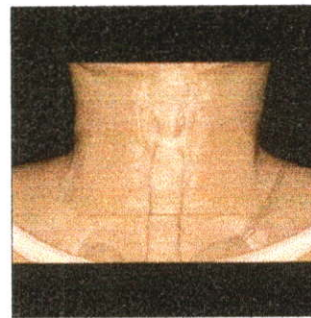
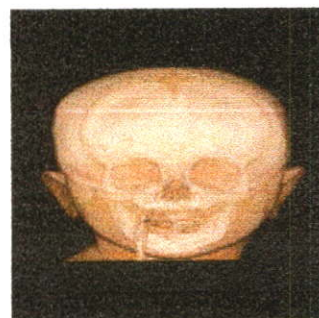
รูปที่ 6.16 การกระจายของสัญญาณรบกวนที่มีความแปรปรวนค่าต่างๆบนสไลซ์ที่ 31 ของชุดข้อมูลภาพศีรษะเด็กและสไลซ์ที่ 40 ของชุดข้อมูลภาพไทรอยด์



(ก) ภาพต้นฉบับ ไม่มีสัญญาณรบกวน



(ข) มีสัญญาณรบกวน $V = 0.0001$

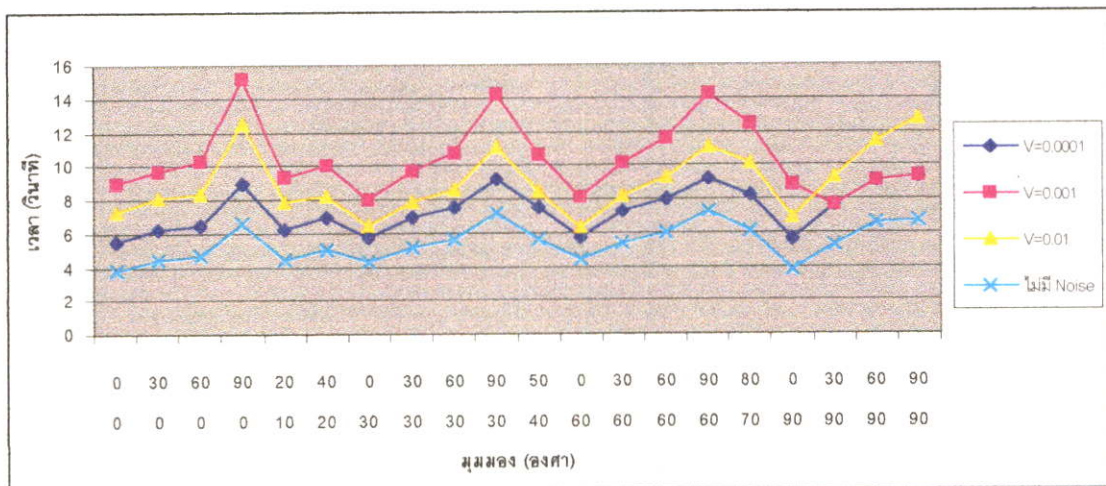


(ค) มีสัญญาณรบกวน $V = 0.001$

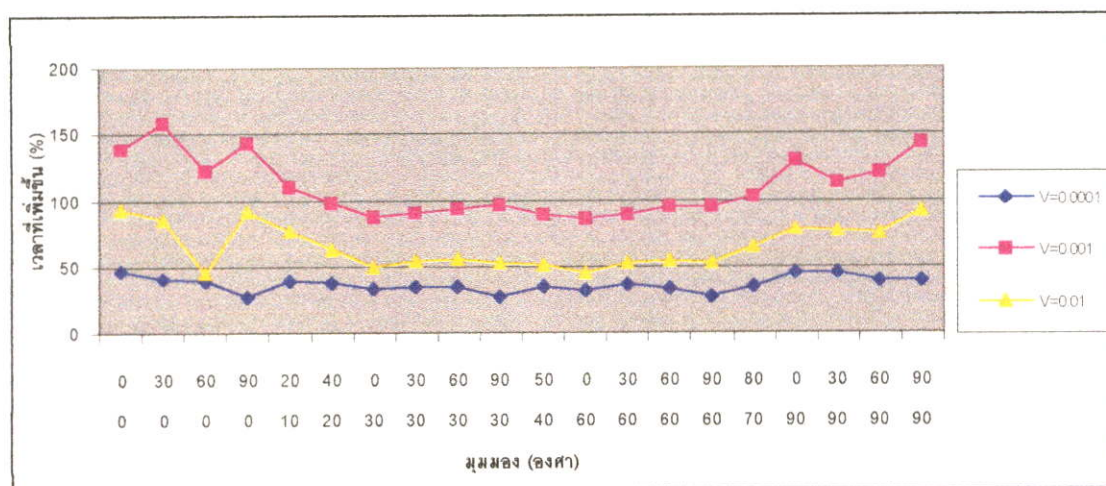


(ง) มีสัญญาณรบกวน $V = 0.01$

รูปที่ 6.17 ภาพเชิงปริมาตรที่มีสัญญาณรบกวนที่มีค่าความแปรปรวนต่างๆ



รูปที่ 6.18 กราฟเวลาที่แตกต่างกันในการสร้างภาพสรีระเด็กที่ไม่มีสัญญาณรบกวนและมีสัญญาณรบกวนที่มีความแปรปรวนค่าต่างๆ



รูปที่ 6.19 กราฟเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่เพิ่มขึ้นในการสร้างภาพสรีระเด็กที่ไม่มีสัญญาณรบกวนและมีสัญญาณรบกวนที่มีความแปรปรวนค่าต่างๆ

ตารางที่ 6.6 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการสร้างภาพที่ไม่มีสัญญาณรบกวนกับมีสัญญาณรบกวนที่มีความแปรปรวนค่าต่างๆ

ภาพ	มุมมอง	ไม่มี Noise	มี Gaussian Noise , $\bar{X}=0$		
			V = 0.0001	V = 0.001	V = 0.01
ศีรษะเด็ก	$\phi = 0, \theta = 0$	3.77	5.50	8.98	7.28
	$\phi = 20, \theta = 40$	5.06	6.95	9.99	8.22
	$\phi = 50, \theta = 10$	4.77	6.27	8.65	6.92
ไทรอยด์	$\phi = 0, \theta = 0$	6.95	7.66	11.05	7.97
	$\phi = 20, \theta = 40$	7.96	9.54	11.61	9.76
	$\phi = 60, \theta = 30$	8.45	9.65	11.82	9.96

จากตารางที่ 6.6 จะเห็นว่าเวลาในการสร้างภาพจะมากขึ้นตามปริมาณของสัญญาณรบกวน และได้แสดงให้เห็นเวลาและเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่เพิ่มขึ้นในการสร้างภาพดังกราฟที่ 6.18 และ 6.19

บทที่ 7

สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรด้วยการอาศัยข้อมูลระยะทางที่ได้จากการแปลงระยะทางแบบยูคลิดียนต์สองทิศทางนั้น เป็นการทำให้แสงเข้าถึงบริเวณที่เป็นวัตถุได้เร็วขึ้น โดยให้แสงเข้าถึงวัตถุทั้งด้านหน้าและด้านหลังของปริมาตร จึงทำให้ใช้เวลาในการสร้างภาพในมุมมองต่างๆน้อยลง จะเห็นว่าภาพที่ได้จากการอาศัยค่าระยะทางยูคลิดียนต์มีความเหมือนกันกับภาพที่สร้างจากวิธีพื้นฐาน [11] และที่ได้เลือกการแปลงระยะทางแบบยูคลิดียนต์มาใช้ก็เนื่องจากเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะสามารถเข้าถึงวัตถุได้ทุกทิศทาง และให้ภาพผลลัพธ์ไม่ผิดเพี้ยน ซึ่งได้มีการพิสูจน์ไว้แล้ว [1] จึงได้นำมาวิธีนี้มาพัฒนา

ในผลการทดลอง จะพบว่าเมื่อนำการแปลงระยะทางสองทิศทางมาใช้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรแทนการใช้วิธีดั้งเดิมจะสามารถสร้างภาพได้เร็วขึ้นเฉลี่ย 45-65% และเมื่อนำมาใช้แทนวิธีแปลงระยะทางทิศทางเดียวแล้วจะสามารถสร้างภาพได้เร็วขึ้นเฉลี่ย 10-20% และจากกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างทางด้านเวลาเมื่อใช้การสร้างภาพด้วยวิธีการแปลงระยะทางสองทิศทางแทนวิธีทิศทางเดียว จะเห็นว่าในกรณีของชุดข้อมูลภาพไทรอยด์จะมีเปอร์เซ็นต์ความเร็วในการสร้างภาพสูงกว่าชุดข้อมูลภาพศีรษะเด็ก ทั้งนี้ก็เป็นเพราะบริเวณที่ลำแสงจะสามารถทะลุผ่านไปจนหลุดออกจากปริมาตรนั้นมีไม่เท่ากัน กล่าวคือในชุดข้อมูลภาพไทรอยด์จะมีบริเวณที่เป็นเนื้อเยื่อซึ่งเป็นบริเวณกึ่งโปร่งแสงมากกว่าชุดข้อมูลศีรษะเด็ก ทำให้มีแนวลำแสงทะลุผ่านออกไปมากกว่าส่งผลให้การกระโดดของแสงจากด้านหลังปริมาตรมีการใช้ประโยชน์ ในขณะที่ชุดข้อมูลภาพศีรษะมีส่วนที่เป็นกะโหลกซึ่งมีความทึบแสงเป็น 1 ทำให้ลำแสงที่เข้ามาในปริมาตรตรงแนวของกะโหลกไม่สามารถทะลุผ่านไปถึงด้านหลังได้ จึงไม่ได้ใช้ประโยชน์จากการกระโดดเข้าทางด้านหลังปริมาตร แต่อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่าในชุดข้อมูลศีรษะเด็กจะได้ใช้ประโยชน์จากการกระโดดเข้าด้านหลังปริมาตรของลำแสงไม่มากนัก แต่ก็ยังทำให้สามารถสร้างภาพได้เร็วกว่าการให้แสงกระโดดเข้ามาในปริมาตรเพียงด้านเดียว

เมื่อมีการพิจารณารวมเวลาที่ใช้ในการสร้างปริมาตรระยะทางและเวลาในการสร้างภาพเข้าด้วยกันแล้ว จะต้องมองภาพเชิงปริมาตรด้วยวิธีดั้งเดิมประมาณ 23-24 ครั้ง จึงจะทำให้วิธีการสร้างภาพโดยใช้การแปลงระยะทางมีประโยชน์ จำนวนครั้งที่กล่าวถึงนี้เป็นเพียงการประมาณเท่านั้น ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามลักษณะของมุมมองที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบ แต่ในการทดลองที่นำมาพล็อตกราฟนั้น เวลาที่ได้จากการสร้างภาพด้วยการแปลงระยะทางจะไม่รวมเวลาที่ใช้ในการแปลงระยะทางเพราะจะนำเพียงค่าระยะทางมาใช้อ้างอิงเท่านั้น เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วหาก

มีการวิเคราะห์ข้อมูลภาพสามมิติหรือมีการบรรยายข้อมูลเหล่านี้ จะต้องมีการเปลี่ยนมุมมองต่างๆ ของภาพอยู่บ่อยๆ ฉะนั้นหากต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนมุมมองแต่ละครั้งนาน ก็จะทำให้การพิจารณาข้อมูลนั้นเสียเวลาและอาจทำให้การบรรยายนั้นน่าเบื่อได้ ฉะนั้นหากยอมเสียเวลาในการเตรียมข้อมูล (ในที่นี้คือการหาค่าระยะทาง) ก่อน แล้วสามารถทำให้เปลี่ยนมุมมองต่างๆ ได้เร็วขึ้น ก็น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า

เมื่อนำวิธีการสร้างภาพโดยใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางไปใช้กับชุดข้อมูลภาพที่มีสัญญาณรบกวนแล้ว จะพบว่าเวลาในการสร้างภาพก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของสัญญาณรบกวน ปริมาณของสัญญาณรบกวนยิ่งมากก็ยิ่งสร้างภาพได้ช้า แต่อย่างไรก็ดีแม้ในภาพที่มีสัญญาณรบกวน วิธีการสร้างภาพโดยใช้การแปลงระยะทางสองทิศทางก็ยังเป็นวิธีที่สร้างภาพได้เร็วที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น

ดังนั้นอัลกอริธึมการสร้างภาพด้วยการอาศัยการแปลงระยะทางแบบสองทิศทางที่นำเสนอ นี้จะใช้ประโยชน์ได้อย่างมากกับข้อมูลภาพที่มีบริเวณที่เป็นเนื้อเยื่อหลายๆลำแสงสามารถทะลุผ่านไปได้ และมีบริเวณฉากหลังหรืออากาศที่เป็นบริเวณกว้างมากๆ

7.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ปัญหา

ปัญหาอย่างหนึ่งที่น่าสนใจนั้นคือ Noise ที่มาจากภาพต้นฉบับซึ่งโดยทั่วไปแล้วเครื่องสแกนเนอร์จะให้ภาพที่มี Noise ออกมาด้วย ส่วนจะมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นกับชนิดของเครื่องมือ และภาพ CT ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นภาพที่ได้จากเครื่อง CT ซึ่งมีความละเอียดสูง (High resolution) จึงถือว่าไม่มี Noise [12] แต่ภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์บางชนิดก็อาจมี Noise เช่น เครื่องอัลตราซาวด์สแกนเนอร์ (Ultrasound Scanner) ซึ่งก็สามารถกำจัด Noise ได้ตามลักษณะของ Noise นั้นเอง ตัวอย่างเช่น ถ้า Noise ที่มีนั้นเป็น Noise ที่มีความเข้มแสง (Intensity) ต่ำๆ ก็สามารถกำจัดได้ด้วยการกำหนดค่าเทรชโฮล (Threshold) แต่ถ้าเป็น Noise ที่มีความเข้มแสงใกล้เคียงกับข้อมูลหลัก และมีขนาดต่างกันมาก ก็อาจกำจัดได้ด้วยการใช้วิธี Size Filter ซึ่งสามารถหารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก [18]

7.3 แนวทางการพัฒนา

จากอัลกอริธึมที่ได้มานี้ แม้ว่าจะช่วยลดเวลาในการสร้างภาพลงได้อีก แต่ก็ยังไม่เพียงพอเท่าใดนัก เพราะเป้าหมายที่น่าจะพัฒนาทางด้านความเร็วนี้มุ่งที่จะให้การสร้างภาพอยู่ในระดับเวลาจริง (Real Time) ฉะนั้นการพัฒนาต่อไปก็คือพยายามเข้าถึงวัตถุให้เร็วกว่านี้ และลดขั้นตอนการคำนวณให้เหลือน้อยที่สุด ก็จะสามารถบรรลุเป้าหมายได้ แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือการนำการคำนวณแบบขนานมาใช้ในการประมวลผลเพื่อให้ตัวประมวลผลกลางหลายๆตัวช่วยกันประมวล

ผล ก็น่าจะทำให้สร้างภาพได้เร็วขึ้น อีกสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจก็คือในการแบ่งกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการกำหนดค่าเทรชโฮลด์ซึ่งเป็นการแบ่งด้วยมือจึงอาจมีความผิดพลาดได้ ดังนั้นหากมีการใช้วิธีการอื่นที่จะทำให้แบ่งกลุ่มได้ถูกต้องกว่านี้ก็จะเป็นการดีสำหรับภาพที่ได้ ซึ่งถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งสำหรับการพัฒนาของผู้ที่สนใจ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรเทพ ไพบูลย์รัตนกร. “การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์โดยใช้การแปลงระยะทาง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [2] สุพจน์ จันทร์วิวัฒน์, สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์, กิตติพล ชิตสกุล และ มนัส สัจจวรศิลป์. “การสร้างภาพ 3 มิติ โดยใช้วิธีพิจารณาจากเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 20 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540. หน้า 542-547.
- [3] สุพจน์ จันทร์วิวัฒน์. “การสร้างภาพ 3 มิติ จากลำดับของข้อมูลภาพตัดขวางโดยใช้วิธีพิจารณาจากเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [4] Tiede U., Hoehne K. H. ,Bomas 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.
- [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] 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.
- [7] Drebin R. A., Carpenter L., and Hanrahan P. “Volume Rendering.” Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)., Vol. 22, No. 4, July 1987, pp. 65-74.
- [8] 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.
- [9] วรเทพ ไพบูลย์รัตนกร, ประเสริฐ อัสวรุ่งสกุล, กิตติพล ชิตสกุล และ มนัส สัจจวรศิลป์. “การแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลภาพดิจิทัลที่ได้จากการหมุนภาพ.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2541. หน้า 94-97.
- [10] Levoy M. “Display of Surface from Volume Data.” IEEE Computer Graphics & Applications., Vol. 8, No. 3, May 1988, pp. 29-37.
- [11] วรเทพ ไพบูลย์รัตนกร, เกษมสุข เสพศิริสุข, สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์ และ มนัส สัจจวรศิลป์. “อัล

กอธิวิธีสำหรับการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2542. หน้า 369-372

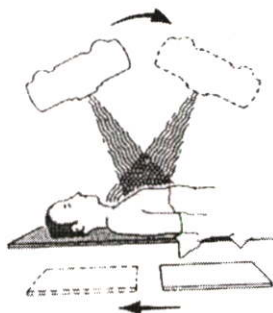
- [12] Barthold Lichtenbelt, Randy Crane and Shaz Naqvi. *Introduction to Volume Rendering*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1998.
- [13] David F. Rogers, J. Alan Adams. *Mathematical Element for Computer Graphic*. 2nd Ed. New York : McGraw-Hill, Inc. 1990.
- [14] David Salomon. *Computer Graphics & Geometric Modeling*. New York : Springer, 1999.
- [15] Alan Watt, Fabio Policarpo. *The Computer Image*. Harlow : Addison Wesley Longman, Ltd. 1998.
- [16] ชฎิล แก้วปลั่ง. “แบบจำลองการส่องสว่างของวัตถุในคอมพิวเตอร์กราฟฟิก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.
- [17] Sabella P. “A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields.” *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, Vol. 22, No. 4, August 1988, pp. 51-58.
- [18] Ramesh Jain., Rangachar Kasturi., Brain G. Schunck. *Machine Vision*. Singapore. McGraw-Hill. 1995.
- [19] Gabriele Lohmann. *Volumetric Image Anslysis*. Chichester : John Willy & Sons, Inc. 1998.
- [20] Zuiderveld K.J., “Visualization of Multimodality Medical Volume Data using Object-Oriented Methods.” Ph.D. Thesis of University of Utrecht, 1995.
- [21] วรเทพ ไพบูลย์รัตนกร, นนท บัณฑิตวงษ์, สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์ และ มนัส สัจวรศิลป์. “การเพิ่มความเร็วให้การสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์โดยใช้การแปลงระยะทาง.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2543. หน้า. 449-452.
- [22] Worathep Paiboonrattanakorn., Tanaporn Rattanametawee., Kittipol Chitsakul., Manas Sangworasil., “Speed-up Volume Rendering In Medical Image by using Distance Transform.”, First International Conference on Mechatronics-ICOM'01., Vol. 2, Kuala Lumpur, Malaysia, Feb. 2001, pp. 468-475.
- [23] ศิริชัย ปรีดโตทกพร. “การแยกกลุ่มข้อมูลภาพทางการแพทย์โดย Fuzzy C-Means และการพิจารณา Histogram ของภาพ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [24] Jolyon A. Browne, Gabor T. Herman, Dewey Odhner. *Snark93 A Programming System for Image Reconstruction from Projections*. Philadelphia : University of Pennsylvania. 1993.

ภาคผนวก ก

การสร้างภาพตัดขวาง CT

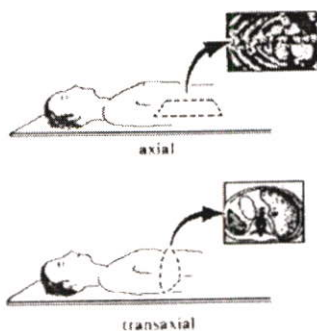
1. หลักการทำงานของเครื่อง CT [23]

หลักการของเครื่อง CT นั้นได้รับการพัฒนามาจากเทคนิคการถ่ายภาพแบบโทโมกราฟี ซึ่งเทคนิคดังกล่าวพยายามที่ต้องการเห็นภาพอวัยวะภายในร่างกายของผู้ป่วยเพียงระนาบใดระนาบหนึ่งเท่านั้น เทคนิคของโทโมกราฟีแบบหนึ่งคือ การที่หลอดรังสีเอกซ์และฟิล์มเคลื่อนที่ไปด้วยกันในระหว่างการถ่ายภาพดังในรูปที่ 1 การทำแบบนี้แม้จะเห็นภาพของผู้ป่วยเพียงแค่ระนาบเดียวที่ผ่านจุดหมุนของการเคลื่อนที่ของหลอดรังสีเอกซ์และฟิล์มก็ตาม แต่ก็มีภาพของระนาบอื่นๆ ปนออกมาด้วยในลักษณะไม่คมชัด



รูปที่ 1 การถ่ายภาพรังสีเอกซ์ชนิดโทโมกราฟีแบบเก่า

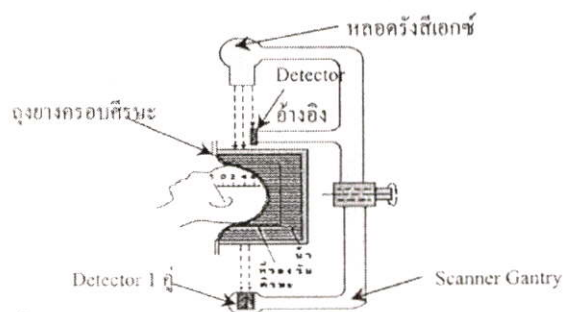
จากภาพโทโมกราฟีแบบเก่านี้บางที่เรียกว่า โทโมกราฟีตามแกน (Axial Tomography) เนื่องจากภาพอวัยวะภายในของผู้ป่วยที่ปรากฏเป็นภาพที่ขนานกับแกนตามยาวของร่างกาย แต่สำหรับภาพที่ได้จากเครื่อง CT จะเป็นภาพที่อยู่ในแนวตัดขวางกับแกนตามยาวของร่างกายผู้ป่วย หรือเรียกว่า โทโมกราฟีตามขวาง (Transaxial Tomography) ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพโทโมกราฟีตามแกนและภาพโทโมกราฟีตามขวาง

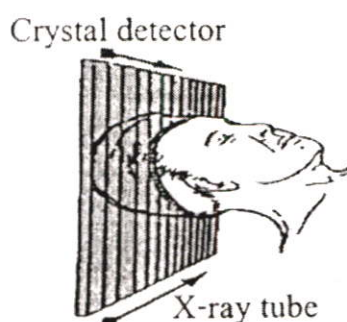
เมื่อพิจารณาถึงวิธีการของเครื่อง CT เพื่อไม่ให้ภาพภาคตัดขวางที่มีลักษณะเหมือนการตัดร่างกายของผู้ป่วยออกมาเป็นชิ้นบางๆนั้น จะพบว่ามีความสลับซับซ้อนอยู่มากพอสมควร เนื่องจากในปัจจุบันได้มีพัฒนาการของเครื่อง CT ไปแล้วมากกว่า 5 รุ่น แต่เพื่อความเข้าใจในหลักการของเครื่อง CT จะขอกล่าวถึงหลักการของเครื่อง CT รุ่นแรกของเฮาส์ฟีลด์ (Gogfrey N. Hounsfield) วิศวกรคอมพิวเตอร์ของบริษัท EMI ที่เป็นผู้เริ่มใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณสร้างภาพภาคตัดขวางของร่างกายมนุษย์โดยไม่ต้องผ่าตัด และเป็นวิธีที่มีหลักการที่เข้าใจได้ง่าย

ในหลักการทำงานของเครื่อง CT นี้ จะนำศีรษะของผู้ป่วยซึ่งอยู่ระหว่างหลอดรังสีกับหัววัด (detector) ซึ่งศีรษะของผู้ป่วยจะถูกห้อมล้อมด้วยถุงน้ำเบะและมีหัววัดดอกหนึ่งคู่อยู่ด้านล่างสำหรับวัดรังสีที่ผ่านจากตัวผู้ป่วย ส่วนทางด้านบนจะมีหัววัดอ้างอิงสำหรับวัดปริมาณรังสีก่อนที่จะผ่านตัวผู้ป่วยดังในรูปที่ 3



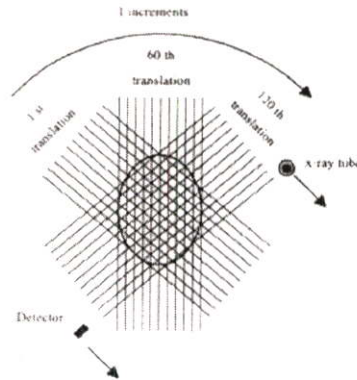
รูปที่ 3 หลักการของเครื่อง CT รุ่นแรกของบริษัท EMI

จากรูปหลอดรังสีเอกซ์กับหัววัดจะถูกยึดติดกันด้วยแกนแข็ง ลำของรังสีจะพุ่งตรงไปสู่หัววัดตลอดเวลา ในการสแกนหลอดรังสีกับหัววัดจะมีการเคลื่อนที่อยู่สองแบบคือ การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงหรือเลื่อน (Translation) กับเคลื่อนที่หมุน (Rotation) ซึ่งในการทำงานจะมีการยิงรังสีเอกซ์ลำแคบออกไปจากหลอดรังสี แล้วใช้หัววัดที่อยู่ฝั่งตรงข้ามเป็นตัวรับรังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมา จากนั้นทำการเลื่อนหลอดรังสีเอกซ์กับหัววัดให้ลำรังสีเอกซ์ตัดผ่านไปตามระนาบของผู้ป่วยที่ต้องการดู ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงของรังสีเอกซ์ผ่านไปตามระนาบของผู้ป่วยที่ต้องการดู

จากรูปที่ 4 การเลื่อนในลักษณะแบบนี้ หลอดรังสีกับหัววัดจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปจนสุดระยะ ซึ่งรังสีที่เหลือหลังจากผ่านตัวผู้ป่วยจะถูกวัด 160 ครั้งหรือ 160 เรย์ซัม (ray sum) จากนั้นทั้งหลอดรังสีกับหัววัดก็จะหมุนเปลี่ยนมุมหนึ่งองศา และหลอดรังสีกับหัววัดจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปจนสุดระยะ และจะทำเช่นนี้ซ้ำแล้วซ้ำอีกจนครบ 180 ครั้ง (การหมุนของหลอดรังสีกับหัววัดจะหมุนเป็นครึ่งวงกลมหรือเท่ากับ 180 องศา) ซึ่งการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงแต่ละครั้ง จะเรียกว่า “การสแกน” ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นการสแกนตามแนวเส้นตรงของครั้งที่แรก, ครั้งที่ 60 และครั้งที่ 120



รูปที่ 5 การสแกนครั้งที่แรก, ครั้งที่ 60 และครั้งที่ 120

จากรูปที่ 5 จำนวนของข้อมูลความเข้มรังสีที่วัดได้จากหัววัดจะเท่ากับ 160×180 หรือ 28800 ครั้ง จะถูกนำไปใช้ในการสร้างภาพโดยวิธีของอิตเทอเรชัน (Iterative reconstruction) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ข้อสังเกต อากาศรอบๆ สี่ระยะกับเนื้อเยื่อของสี่ระยะจะดูดกลืนรังสีต่างกันมาก คอมพิวเตอร์ของเครื่อง CT รุ่นแรกไม่สามารถจัดการกับข้อมูลซึ่งแตกต่างกันมากมายได้เนื่องจากคำนวณยาก ดังนั้นเครื่อง CT รุ่นแรกจึงต้องใช้น้ำล้อมรอบสี่ระยะเพื่อให้การคำนวณง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าไปมากการใช้ น้ำล้อมรอบส่วนอวัยวะจึงหมดความจำเป็น

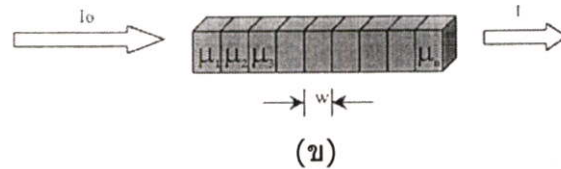
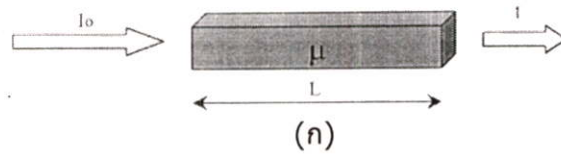
2. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มรังสีที่วัดได้จากเครื่อง CT

เนื่องจากทฤษฎีการสร้างภาพของเครื่อง CT จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาการจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์ ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงการสร้างภาพ CT ควรจะพิจารณาถึงเทอมสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์เป็นการเริ่มต้น

รังสีเอกซ์มีคุณสมบัติที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง และเป็นพวกไอออนไนซิงเรดิเอชัน (Ionizing radiation) เมื่อเดินทางผ่านไปในตัวกลางใดก็ตามจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับตัวกลางนั้น เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปรากฏการณ์คอมพ์ตัน

(Compton effect) เป็นต้น ซึ่งปรากฏการณ์ต่างๆเหล่านี้มีผลทำให้รังสีเอกซ์ที่เดินทางผ่านตัวกลางนั้นๆออกมาแล้ว มีความเข้มลดลง

สมมติมีตัวกลางหรือวัตถุที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 6ก)



รูปที่ 6 ก) การดูดกลืนรังสีโดยวัตถุที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ

ข) การดูดกลืนรังสีโดยวัตถุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

เมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานระดับเดียว (monoenergetic) ผ่านเข้าไปในตัวกลางดังกล่าว การลดลงของรังสีเอกซ์จะเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังสมการที่ 1

$$I = I_0 e^{-\mu L} \quad (1)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนผ่านตัวกลาง

I คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์หลังจากผ่านตัวกลาง

e คือ ค่าคงที่ซึ่งเป็นฐานของลอการิทึมธรรมชาติ

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient)

L คือ ความหนาของวัตถุ

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังสมการที่ 2

$$\ln I_0 / I = \mu L \quad (2)$$

ในร่างกายรังสีเอกซ์จะผ่านเนื้อเยื่อที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ถ้าแบ่งเนื้อเยื่อในทิศทางที่ลำรังสีผ่านออกเป็นหน่วยย่อยขนาดเล็กที่มีความหนา w เท่าๆกัน ดังในรูปที่ 6ข) ซึ่งในแต่ละหน่วยย่อยมีสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์เชิงเส้นคงที่แต่ไม่เท่ากัน ถ้ากำหนดให้มี

สัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์เชิงเส้นในแต่ละหน่วยย่อยเป็น $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$ ตามลำดับ จากสมการที่ 2 จะได้

$$\ln I_0 / I = w\mu_1 + w\mu_2 + w\mu_3 + \dots + w\mu_n \quad (3)$$

หรือ

$$\ln I_0 / I = w\mu_1 + w\mu_2 + w\mu_3 + \dots + w\mu \quad (4)$$

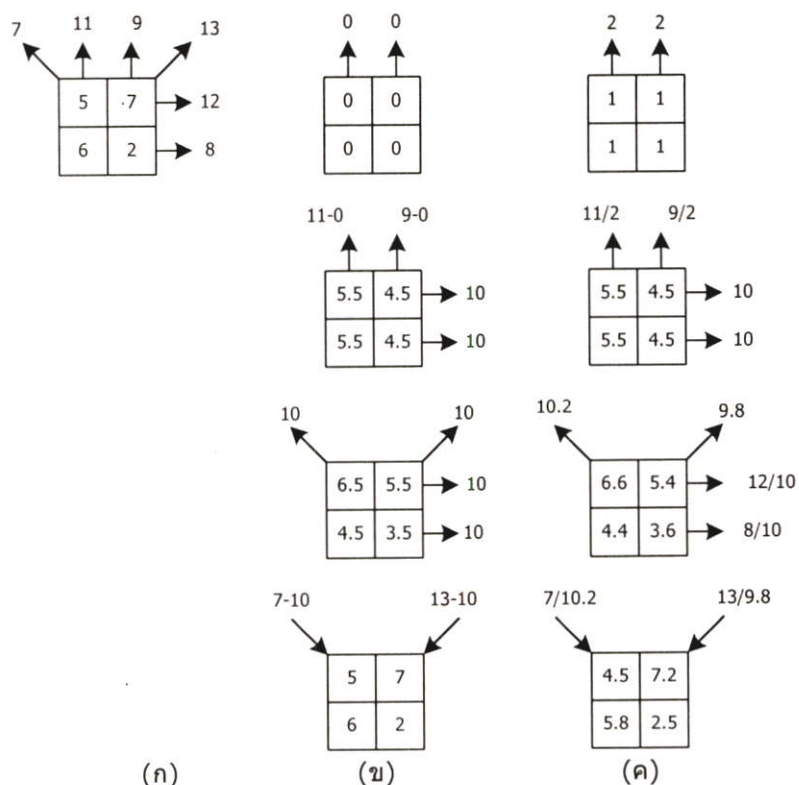
จากสมการที่ 4 ตัวแปรทุกตัวจะทราบค่า ยกเว้นแต่ $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$ ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งค่า μ ดังกล่าวก็คือ ผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์เชิงเส้นของเนื้อเยื่อที่อยู่ในทางผ่านของลำรังสีเอกซ์นั่นเอง การรวมค่า μ แต่ละครั้งจึงเรียกว่า เรย์ซัม (Ray sum) หรือเรียกทางคณิตศาสตร์ว่า การรวมเชิงเส้น (line integral) ดังนั้นในระนาบใดๆของร่างกาย ถ้าสามารถคำนวณค่า μ บนทุกๆจุดในระนาบนั้นได้ ก็จะสามารถสร้างภาพโดยใช้ค่า μ ที่หาได้มาเรียงตามตำแหน่งที่สอดคล้องบนระนาบจริงๆ เพราะฉะนั้นในการสร้างภาพจึงได้มุ่งหาคำตอบของสมการที่ 4 ซึ่งก็คือผลรวมของ μ นั่นเอง

3. ทฤษฎีการสร้างภาพ CT

ในการสร้างภาพ CT นั้นจะมีการนำค่าผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์เชิงเส้น (μ) ที่ได้จากสมการที่ 4 มาเป็นข้อมูลในการสร้างภาพ CT ซึ่งวิธีการสร้างภาพดังกล่าวนี้จะมีอยู่หลายวิธี เช่น การสร้างภาพตัดขวางแบบอิตเทอเรชัน (Iterative), การสร้างภาพตัดขวางแบบซิมเปิลแบคโพรเจกชัน (Simple back projection), การสร้างภาพตัดขวางแบบฟิลเตอร์แบคโพรเจกชัน (Filter back projection) หรือวิธีอื่นๆ ซึ่งสามารถที่จะสรุปวิธีการทั้ง 3 ได้ดังนี้

3.1 การสร้างภาพตัดขวางแบบอิตเทอเรชัน (Iterative)

การสร้างภาพ CT ด้วยวิธีนี้เป็นการลองผิดลองถูกทางคณิตศาสตร์จนได้คำตอบที่ถูกต้อง ในที่สุด สมมติมีเนื้อเยื่ออยู่ที่พิกเซลซึ่งมีค่า μ ต่างๆกันดังในรูปที่ 7ก) ในการเก็บข้อมูลสามารถบันทึกค่าเรย์ซัมได้ 6 ค่า ตามทิศทางของลูกศรคือ 7, 11, 9, 13, 12 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งในการคำนวณด้วยวิธีนี้สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือแอดดิทีฟคอรเรกชัน (additive correction) และมัลติพลิเคทีฟคอรเรกชัน (multiplicative correction) ดังในรูปที่ 7ข) และ 7ค) ตามลำดับ



รูปที่ 7 แผนภาพการคำนวณสร้างภาพตามวิธีการอิทธิพลเรชัน

- ก) วัดจริง และ 6 เรย์ซัม ได้แก่ 7, 11, 9, 13, 12 และ 8 ตามลำดับ
 ข) การสร้างภาพแบบแอดดิทีฟคอรเรชัน เริ่มต้นด้วยการสมมติให้แต่ละช่องเป็น 0
 ค) การสร้างภาพแบบมัลติพลิเคทีฟคอรเรชัน เริ่มต้นด้วยการสมมติให้แต่ละช่องเป็น 1

สำหรับวิธีการของแอดดิทีฟคอรเรชันสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 สมมติให้แต่ละเซลล์มีความหนาแน่นเป็น 0 ในภาพแรกของรูปที่ 7ข) จะพบทันทีว่าไม่ว่าจะคำนวณเรย์ซัมในทิศทางใดก็ตามจะมีค่าเท่ากับ 0 ทั้งสิ้น

ขั้นที่ 2 นำเรย์ซัมที่วัดได้ 11 และ 9 ไปเปรียบเทียบกับเรย์ซัมที่คำนวณได้ จะเห็นว่าแตกต่างกันอยู่ +11 และ +9 ตามลำดับ (เครื่องหมายบวกแสดงว่า ค่าที่วัดได้มากกว่าค่าที่คำนวณได้) เฉลี่ยค่าที่แตกต่างกันนี้ แล้วนำไปรวมกับค่าความหนาแน่นเดิมในคอลัมน์แรกและคอลัมน์ที่สองของภาพที่สอง ถัดลงมา

ขั้นที่ 3 ตอนนี้จะเห็นว่าเรย์ซัมที่คำนวณได้ในแถวแรกและแถวที่สองมีค่าเป็น 10 และ 10 ต่างกับค่าเรย์ซัมที่วัดได้ในทิศทางเดียวกัน +2 และ -2 ตามลำดับ (เครื่องหมายลบแสดงว่า ค่าที่วัดได้น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้) เฉลี่ยค่าที่แตกต่างกันนี้ แล้วนำไปรวมกับค่าความหนาแน่นเดิมของแต่ละเซลล์ตามลำดับ ดังภาพที่สามถัดลงมา

ขั้นที่ 4 ตอนนี้จะเห็นว่าเรย์ซัมที่คำนวณได้ในแนวทแยงมุมซ้ายและขวามีค่าเป็น 10 และ 10 ต่างกับค่าเรย์ซัมที่วัดได้ในทิศทางเดียวกัน -3 และ +3 ตามลำดับ เฉลี่ยค่าที่แตกต่างกันนี้ นำไปรวมกับค่า

ความหนาแน่นเดิมของแต่ละเซลล์ตามลำดับ ดังภาพล่างสุด

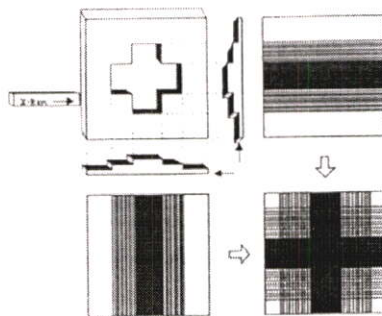
เมื่อการคำนวณทั้ง 4 ขั้นตอนจบลงเรียกว่าอิทธิพลเรชัน ครั้งที่ 1 จบลงอย่างสมบูรณ์ ตามตัวอย่างนี้ปรากฏว่าความหนาแน่นของทุกเซลล์ตรงกับที่เป็นจริงพอดี การคำนวณก็จะหยุดเพียงเท่านี้

สำหรับวิธีของมัลติพลิเคทีฟคอเรชัน จะคล้ายกับวิธีแอดดิชันคอเรชัน ต่างกันตรงที่การหาค่าแก้ในแต่ละลำรังสีเอกซ์คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณได้ แล้วนำไปคูณกับค่าความหนาแน่นเดิมในแต่ละเซลล์ ได้เป็นค่าความหนาแน่นใหม่ที่ดีกว่าตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณตามวิธีนี้ดูจากรูปที่ 7ค) จะเห็นว่า เมื่ออิทธิพลเรชันครั้งที่ 1 จบลงอย่างสมบูรณ์ ค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ยังต่างจากของจริงซึ่งต้องคำนวณรอบต่อไปอีก

การสร้างภาพด้วยวิธีอิทธิพลเรชันนี้ถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่เข้าใจง่าย แต่ก็มีข้อเสียคือต้องรวบรวมข้อมูลให้ครบทั้งหมดก่อนจึงจะทำการวิเคราะห์ได้ จึงเสียเวลาระหว่างการสแกนไปเปล่าๆ นอกจากนี้ยังต้องใช้เวลาในการคำนวณซึ่งทำให้กระบวนการสร้างภาพตัดขวางต้องใช้เวลาานานมาก

3.2 การสร้างภาพตัดขวางแบบซิมเปิลแบคโพรเจกชัน (Simple back projection)

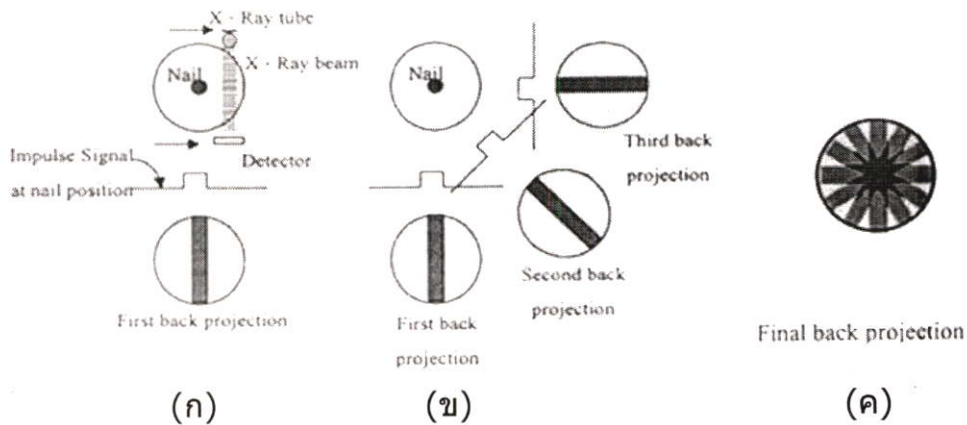
การสร้างภาพด้วยวิธีนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลไปพร้อมๆ กับการรวบรวมข้อมูล จึงทำให้ใช้เวลาสั้นกว่าวิธีอิทธิพลเรชัน ซึ่งในการทดลองจะมีการสร้างภาพสองมิติของแท่งสี่เหลี่ยม โดยบริเวณตรงกลางเจาะช่องเป็นรูปกากบาทดังรูปที่ 8ก)



รูปที่ 8 การสร้างภาพตัดขวางด้วยวิธี Simple back projection

นำแท่งสี่เหลี่ยมนี้มาสแกนจากด้านบนและด้านข้างด้วยการเคลื่อนลำรังสีเอกซ์ ภาพโพรไฟล์ (Profile) ที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 8ข) ซึ่งมีรูปร่างเหมือนขั้นบันได โดยความสูงของขั้นบันไดจะแปรผันตามปริมาณรังสีเอกซ์ที่เหลือหลังจากผ่านแท่งสี่เหลี่ยม นำความสูงของขั้นบันไดไปเทียบกับสเกลสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นสัดส่วนกัน แถบสี่เหลี่ยมซึ่งเรียงเป็นลำดับตามโพรไฟล์เรียกว่า แถบแสง (ray) ดังในรูปที่ 8ค) ความกว้างของแถบแสงจะเท่ากับความกว้างของขั้นบันไดในโพรไฟล์และความสว่างของแถบแสงจะเท่ากับความสูงของแท่งสี่เหลี่ยม

เมื่อนำเอาแถบแสงทั้งตามแนวตั้งและแนวนอน มาซ้อนทับกันก็จะได้ภาพกากบาทหยาบๆ (ดังรูปที่ 8) ในทางปฏิบัติต้องมีการสแกนจากหลายทิศทางเพื่อได้ภาพที่มีคุณภาพดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการซ้อนภาพกันจากหลายทิศทาง จะทำให้บริเวณขอบของภาพไม่คมชัดมีลักษณะเป็นแฉกเหมือนดาวซึ่งเรียกว่า Star effect ดังรูปที่ 9

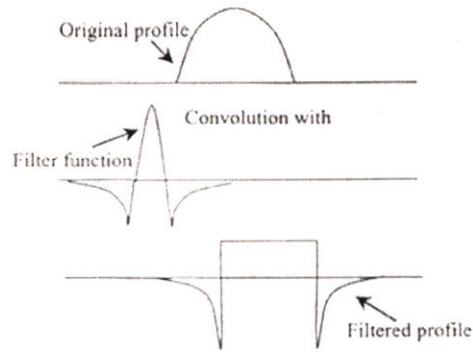


รูปที่ 9 แผนภาพแสดงการสร้างภาพด้วยวิธี Simple back projection

- ก) แถบแสงที่ได้จากข้อมูลการสแกนครั้งแรก
- ข) แถบแสงจากการสแกนในทิศทางต่างๆ
- ค) เมื่อนำแถบแสงทั้งหมดมาซ้อนกันจะได้ภาพที่ไม่คมชัดตรงบริเวณขอบของภาพ ซึ่งมีลักษณะเป็นแฉกเหมือนดาวเรียกว่า Star effect

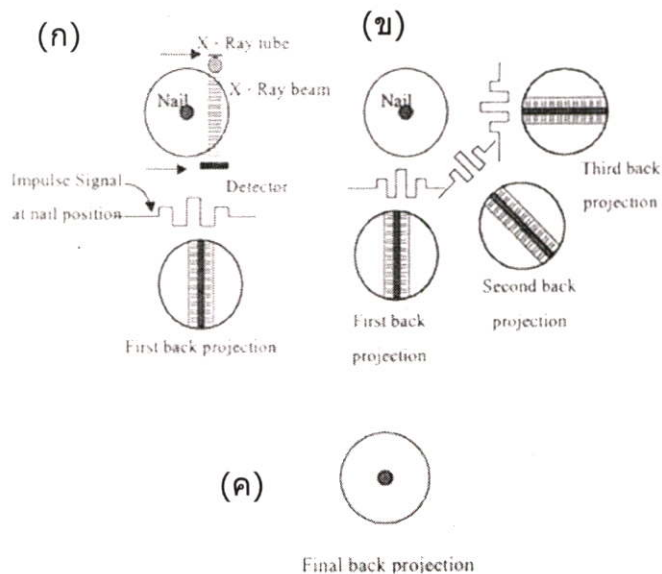
3.3 การสร้างภาพตัดขวางแบบ Filter back projection

วิธีแก้ปัญหา Star effect จากขบวนการ Simple back projection นั้นจะต้องมีการตัดแปลงภาพโพรไฟล์ โดยมีการเพิ่มค่าทางด้านลบให้แก่ภาพโพรไฟล์เพื่อจะไปหักล้างไม่ให้เกิด Star effect ซึ่งวิธีการแบบนี้เรียกว่า ฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน (Filter back projection) การฟิลเตอร์ในลักษณะนี้จะเป็นขบวนการทางคณิตศาสตร์โดยการคูณค่าโพรไฟล์ด้วยเลขจำนวนเฉพาะที่เรียกว่า ฟังก์ชันการกรอง (Filter function) การคูณค่าโพรไฟล์ด้วยฟังก์ชันการกรองเรียกว่า คอนโวลูชันฟิลเตอร์ ฟังก์ชัน (Convolution filter function) หรือคอนโวลูชันเคอร์เนล (Convolution kernel) ดังรูปที่ 10 นอกจากนี้วิธีสร้างภาพที่กล่าวมานี้ ยังมีการสร้างภาพโดยใช้หลักการของการกรองแบบฟูเรียร์ (Fourier filter)



รูปที่ 10 ขบวนการฟิลเตอร์แบคโปรเจกชันโดยการนำโพรไฟล์ (ภาพบนสุด) มาคอนโวลูชันกับตัวฟังก์ชันการกรอง (ภาพกลาง) ได้ filtered profile(ภาพล่างสุด)

ในขบวนการการสร้างภาพของฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน หลังจากเอาโพรไฟล์มาคอนโวลูชันกับตัวฟังก์ชันการกรองจนได้ฟิลเตอร์โพรไฟล์แล้ว ขบวนการต่างๆก็จะเหมือนกับขบวนการซิมเปิลแบคโปรเจกชัน แต่ภาพที่ได้จะไม่เกิดปรากฏการณ์ Star effect ที่ขอบของภาพดังในรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผนภาพแสดงการสร้างภาพของฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน

- ก) ข้อมูลจากการสแกนครั้งแรกจะถูกตัดแปลงด้วยฟังก์ชันการกรองและได้แถบแสงดังภาพ
- ข) แถบแสงจากการสแกนในทิศทางต่างๆ
- ค) เมื่อนำแถบแสงทั้งหมดมาซ้อนกันจะได้ภาพที่ไม่มี Star effect

นอกจากนี้วิธีการสร้างภาพตัดขวางยังสามารถทำได้ด้วยวิธีการอื่น โปรแกรมสำเร็จรูปที่ปัจจุบันมีการพัฒนาขึ้นได้แก่ SNARK93 [24] เป็นวิธีที่สามารถกำหนดลักษณะและจำนวนของลำ

แสงที่ฉายเข้าไป และเลือกวิธีการสร้างภาพ (reconstruction) แบบต่างๆได้เอง ซึ่งมีตัวอย่างโปรแกรมและภาพผลลัพธ์ดังนี้

```

*      EXAMPLE 1
*      DAISY PATTERN
*      CREATION OF PHANTOM AND DIVERGENT PROJECTION DATA
*      RECONSTRUCTION WITH DCON
*      ANALYSIS
CREATE                สร้าง pattern
EXAMPLE 1 DAISY      ตั้งชื่อ pattern
SPECTRUM MONOCHROMATIC 75  ให้ x-ray มีพลังงานเดียวคือ 75
OBJECTS              ออกแบบลักษณะรูป
ELIP 0.0 0.0 6.7 9.0 0.0 2.0  รูป ellipse ศูนย์กลาง(0,0) แนวนอน 6.7 ตั้ง 9.0 มุม 0° ความหนาแน่น 2
ELIP 0.0 0.0 6.2 8.5 0.0 -0.98
ELIP 2.375 0.0 1.5 3.0 -30 -1.0
ELIP -2.1 0.0 1.7 4.0 20 -1.0
ELIP 0.15 3.75 2.25 2.75 0.0 1.03
ELIP 0.0 1.0 0.5 0.5 0.0 1.03
ELIP 0.0 -1.0 0.5 0.5 0.0 1.04
ELIP -0.875 -6.0 0.625 0.25 0.0 1.03
ELIP 0.0 -6.0 0.25 0.25 0.0 1.03
ELIP 0.5 -6.0 0.25 0.5 0.0 1.03
LAST 1.0             สิ้นสุดคำสั่ง create
PHANTOM AVERAGE 3   สร้างไฟล์ชื่อ file11
81 0.25              ขนาด 81 pixels, pixels ละ 0.25
RAYSUM AVERAGE 1    ใส่ข้อมูลทางด้าน projection ให้ file11
1 1
GEOMETRY
DIVERGENT ARC 20.0 10000.0
RAYS USER 165 150.0  ฉายแสง 165 beam
ANGLES 60 EQUALLY SPACED  หมุน 60 ครั้งใน 180 องศา
0.0 352.5
MEASUREMENT PERFECT  ทำการ simulate noise
BACKGROUND 0.0       ให้ background มีค่าเป็น 0 = ไม่มี background
RUN
*
PICTURE TEST         ให้ snark สร้าง output file
*
PROJECTION REAL      สร้างไฟล์ prgfil เป็นตัวเก็บ radon transform
*
EXECUTE DCON          Reconstruction ด้วย D-convolution
EXAMPLE 1 DIVERGENT CONVOLUTION FROM 60 VIEWS
-1 1 -1 0.5 0
BANDLIMITING
*
LINES SCALE 100.0 COLUMN 16  เปรียบเทียบ test density กับ phantom
1
*

```

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ธนาภรณ์ รัตนเมธาวิ เกษมสุข เสพศิริสุข ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ และ มนต์ สัจวรศิลป์ “การเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2544 หน้า 1,296-1,300.
2. Paiboonrattanakorn, W., Rattanametawee, T., 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.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชนาภรณ์ รัตนเมธาวิ เกิดเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2521 ที่จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542