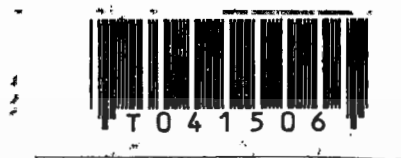


วิธีการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติรีโซลูชัน DSCT

EDGE DETECTION ALGORITHM BASED ON MULTIREOLUTION DSCT



วรพจน์ เกียรติสุขศรี
WORAPOJ KIATSUKSRI

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 41506
วัน, เดือน, ปี..... 19 ก.พ. 2545

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

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-496-6

EDGE DETECTION ALGORITHM BASED ON MULTIREOLUTION DSCT

WORAPOJ KIATSUKSRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2001
ISBN 974-648-496-6



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติเรโซลูชัน DSC
นักศึกษา	นาย วรพจน์ เกียรติสุขศรี
รหัสประจำตัว	42061194
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์

บทคัดย่อ

การหาขอบของวัตถุในภาพทำให้สามารถเข้าใจข้อมูลข่าวสาร และลักษณะพื้นฐานของวัตถุที่มีอยู่ในภาพได้ อย่างไรก็ตามวิธีการต่างๆที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ทำให้ความละเอียดของภาพซึ่งจะไม่ให้ผลดีในกรณีที่ภาพมีรายละเอียดของขอบภาพจำนวนมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการหาขอบภาพโดยแบบหลายความละเอียดในโดเมนความถี่ กระบวนการควอดรี ดีคอมโพสิชันได้ถูกนำมาใช้แบ่งภาพเป็นพื้นที่ย่อย ทำให้สามารถข้ามการคำนวณในพื้นที่ที่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งไม่มีขอบภาพ และสำหรับแต่ละพื้นที่ย่อยที่พิจารณาว่ามีขอบภาพ ก็จะสามารถแยกพิจารณาในความละเอียดต่างๆกันได้ โดยทำการแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคไซน์ จากนั้นทำการฟิลเตอร์โดยใช้ฟิลเตอร์ที่ปรับคุณสมบัติตามคุณสมบัติของแต่ละพื้นที่ย่อยอย่างอัตโนมัติ

Thesis Title	Edge Detection Algorithm based on Multiresolution DSCT
Student	Mr. Worapoj Kiatsuksri
Student ID.	42061194
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Manas Sangworasilp

ABSTRACT

Edge detection is used for understanding the basic properties of objects in an image. At present, almost algorithms use only one resolution in consideration of edge detection. Those algorithms are inadequate for detecting edges of an image with nonuniform property. This thesis proposes the multiresolution edge detection algorithm in transform domain. The quadtree decomposition has been utilized to divide the image of interest into small regions. Such the homogeneous regions will be skipped and the nonhomogeneous regions are assumed to have edges and will be considered in the appropriate resolution. The considered regions are transformed using discrete symmetric cosine transform(DSCT) and filtered using filter that can automatically adapt its property according to the property of gray value in each region.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ผู้เขียนผู้ศึกษาซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์ ดร.ยุทธนา คิดใจเดียว ดร.กิตติพล ชิตสกุล และ รศ.ดร. กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ ที่ช่วยเหลือแก้ไขและให้คำแนะนำ ในบางจุดของปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการวิจัย รวมถึงการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณ นนท บัณฑิตวงศ์ ช่วยให้แนวคิดและคำแนะนำที่ดีหลายๆอย่าง ในการเขียนโปรแกรมภาษาซี บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ และให้กำลังใจตลอดมา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรพจน์ เกียรติสุขศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของการทำการโฆษณา.....	4
2.1 บทนำ	4
2.2 สัญญาณสองมิติ	4
2.3 ระบบเชิงเส้น	5
2.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่	7
2.5 การแปลงฟูเรียร์	8
2.5.1 คุณสมบัติเชิงเส้น	9
2.5.2 คุณสมบัติสมมาตร	9
2.5.3 คุณสมบัติการซ้ำคาบของการคอนโวลูชัน	9
2.6 การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์	10
2.7 โครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรีและออกทรี	12
2.8 สรุป	13

บทที่ 3 การหาขอบภาพในโดเมนของระยะทาง

3.1 บทนำ	15
3.2 ขอบภาพ	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3 ตัวดำเนินการอนุพันธ์ (Derivative Operators)	17
3.4 แบบจำลองของขอบภาพและตัวดำเนินการลาปลาเซียน	18
3.5 อัลกอริทึมของ Marr และ Hildreth	22
3.6 อัลกอริทึมของ Canny	25
3.7 อัลกอริทึมของ Shen และ Castan	26
3.8 สรุป	27
บทที่ 4 การหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติเรโซลูชัน DSCT	29
4.1 บทนำ	29
4.2 ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ในโดเมนความถี่	29
4.3 อัลกอริทึมในการหาขอบภาพของ Sundaram	30
4.4 การปรับคุณสมบัติของฟิลเตอร์อย่างอัตโนมัติ	32
4.5 การลดการคำนวณโดยใช้โครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรี	32
4.6 อัลกอริทึมในการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติเรโซลูชัน DSCT	33
4.7 การประยุกต์ใช้ในการหาพื้นผิวของข้อมูลเชิงปริมาตร	35
4.7.1 การสร้างภาพเชิงพื้นผิว 3 มิติ	37
4.8 สรุป	37
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	39
5.1 บทนำ	39
5.2 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม	39
5.3 การทดลองกับภาพจริง	51
5.4 การเพิ่มความเร็วในการหาขอบภาพโดยใช้โครงสร้างควอดทรี	53
5.5 การประยุกต์ใช้กับการหาพื้นผิวของข้อมูลภาพเชิงปริมาตร	56
บทที่ 6 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา	58
6.1 สรุปผลการทดลอง	58
6.2 แนวทางในการพัฒนา	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	61
ประวัติผู้เขียน	62



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบขั้นตอนในการหาขอบของ Marr, Canny และ Shen	27
5.1 การทดลองการเพิ่มความเร็วในการหาขอบภาพโดยใช้โครงสร้างควอดทรี.....	53
5.2 เวลาที่ใช้ในการตรวจหาตำแหน่งของพื้นผิว.....	57



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแสดงสัญญาณสองมิติโดเมนของระยะทาง	4
2.2 ระบบเชิงเส้น	5
2.3 การไม่ขึ้นกับตำแหน่งของระบบเชิงเส้น	5
2.4 ระบบลิเนียร์ ชิฟ อินวาเรียนต์	6
2.5 การคอนโวลูชันของภาพดิจิทัล	6
2.6 คุณสมบัติสมมาตรของสัญญาณที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์สองมิติ	9
2.7 การแปลงฟูเรียร์และการแปลงดิคริต ซิมเมตริกซ์ โคไซน์ของสัญญาณหนึ่งมิติ	11
2.8 เปรียบเทียบสัญญาณจากการแปลงฟูเรียร์และการแปลงดิคริต ซิมเมตริกซ์ โคไซน์	12
2.9 ตัวอย่างการทำความถี่โคมโพสิชันของภาพไบนารี	13
2.10 โครงสร้างข้อมูลแบบออกทรี(ก)การแบ่งข้อมูลเป็นแปดออกแดนท์ (ข) Morton code	13
3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าระดับเทา (ก)เปลี่ยนที่พิกเซลที่10 (ข)ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขยายเป็น10พิกเซล.....	15
3.2 (ก)ขอบภาพแบบขั้นบันได,(ข) ขอบภาพแบบลาด.....	16
3.3 ตัวอย่างการหาขอบภาพ.....	16
3.4 (ก)ภาพตัดขวางของต้นไม้, (ข)ขอบภาพจากรูป ก.	17
3.5 ขอบภาพที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ Sobel และ Kirsch.....	20
3.6 ตำแหน่งของขอบภาพและการหาขอบภาพจากอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสอง.....	20
3.7 (ซ้าย) ขอบภาพแบบขั้นบันไดและ (ขวา) ผลตอบสนองจากตัวดำเนินการลาปลาเซียน.....	22
3.8 (ซ้าย) ขอบภาพแบบลาด (ขวา) ผลตอบสนองจากตัวดำเนินการลาปลาเซียน.....	22
3.9 ลักษณะของลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ในโดเมนระยะทางเมื่อใช้ฟิลเตอร์พารามิเตอร์มีค่าต่างๆ.....	24
3.10 ผังการทำงานของ การหาขอบภาพแบบ Marr.....	24
3.11 การหาขอบภาพแบบ Marr (ก)ขอบที่ได้จากการกำหนด σ มีค่าน้อย (ข)ขอบที่ได้จากการกำหนด σ มีค่ามาก (ค)ขอบภาพเมื่อพิจารณาทั้งสองสเกลประกอบกัน.....	24
3.12 ผังการทำงานของ Canny.....	25
3.13 ผังการทำงานของ การหาขอบภาพแบบ Shen และ Castan.....	27

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ก. การแปลงฟูเรียร์ของลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ในโดเมนระยะทาง ข. ลักษณะของลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ในโดเมนของความถี่เมื่อพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์มีค่าต่างๆ.....	30
4.2 ผังการทำงานของอัลกอริธึมในการหาขอบภาพของ Sundaram.....	31
4.3 ตัวอย่างของผลลัพธ์จากการทำควอดทรีดีคอมโพสิชัน.....	33
4.4 การหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติมัลติเรโซลูชัน DSCT.....	34
4.5 พื้นที่ต่างที่ใช้หาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณค่าเกรเดียนของตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงในทิศทางต่างๆ (ลูกศรด้านล่างแสดงถึงทิศทางที่เกิดซีโรครอสซิง).....	35
4.6 แผนผังการทำงานของกราดวหาพื้นผิว.....	36
4.7 แผนผังการทำงานของกราดหาพื้นผิวของแต่ละปริมาตรย่อย.....	36
4.8 การฉายแสงแบบขนาน.....	37
5.1 กราฟแสดงความถูกต้องของขอบภาพที่ได้จากอัลกอริธึมต่างๆ.....	41
5.2 กราฟแสดงความต่อเนื่องและความบางของขอบภาพที่ได้จากอัลกอริธึมต่างๆ.....	43
5.3 ภาพต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน, SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1.....	45
5.4 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมของ Marr (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน, SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1.....	46
5.5 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมของ Canny (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน, SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1.....	47
5.6 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมของ Shen (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน, SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1.....	48
5.7 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมของ Sundaram (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน, SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1.....	49
5.8 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึม M.DSCT (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน, SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1.....	50
5.9 ภาพต้นฉบับต่างๆ.....	51
5.10 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมต่างๆ.....	52
5.11 กราฟแสดงจำนวนพื้นที่ย่อยที่ทำการคำนวณอัลกอริธึมต่างๆ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณของอัลกอริทึมต่างๆ.....	54
5.13 ภาพผลลัพธ์จากอัลกอริทึมของ Sundaram เปรียบเทียบกับ M.DSCT1 และ M.DSCT2 ...	55
5.14 ภาพผลลัพธ์ของ (ก)ทรงกลม (ข)ลูกบาศก์ (ค)ทรงกระบอก (ง)ลูกบาศก์หมุน45องศา.....	56
5.15 ภาพผลลัพธ์ของภาพทรงกลมซ้อนกัน3ทรงกลมโดยให้ฉากรับภาพอยู่ที่กลางทรงกลม.....	56
5.16 ภาพผลลัพธ์ของภาพศรีระเด็ก เมื่อฉายภาพในทิศทางต่างกัน และฉากรับภาพอยู่ที่ (บน) $n=0$, (ล่าง) $n=128$ โดย n เป็นระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการฉายแสง.....	57



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การหาขอบภาพเป็นกระบวนการเบื้องต้นที่สำคัญกระบวนการหนึ่งในการวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis) ขอบภาพที่ได้จะเป็นขอบเขตระหว่างพื้นที่สองพื้นที่ในภาพที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน คุณสมบัติดังกล่าวคือค่าความเข้มของค่าระดับเทา (Grey level) ในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นการหาขอบภาพก็คือการหาดำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มดังกล่าวนั่นเอง ขอบภาพอาจเป็นตำแหน่งที่แบ่งระหว่างวัตถุกับวัตถุหรือวัตถุกับพื้นหลังก็ได้ ถ้าสามารถหาขอบภาพได้อย่างถูกต้อง เราก็จะสามารถเข้าใจถึงข้อมูลข่าวสารที่มีอยู่ในภาพนั้นได้มากขึ้น เช่น ตำแหน่งของวัตถุในภาพ และลักษณะพื้นฐานต่างๆของวัตถุในภาพเช่น ความกว้าง ความยาว เส้นรอบวง และพื้นที่ ของวัตถุ การที่สามารถเข้าใจคุณสมบัติของวัตถุในภาพจะมีประโยชน์มากในงานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น การมองเห็นของเครื่องจักร (Machine Vision), การรู้จำวัตถุ (Recognition)

จากอดีตถึงปัจจุบันการหาขอบภาพเป็นหัวข้อหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการพัฒนาอัลกอริทึมให้มีความถูกต้อง รวดเร็ว และสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี มีอัลกอริทึมต่าง ๆ มากมายที่ได้นำเสนอเพื่อใช้ในการหาขอบภาพ อัลกอริทึมเหล่านี้มีทั้งทำในโดเมนของระยะทางและโดเมนความถี่ อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมส่วนใหญ่ก็เป็นการพิจารณาหาขอบภาพโดยพิจารณาจากความละเอียดเดียวทั้งภาพ ถ้าสามารถพิจารณาภาพที่ละเอียดน้อยได้ก็จะสามารถหาขอบภาพได้ถูกต้อง และได้รายละเอียดของขอบภาพในแต่ละพื้นที่น้อยมากขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการวิจัย

จุดประสงค์ในการทำงานวิจัยนี้คือเพื่อนำเสนออัลกอริทึมใหม่เพื่อใช้ในการหาขอบภาพ อัลกอริทึมที่นำเสนอมีจุดประสงค์ที่จะลดการคำนวณลง โดยลดการสูญเสียในการคำนวณในบริเวณที่ไม่จำเป็น สามารถพิจารณาภาพแต่ละพื้นที่น้อยในความละเอียดต่างกัน(โดยการปรับพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ในภาพ) และทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการหาขอบภาพนั้น บางภาพที่มีส่วนของพื้นหลังมากขณะเดียวกันส่วนที่เป็นข้อมูลของภาพก็มีรายละเอียดที่ต้องการการพิจารณาหาขอบภาพในความละเอียดต่างกัน แนวความคิดของงานวิจัยนี้คือ ทำการแบ่งภาพเป็นพื้นที่น้อย เพื่อให้สามารถพิจารณาหาขอบภาพเฉพาะพื้นที่ที่มี

ข้อมูลของขอบภาพอยู่โดยไม่นำพื้นที่ที่เป็นพื้นหลังหรือพื้นที่ที่เป็นเนื้อเดียวกันมาพิจารณา แต่ละพื้นที่ที่พิจารณาว่ามีขอบภาพจะได้รับการสร้างฟิลเตอร์ที่เหมาะสมขึ้นมาเพื่อให้ได้ขอบภาพที่ถูกต้องมากขึ้น

ในการแบ่งภาพเป็นพื้นที่ย่อยนั้น ได้ใช้แนวคิดของโครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรี (Quadtree) เพื่อที่ตัดส่วนที่เป็นพื้นหลังออกให้เร็วที่สุด และเพื่อลดการคำนวณอีกทางหนึ่งอัลกอริทึมที่ใช้จึงทำในโดเมนของความถี่โดยใช้การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์ แทนการแปลงฟูเรียร์ในการแปลงภาพ (Transform) สำหรับการปรับคุณสมบัติของฟิลเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ในภาพนั้นทำได้โดยการปรับค่าฟิลเตอร์พารามิเตอร์โดยใช้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าระดับเทาในพื้นที่ที่พิจารณาเป็นตัวกำหนด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนออัลกอริทึมสำหรับการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของ มัลติรีโซลูชัน DSCT. ซึ่งทำในโดเมนความถี่และสามารถปรับคุณสมบัติของฟิลเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ต่างๆในภาพได้อย่างอัตโนมัติ โดยได้พิจารณาแบ่งรายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ออกเป็น 7 บท แต่ละบทจะมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาตลอดจนวัตถุประสงค์ และขอบเขตของการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีการโพรงภาพพื้นฐานที่จำเป็นในการหาขอบภาพคือ สัญญาณสองมิติ ระบบเชิงเส้น ผลตอบสนองเชิงความถี่ การแปลงฟูเรียร์ (Discrete Fourier Transform) การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์ (Discrete Symmetric Cosine Transform) และโครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรี (Quadtree) และออกทรี (Octree)

บทที่ 3 กล่าวถึงอัลกอริทึมของการหาขอบภาพแบบต่างๆที่ทำในโดเมนระยะทาง

บทที่ 4 นำเสนออัลกอริทึมในการหาขอบภาพของ Sundaram ซึ่งทำในโดเมนความถี่ จากนั้นจะนำเสนออัลกอริทึมใหม่ ซึ่งปรับปรุงจากอัลกอริทึมของ Sundaram โดยปรับฟิลเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ในภาพได้อย่างอัตโนมัติ ให้โครงสร้างข้อมูลควอดทรีมาช่วยในการลดการคำนวณในบริเวณที่ไม่จำเป็น และใช้การประมาณค่าเกรเดียนตามทิศทางของซีโรครอสซิงเพื่อให้ทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ในตอนท้ายของบทยังได้เสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมดังกล่าวในการหาพื้นผิวของข้อมูลภาพเชิงปริมาตร (Volumetric Image)

บทที่ 5 เสนอผลการทดลองเปรียบเทียบอัลกอริทึมการหาขอบภาพที่นำเสนอ กับอัลกอริทึมอื่นในแง่ต่างๆ เช่นความสามารถในการทนทานต่อสัญญาณรบกวน ลายละเอียดของขอบภาพที่ได้

การเพิ่มความเร็วในการหาขอบภาพโดยใช้โครงสร้างข้อมูลควอดทรี รวมทั้งในตอนท้ายได้เสนอผล
การทดลองการประยุกต์ใช้อัลกอริธึมในการหาพื้นผิวของข้อมูลเชิงปริมาตร
บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะถึงแนวทางในการทำวิจัยต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

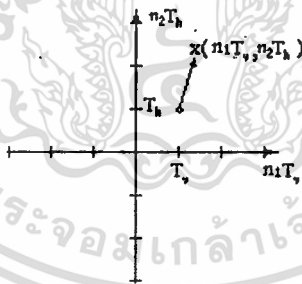
ทฤษฎีพื้นฐานของการทำการประมวลผลภาพ

2.1 บทนำ

การประมวลผลภาพ (Image Processing) ซึ่งเป็นสัญญาณสองมิตินั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการคำนวณแบบสองมิติ การหาขอบภาพก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่ต้องใช้การคำนวณแบบนี้ และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีของการประมวลผลภาพ ในบทนี้จะกล่าวถึงคำจำกัดความและทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่ใช้ในการประมวลผลภาพและเกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์นี้ เช่น ลักษณะของสัญญาณสองมิติ ผลตอบสนองของระบบเชิงเส้น การแปลงไปในโดเมนความถี่แบบต่างๆ และโครงสร้างของข้อมูลแบบควอดทรีและออกทรี เพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจสำหรับบทต่อไป

2.2 สัญญาณสองมิติ [1]

ตามปกติภาพดิจิทัลจะมีลักษณะเป็นอะเรย์ (Array) สองมิติซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบของข้อมูล ซึ่งเรียกว่าพิกเซล (Pixel) นั้น แต่ละพิกเซลในอะเรย์จะสามารถแสดงหรืออ้างถึงได้ในรูป $x(n_1T_r, n_2T_h)$ โดยที่ n_1, n_2 เป็นเลขจำนวนเต็ม และ T_r, T_h เป็นระยะทางที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง (sampling) ในแนวแกนตั้งและแนวนอนตามลำดับ หรือแสดงแบบสั้นได้ในรูป $x(n_1, n_2)$



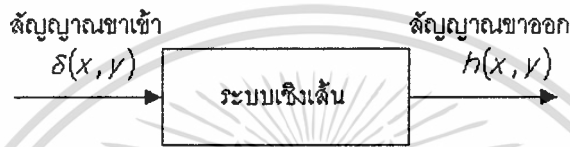
รูปที่ 2.1 การแสดงสัญญาณสองมิติโดเมนของระยะทาง

รูปที่ 2.1 ได้แสดงถึงการอ้างถึงตำแหน่งของแต่ละพิกเซลในภาพดิจิทัล โดยแต่ละพิกเซลในภาพจะเก็บค่าเป็นรหัสของสีหรือค่าความเข้มแสงที่เรียกว่าค่าระดับเทาโดยทั่วไปค่าระดับเทาจะมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มระหว่าง 0-255 ที่ใช้บอกถึงความสว่างที่ตำแหน่งพิกเซลนั้นโดย 0 เป็นสีดำ และ 255 เป็นสีขาว

ในการประมวลผลภาพดิจิทัลถึงแม้ว่าจะสามารถทำการประมวลผลแบบหนึ่งมิติได้ (คือทำการประมวลผลทีละแถวหรือคอลัมน์ตามลำดับ) แต่การทำการประมวลผลแบบหนึ่งมิติจะให้ผลดี

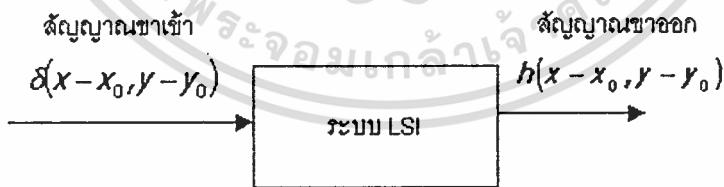
เฉพาะในทิศทางที่เป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของการประมวลผล ตัวอย่างเช่น ในการเน้นขอบภาพ (Edge Enhancement) โดยใช้ไฮพาส ฟิลเตอร์ (Highpass Filter) หนึ่งมิติ ถ้าทำที่ละแถว ทิศทางของขอบภาพที่ได้รับการเน้นมากที่สุดจะเป็นทิศทางในแนวตั้ง ในขณะที่ทิศทางของขอบภาพในแนวนอนจะไม่ได้รับการเน้นเลย และขอบภาพในทิศทางอื่นๆจะได้รับการเน้นในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ดังนั้นสัญญาณที่มีลักษณะเป็นสองมิติต้องได้รับการประมวลผลแบบสองมิติ เพื่อให้จะให้ทุกทิศทางของสัญญาณได้รับผลจากการประมวลผลอย่างเท่าเทียมกัน

2.3 ระบบเชิงเส้น [1],[4]



รูปที่ 2.2 ระบบเชิงเส้น

กระบวนการในการทำการประมวลผลภาพดิจิทัล หลายกระบวนการสามารถทำโดยใช้แบบจำลองของระบบเชิงเส้น (Linear System) ได้ ตามรูปที่ 2.2 ถ้าให้สัญญาณอินพุตของระบบเชิงเส้นเป็นสัญญาณอิมพัลส์ $\delta(x, y)$ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบ $h(x, y)$ จะเรียกว่าผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response) และถ้าระบบเชิงเส้นใดมีคุณสมบัติที่ผลตอบสนองของระบบไม่ขึ้นกับตำแหน่งของอิมพัลส์ด้วย ตามรูปที่ 2.3 จะเรียกระบบนั้นว่าระบบลิเนียร์ ชิฟ อินวาเรียนต์ (Linear Shift-Invariant System หรือ LSI System)



รูปที่ 2.3 การไม่ขึ้นกับตำแหน่งของระบบเชิงเส้น

ลักษณะที่สำคัญของระบบ ลิเนียร์ ชิฟ อินวาเรียนต์ใดๆคือ จะสามารถอธิบายคุณสมบัติของระบบได้โดยใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวเองตามรูปที่ 2.4 หมายความว่าถ้ารู้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ $h(x, y)$ จะสามารถหาสัญญาณเอาต์พุต $g(x, y)$ ของระบบได้จากการคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณอินพุต $f(x, y)$ กับผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ $h(x, y)$ ตามสมการที่ 2.1

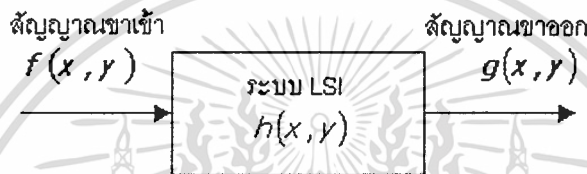
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (2.1)$$

คุณสมบัติอีกประการของระบบลิเนียร์ ชิฟ อินวาเรียนท์ สามารถแสดงได้ตามสมการ 2.2

$$a \times f_1(x, y) + b \times f_2(x, y) \Rightarrow a \times g_1(x, y) + b \times g_2(x, y) \quad (2.2)$$

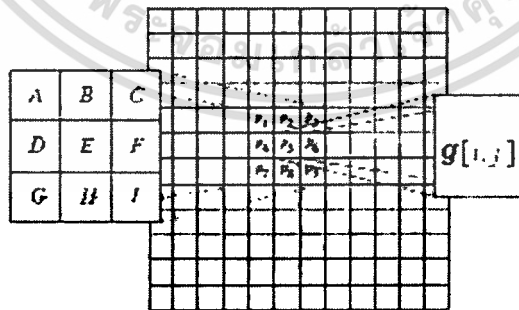
โดยที่ $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$ เป็นสัญญาณอินพุตของระบบและ $g_1(x, y)$, $g_2(x, y)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุตของ $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$ ตามลำดับ และ a , b เป็นค่าคงที่



รูปที่ 2.4 ระบบลิเนียร์ ชิฟ อินวาเรียนท์

การหาสัญญาณเอาต์พุตของระบบลิเนียร์ ชิฟ อินวาเรียนท์โดยการคอนโวลูชันตามสมการที่ 2.1 จะสามารถเขียนใหม่ได้ในรูปของฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องตามสมการที่ 2.3

$$g(x, y) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f(k, l) \cdot h(x - k, y - l) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 การคอนโวลูชันของภาพดิจิทัล

ในสมการที่ 2.3 ถ้าให้สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบ f และ g เป็นภาพดิจิทัล จะเห็นว่าการคอนโวลูชันจะเป็นการหาผลรวมของการคูณกันระหว่างค่าน้ำหนักในฟิลเตอร์หรือหน้าปกคอนโวลูชัน (Convolution Mask) กับพิกเซลที่ตรงกันในภาพ (ดูรูปที่ 2.5) โดยที่ผลตอบสนองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพัลส์ของระบบ $h(i, j)$ จะเป็นฟิลเตอร์ แต่ละพิกเซลของภาพผลลัพธ์ $g(i, j)$ จะหาค่าได้ตามสมการที่ 2.4

$$g(i, j) = Ap_1 + Bp_2 + Cp_3 + Dp_4 + Ep_5 + Fp_6 + Gp_7 + Hp_8 + Ip_9 \quad (2.4)$$

2.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ [1]

การหาสัญญาณเอาต์พุตของระบบลิเนียร์ ชีพ อินวาเรียนท์ในสมการที่ 2.3 ถ้าให้สัญญาณอินพุตของระบบเป็น $x(n_1, n_2) = e^{j(\omega_1 n_1 + \omega_2 n_2)}$ จะสามารถหาค่าสัญญาณเอาต์พุตจากระบบได้ตามสมการที่ 2.5 ถึง 2.7

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} \exp(j[\omega_1(n_1 - k_1) + \omega_2(n_2 - k_2)])h(k_1, k_2) \quad (2.5)$$

$$y(n_1, n_2) = e^{j(\omega_1 n_1 + \omega_2 n_2)} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega_1 k_1 + \omega_2 k_2)} h(k_1, k_2) \quad (2.6)$$

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2)H(\omega_1, \omega_2) \quad (2.7)$$

$H(\omega_1, \omega_2)$ ในสมการที่ 2.7 จะเรียกว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ของระบบและมีค่าตามสมการที่ 2.8

$$H(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} h(k_1, k_2) e^{-j(\omega_1 k_1 + \omega_2 k_2)} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 เราจะสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$H(\omega_1 + 2\pi, \omega_2) = H(\omega_1, \omega_2) \quad (2.9)$$

$$H(\omega_1, \omega_2 + 2\pi) = H(\omega_1, \omega_2) \quad (2.10)$$

$$H(\omega_1 + 2\pi, \omega_2 + 2\pi) = H(\omega_1, \omega_2) \quad (2.11)$$

สมการที่ 2.9 ถึง 2.11 แสดงให้เห็นว่า $H(\omega_1, \omega_2)$ จะมีค่าอยู่ในช่วง $(-\pi \leq \omega_1 \leq \pi)$ และ $(-\pi \leq \omega_2 \leq \pi)$ และมีลักษณะที่ซ้ำเป็นคาบ (Periodic) ในโดเมนความถี่ โดยมีคาบเท่ากับ 2π ทั้งในแกน ω_1, ω_2

2.5 การแปลงฟูรีเยร์ [1]

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 2.12

$$H(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} h(k_1, k_2) e^{-j(\omega_1 k_1 + \omega_2 k_2)} \quad (2.12)$$

อย่างไรก็ตาม ถ้าให้สัญญาณอินพุต $h(k_1, k_2)$ มีขนาดเท่ากับ $N \times N$ และมีค่าเฉพาะในช่วง $k_1 \geq 0$ และ $k_2 \geq 0$ แล้ว สมการที่ 2.12 จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$H(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k_1=0}^{N-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} h(k_1, k_2) e^{-j(\omega_1 k_1 + \omega_2 k_2)} \quad (2.13)$$

ผลตอบสนองเชิงความถี่ $H(\omega_1, \omega_2)$ ในสมการที่ 2.13 จะมีคุณสมบัติที่ซ้ำเป็นคาบและมีค่าอยู่ในช่วง $(0 \leq \omega_1 \leq 2\pi)$ และ $(0 \leq \omega_2 \leq 2\pi)$ ถ้าเราทำการสุ่มตัวอย่างตามแกน ω_1 และ ω_2 จำนวน $N \times N$ จุดจะสามารถเขียนได้ว่า

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{N} n_1 \quad \text{และ} \quad \omega_2 = \frac{2\pi}{N} n_2 \quad (2.14)$$

แทนค่า ω_1, ω_2 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้ว่า

$$H(n_1, n_2) = \sum_{k_1=0}^{N-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} h(k_1, k_2) e^{-j2\pi/N(n_1 k_1 + n_2 k_2)} \quad (2.15)$$

สมการที่ 2.15 เรียกว่าการแปลงฟูรีเยร์ (Discrete Fourier Transform หรือ DFT) สองมิติ ใช้ในการแปลงสัญญาณสองมิติจากโดเมนของระยะทางไปอยู่ในโดเมนของความถี่ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในงานหลายอย่างเช่น การฟิลเตอร์ภาพในโดเมนของความถี่, การบีบอัดภาพสำหรับสัญญาณหนึ่งมิติ การแปลงฟูรีเยร์และการแปลงกลับฟูรีเยร์ (Inverse Discrete Fourier Transform หรือ IDFT) สามารถทำได้ตามสมการที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j2\pi/N \cdot nk} \quad (2.16)$$

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{-j2\pi/N \cdot nk} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $f(n)$ เป็นสัญญาณในโดเมนของระยะทางและ $F(k)$ เป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ จำนวน N จุด คุณสมบัติที่สำคัญของการแปลงฟูเรียร์นั้นมีอยู่ 3 ข้อคือ

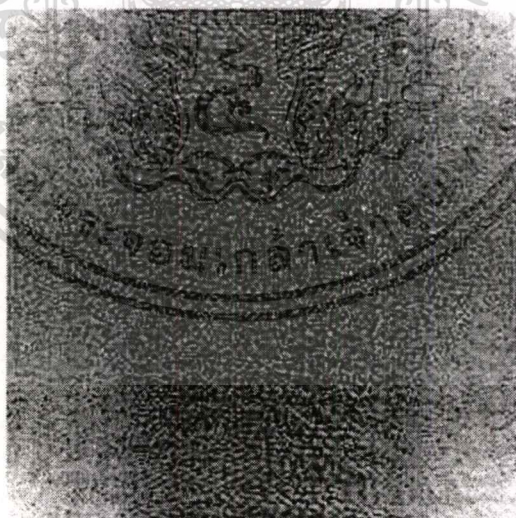
2.5.1 คุณสมบัติเชิงเส้น

คุณสมบัติเชิงเส้นของการแปลงฟูเรียร์สามารถเขียนได้ดังนี้ ถ้าให้สัญญาณ $f_1(n)$, $f_2(n)$ ซึ่งมีลักษณะซ้ำคาบสองสัญญาณ และสามารถรวมกันได้ตามสมการ $f_3(n) = af_1(n) + bf_2(n)$ โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ใดๆแล้ว การแปลงฟูเรียร์ของ $f_3(n)$ จะมีค่าตามตามสมการที่ 2.18 โดยที่ $F_3(k)$ เป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ของ $f_3(n)$

$$F_3(k) = aF_1(k) + bF_2(k) \quad (2.18)$$

2.5.2 คุณสมบัติสมมาตร

จากสมการที่ 2.16 เราจะสามารถพิสูจน์ได้ว่า $F(N-n) = F(n)^*$ โดยให้ $*$ หมายถึงการคอนจูเกตของจำนวนเชิงซ้อน นั่นคือขนาดของสัญญาณในโดเมนของความถี่ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์จะมีลักษณะที่สมมาตรกันระหว่างด้านซ้าย-ขวา และในทำนองเดียวกันในการแปลงฟูเรียร์ของภาพสองมิติ สัญญาณที่ได้ในโดเมนความถี่จะมีลักษณะที่สมมาตรกันทั้ง 4 มุม ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติสมมาตรของสัญญาณที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์สองมิติ

2.5.3 คุณสมบัติการซ้ำคาบของการคอนโวลูชัน

ให้ $F_1(k)$, $F_2(k)$ เป็นสัญญาณที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่ซ้ำเป็นคาบความยาว N จุด $f_1(n)$, $f_2(n)$ ตามลำดับ การแปลงกลับฟูเรียร์ของ ผลคูณจุดต่อจุดระหว่าง $F_1(k)$, $F_2(k)$ จะมีค่าตามสมการที่ 2.19 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณ $f_1(n)$, $f_2(n)$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_3(n) = IDFT(F_1(k) \cdot F_2(k)) = \sum_{n_1=0}^{N-1} f_1(n_1) f_2(n - n_1 - cN) \quad (2.19)$$

โดยที่ $0 \leq n \leq 2N - 1$ และ c เป็นค่าคงที่ใดๆ ดังนั้นถ้าจะใช้คุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ในการหาคอนโวลูชันของสัญญาณใดๆที่มีลักษณะไม่ซ้ำคาบ จะต้องเติมศูนย์ต่อท้ายสัญญาณทั้งสองให้เพียงพอ ถ้าสัญญาณทั้งสองในโดเมนของระยะทางมีความยาวเป็น A จุดและ B จุดตามลำดับ จะต้องเติมศูนย์ให้มีความยาวอย่างน้อยเท่ากับ $A+B-1$ จุด ในภาพสองมิติโดยทั่วไปถ้าภาพมีขนาด 256×256 จุดจะต้องเติมศูนย์ต่อท้ายทุกแถวและคอลัมน์ให้มีขนาดเป็น 512×512 จุด

โดยทั่วไปถ้าสัญญาณมีขนาดเล็ก การหาผลตอบสนองของระบบควรทำในโดเมนของระยะทาง(การคอนโวลูชัน) แต่ถ้าสัญญาณมีขนาดใหญ่(มากกว่า 9×9) การหาผลตอบสนองของระบบโดยทำในโดเมนความถี่จะสามารถประหยัดการคำนวณได้มากกว่า

2.6 การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์ [2]

การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์ (Discrete symmetric cosine transform หรือ DSCT.) ถูกคิดขึ้นโดย Hideo Kitayama [2] และต่อมา Sundaram [6],[7] ได้ใช้การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์แทนการแปลงฟูเรียร์ในการแปลงภาพสองมิติจากโดเมนของระยะทางไปในโดเมนความถี่

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วว่าการใช้คุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ในการทำคอนโวลูชันของสัญญาณใดๆต้องเติมศูนย์ให้เพียงพอ พิจารณาในกรณีของสัญญาณหนึ่งมิติ ถ้าให้ $f(n)$ เป็นสัญญาณความยาว N จุดในโดเมนของระยะทาง จากนั้นเติมศูนย์ให้มีความยาวเป็นสองเท่าของสัญญาณเดิม ตามสมการที่ 2.20

$$f(n) = \begin{cases} f(n) & , 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & , N \leq n \leq 2N-1 \end{cases} \quad (2.20)$$

จากนั้นทำการแปลงฟูเรียร์ของสมการที่ 2.20 จะได้ผลลัพธ์ตามสมการที่ 2.21

$$F(k) = \sum_{n=0}^{2N-1} f(n) e^{-j\pi / N \cdot nk} \quad (2.21)$$

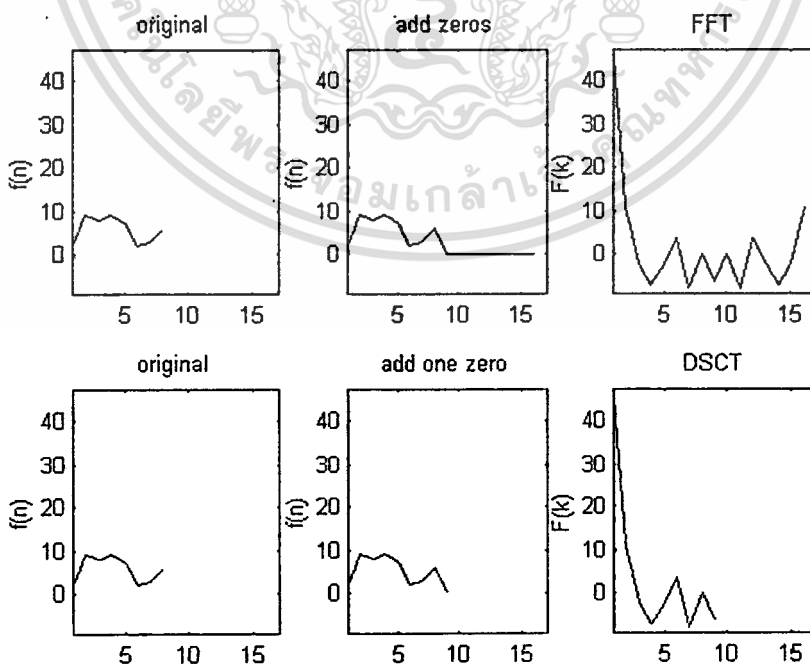
ส่วนจริงของสัญญาณ $F(k)$ จำนวน $N+1$ จุดแรกในสมการ 2.21 จะมีค่าเท่ากับ การแปลง ดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์ของสัญญาณเดียวกันที่เติมศูนย์ต่อท้ายสัญญาณเดิมหนึ่งตัว คือ $f(N) = 0$ การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.22

$$F(k) = \sum_{n=0}^N f(n) \cos\left(\frac{\pi kn}{N}\right) \quad (2.22)$$

โดยที่ $0 \leq k \leq N$ และการแปลงกลับดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์ (Inverse Discrete Symmetric Cosine Transform) ของสัญญาณในโดเมนความถี่ $F(k)$ จะมีค่าตามสมการที่ 2.23

$$f(n) = \frac{1}{(N+1)} \sum_{k=0}^N F(k) \cos\left(\frac{\pi kn}{N}\right) \quad (2.23)$$

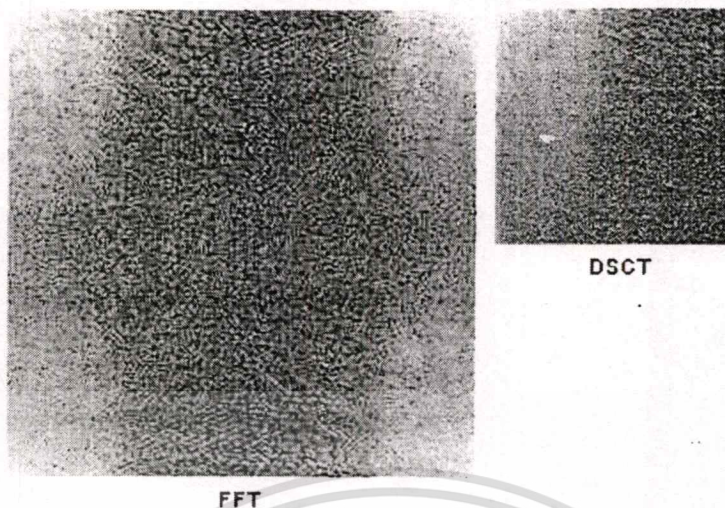
ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในกรณีของสัญญาณหนึ่งมิติ หากใช้การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์แปลงสัญญาณไปในโดเมนความถี่จะสามารถลดปริมาณของสัญญาณที่จะนำไปคำนวณลงได้ประมาณครึ่งหนึ่งตามรูปที่ 2.7 และเช่นเดียวกันกรณีของสัญญาณสองมิติจะสามารถลดจำนวนของสัญญาณได้เหลือประมาณหนึ่งในสี่ของจำนวนของสัญญาณที่ใช้ในการแปลงฟูเรียร์ตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การแปลงฟูเรียร์และการแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์ของสัญญาณหนึ่งมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การแปลงฟูเรียร์และการแปลงดิคคริต ซิมเมตริกซ์ โคไซน์ของสัญญาณสองมิติ

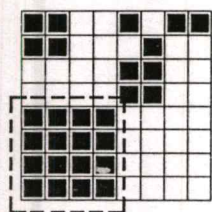
2.7 โครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรีและออกทรี [3],[10]

ในหัวข้อที่ผ่านมาเราได้แสดงโครงสร้างของข้อมูลภาพดิจิทัลในรูปของเมตริกซ์หรืออะเรย์ของพิกเซล n มิติ ซึ่งเรียกว่าการแสดงผลข้อมูลแบบราสเตอร์ (Raster Representation) อย่างไรก็ตามยังมีโครงสร้างของข้อมูลในรูปแบบอื่นซึ่งมีจุดประสงค์สองประการคือ หนึ่งต้องการเก็บข้อมูลภาพให้มีขนาดเล็กลง และสองในปัญหาบางอย่าง มีความต้องการระบุ (address) หรือเข้าถึงองค์ประกอบบางอย่างที่มีลักษณะเฉพาะในภาพโดยตรง ถ้าใช้โครงสร้างข้อมูลแบบราสเตอร์จะต้องสแกนหาทั้งภาพซึ่งต้องใช้เวลาดังนั้นการแสดงผลโครงสร้างข้อมูลที่สามารถอ้างถึงองค์ประกอบในภาพโดยมองเป็นซับเซต (Subset) ของเมตริกซ์ของพิกเซลในภาพโดยตรงจะเหมาะสมกว่า

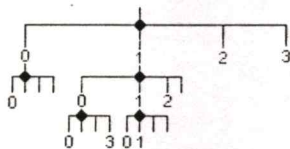
การแสดงผลโครงสร้างของข้อมูลในลักษณะดังกล่าว ถ้าข้อมูลเราเป็นภาพดิจิทัลสองมิติจะเรียกว่าการแสดงผลข้อมูลแบบควอดทรี (Quadtree Representation) ในทำนองเดียวกันถ้าข้อมูลของเราเป็นลำดับของภาพหลายภาพซึ่งในโครงสร้างข้อมูลแบบราสเตอร์จะถูกมองเป็นอะเรย์สามมิติ จะเรียกว่าการแสดงผลข้อมูลแบบออกทรี (Octree Representation) และกระบวนการที่ใช้แปลงโครงสร้างข้อมูลจากราสเตอร์จะเรียกว่าควอดทรีดีคอมโพสิชัน (Quadtree Decomposition) และออกทรีดีคอมโพสิชัน (Octree Decomposition) ตามลำดับ

กระบวนการควอดทรีดีคอมโพสิชันแสดงในรูปที่ 2.9 จะทำโดยแบ่งภาพออกเป็นสี่ควอดแรนท์ (Quadrant) ควอดแรนท์ใดที่ประกอบด้วยพิกเซลที่เป็นฮอโมจีเนียส (Homogeneous) จะถูกแบ่งเป็นสี่ควอดแรนท์ย่อยต่อไปเรื่อยๆ ส่วนควอดแรนท์ที่ประกอบด้วยพิกเซลที่เป็นฮอโมจีเนียส (Homogeneous) จะถูกเก็บไว้เป็นโหนดหนึ่งของควอดทรีด้วยรหัส 0 ถึง 3 ตามตำแหน่งของควอดแรนท์หรือพิกเซลในควอดแรนท์แม่ $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g)



(2)

000	001	010	011	100	101	110	111
002	003	012	013	102	103	112	113
020	021	030	031	120	121	130	131
022	023	032	033	122	123	132	133
200	201	210	211	300	301	310	311
202	203	212	213	302	303	312	313
220	221	230	231	320	321	330	331
222	223	232	233	322	323	332	333

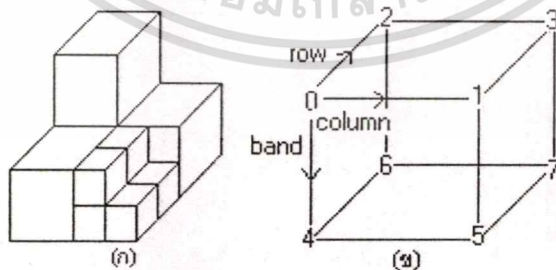
(ค)

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการทำควอดทรีดีคอมโพสิชันของภาพใบนารี

รูปที่ 2.9 ก. เป็นภาพไบนารีขนาด 8×8 เมื่อได้ก็ตามที่พบว่าในควอดแรนท์ประกอบด้วยพิกเซลสีดำหรือขาวทั้งหมดก็จะเก็บค่าไว้เป็นหนึ่งในหกในโครงสร้างควอดทรีเช่น พิกเซลที่อยู่ในกรอบเส้นประก็จะสามารถอ้างถึงด้วยรหัส $2 \times x$ โดย x เป็นรหัส 0 ถึง 3 ในกรณีที่ต้องการลดขนาดข้อมูลเราจะเก็บข้อมูลเฉพาะตำแหน่งของพิกเซลที่เป็นโฟกราวด์ (Foreground) หรือพิกเซลสีดำก็เพียงพอ รูปที่ 2.9 ข. แสดงโครงสร้างควอดทรีแต่ละโหนดของพิกเซลโฟกราวด์ รูปที่ 2.9 ค. แสดงถึงรหัสควอดทรีที่ใช้อ้างถึงแต่ละพิกเซลในภาพ จากตัวอย่างพิกเซลโฟกราวด์ในรูปที่ 2.9 ก. จะถูกอ้างถึงด้วยรหัส 000,001,100,110,111,002,003,103,120,121,122,123,200,201,210,211,202,203,212,213,220,221,230,231,222, 223,232 และ 233

ในการนี้ของข้อมูลสามมิติ กระบวนการออกทรีดีคอมโพสิชัน ทำโดยการแบ่งข้อมูลต้นฉบับ ออกเป็นแปดออกแดนท์ (Octant) แสดงในรูปที่ 2.10 ก. และตำแหน่งของแต่ละออกแดนท์ในออกแดนท์แม่ จะถูกเก็บด้วยรหัส 0 ถึง 7 ซึ่งเรียกว่า Morton code ตามรูปที่ 2.10 ข.

ในข้อมูลเชิงปริมาตรขนาด 256x256x256 จุดถ้าต้องการอ้างถึงตำแหน่งของข้อมูลแต่ละจุด ก็ต้องใช้เลข 8 บิตแต่ละบิตแทนด้วยเลข 0-7



รูปที่ 2.10 โครงสร้างข้อมูลแบบออกทรี(ก)การแบ่งข้อมูลเป็นแปดออกแทนท์ (ข) Morton code

2.8 สรุป

ในการหาสัญญาณเอาร์ทัพของระบบลิเนียร์ ชิพ อินวาเรียนท์นั้น ในโดเมนของระยะทางจะ

ทำโดยการคอนไวลชันระหว่างผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบกับสัญญาณอินพุต ส่วนในโดเมน
เอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่จะแทนที่การคอนโวลูชันด้วยการคูณกันระหว่างสัญญาณที่ถูกแปลงให้อยู่ในโดเมนของความถี่และผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ และในการแปลงสัญญาณใดๆไปในโดเมนของความถี่ ถ้าใช้การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์แทนการแปลงฟูเรียร์ ก็จะสามารถลดปริมาณของสัญญาณที่จะนำไปคำนวณลงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การหาขอบภาพในโดเมนของระยะทาง

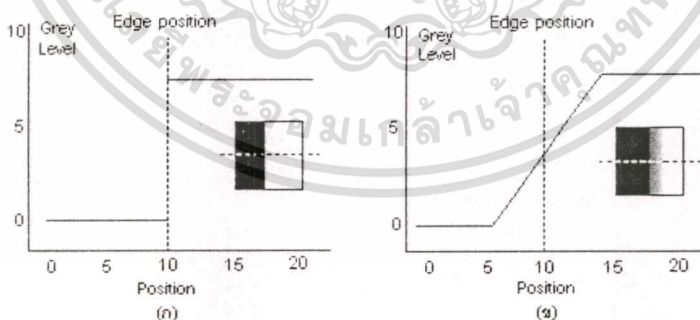
3.1 บทนำ

จากอดีตถึงปัจจุบัน ได้มีผู้คิดค้นและพัฒนาอัลกอริทึมต่างๆที่ใช้ในการหาขอบภาพมากมาย ดังนั้นเพื่อให้เห็นแนวโน้มและภาพรวมของงานวิจัยในการหาขอบภาพ เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง คำจำกัดความของขอบภาพ ต่อจากนั้นจะนำเสนออัลกอริทึมต่างๆที่ใช้หาขอบภาพ

3.2 ขอบภาพ [5]

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่1 ว่าขอบภาพคือการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความเข้มของค่าระดับเทา ดังนั้นคำจำกัดความของการหาขอบภาพคือการระบุถึงตำแหน่งของพิกเซลที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มดังกล่าว

ในการสร้างอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาขอบภาพนั้น ต้องเริ่มจากการให้คำจำกัดความรูปแบบของขอบภาพก่อน แล้วจึงใช้คำจำกัดความนั้นในการหาอัลกอริทึมที่เหมาะสมต่อไป มีคำจำกัดความมากมายถูกใช้ในการให้ความหมายของขอบภาพ แต่ที่ง่ายและใช้กันมากคือ ขอบภาพแบบขั้นบันไดอุดมคติ (Ideal Step Edge) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 ก. เป็นตัวอย่างของสัญญาณหนึ่งมิติที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในตำแหน่งที่แน่นอนเพียงตำแหน่งเดียว และถ้าการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากจะทำให้ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพสามารถถูกตรวจพบได้โดยง่าย

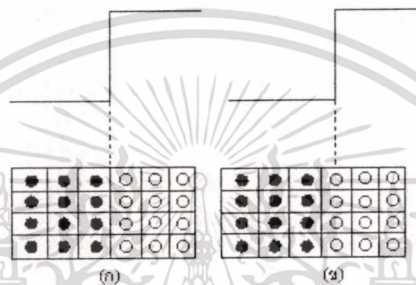


รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าระดับเทา (ก)เปลี่ยนที่พิกเซลที่10 (ข)ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขยายเป็น10พิกเซล

แต่โดยมากขอบภาพจะมีลักษณะที่เรียกว่าขอบภาพแบบลาด (Ramp Edge) ตามรูปที่ 3.1

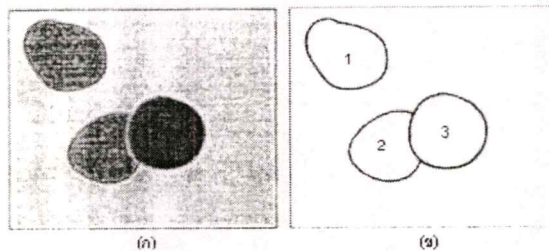
ข. สาเหตุของการที่ขอบภาพมีลักษณะที่ค่อยๆเปลี่ยนแปลงนี้เนื่องจากสาเหตุที่สำคัญสองประการ ประการแรกเกิดจากการสุ่มตัวอย่างที่ตำแหน่งของพิกเซลในภาพของอุปกรณ์ดิจิทัลไม่พอดีกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าเดิมขอบภาพจะปรากฏที่ด้านซ้ายสุดของพิกเซลที่มีสีขาว ถ้าเลื่อนกล้องไปทางซ้ายเป็นระยะทางครึ่งพิกเซล ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพที่เห็นจากกล้องก็จะเลื่อนมาทางขวามือเป็นระยะทางครึ่งพิกเซลเช่นกัน ผลที่ได้คือค่าความเข้มของพิกเซลในตำแหน่งที่เป็นขอบภาพจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างพิกเซลสีขาวและสีดำ ทำให้ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพมีลักษณะเบลอ และการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มจะเกิดขึ้นในช่วงจำกัดค่าหนึ่ง ซึ่งเราเรียกขอบภาพแบบนี้ว่าขอบภาพแบบลาด ประการที่สอง เกิดจากสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจเกิดได้จากสาเหตุหลายประการเช่น ความเข้มของแสง, ชนิดของกล้องและเลนส์, ความเคลื่อนไหวของวัตถุในภาพ, อุณหภูมิ, ฝุ่น และอื่นๆ



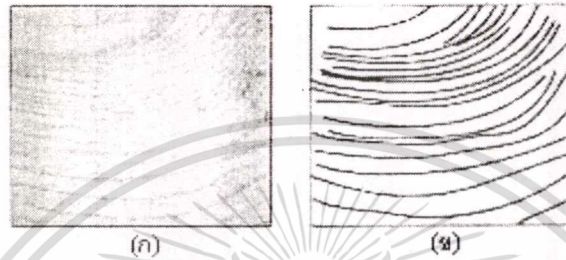
รูปที่ 3.2 (ก) ขอบภาพแบบขั้นบันได, (ข) ขอบภาพแบบลาด

ตัวอย่างของการหาขอบภาพแสดงในรูปที่ 3.3 โดยวัตถุ 2 ชิ้นซ้อนทับกันอยู่ โดยภาพ ก. เป็นภาพต้นฉบับ ส่วนภาพ ข. เป็นตำแหน่งที่เป็นขอบภาพจากภาพ ก. จากภาพ ข. จะแสดงให้เห็นถึงรูปร่างของวัตถุในภาพ สังเกตว่าขณะนี้เรายังไม่สามารถบอกได้ว่าส่วนไหนของภาพเป็นพื้นหลังและส่วนไหนเป็นวัตถุ บอกได้แต่เพียงตำแหน่งที่เป็นขอบเขตระหว่างวัตถุกับวัตถุหรือวัตถุกับพื้นหลัง อย่างไรก็ตามถ้าเราทราบว่าภาพต้นฉบับเป็นภาพเม็ดเลือด (คือทราบว่าวัตถุที่กำลังสนใจมีลักษณะกลม) เราจะสามารถบอกถึงข้อมูลต่างๆ ในภาพได้มากขึ้นตัวอย่างเช่นสามารถบอกได้ว่าส่วนใดในภาพเป็นเม็ดเลือด และเม็ดเลือดหมายเลข 3 ทับหมายเลข 2 อยู่ และอยู่ใกล้กล้องมากกว่า



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการหาขอบภาพ

การหาขอบภาพเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการที่เรียกว่า เซกเมนเตชัน (Segmentation) ซึ่งจะทำให้การแบ่งและระบุพื้นที่แต่ละพื้นที่ที่มีลักษณะหรือคุณสมบัติต่าง ๆ กัน การทำกระบวนการนี้ พื้นที่ต่างๆ ในภาพซึ่งอาจเป็นวัตถุต่างๆ จะถูกแยกจากกันด้วยขอบภาพและจะต้องถูกทำขั้นตอนอื่นต่อไปเพื่อจะระบุว่าแต่ละพื้นที่ในภาพเป็นวัตถุอะไร แต่ในบางครั้งการหาขอบภาพเพียงขั้นตอนเดียวก็เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับงานบางอย่าง โดยเฉพาะเมื่อวัตถุที่เราสนใจในภาพเป็นเส้นดังจะแสดงให้เห็นในตัวอย่างต่อไป



รูปที่ 3.4 (ก) ภาพตัดขวางของต้นไม้, (ข) ขอบภาพจากรูป ก.

พิจารณารูปที่ 3.4 ก. ซึ่งเป็นรูปภาพตัดขวางของต้นไม้ ในภาพเนื้อไม้จะประกอบด้วยวงปี ซึ่งเป็นส่วนที่เราสนใจในภาพ (ต้องการทราบจำนวน) จะเห็นว่าเมื่อต้องการทราบอายุของต้นไม้ สิ่งที่เราต้องทำมีเพียงหาขอบภาพ และนับจำนวนเส้นของวงปีเท่านั้น

3.3 ตัวดำเนินการอนุพันธ์ (Derivative Operators) [5]

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวดำเนินการอนุพันธ์ซึ่งจะให้ผลตอบสนองเป็นการหาค่าเกรเดียนของค่าระดับเทาที่แต่ละพิกเซลในภาพ ซึ่งจะมีค่ามากในบริเวณขอบภาพ (บริเวณที่ค่าระดับเทามีการเปลี่ยนแปลง) และมีค่าน้อยในบริเวณที่ค่าระดับเทามีค่าคงที่ ดังนั้นถ้าให้ภาพเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสองตัว $A(x,y)$ ค่าเกรเดียนของภาพที่ตำแหน่ง x, y ใดๆ จะมีค่าตามสมการที่ 3.1

$$\nabla A(x, y) = \left(\frac{\partial A}{\partial x}, \frac{\partial A}{\partial y} \right) \quad (3.1)$$

เนื่องจากภาพเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องจึงต้องเปลี่ยนการหาอนุพันธ์ย่อยเป็นการหาค่าความแตกต่างของค่าระดับเทา โดยการหาค่าความแตกต่างของค่าระดับเทาของภาพ ∇_1 ในทิศทาง x, y ใดๆ จะสามารถแสดงได้ตามสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

$$\nabla_{x,1} A(x, y) = A(x, y) - A(x - 1, y) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla_{y_1} A(x, y) = A(x, y) - A(x, y - 1) \quad (3.3)$$

โดยในการประมาณค่าเกรเดียนแบบนี้ใช้สมมติฐานว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับเทา ระหว่างพิกเซลเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นไม่ว่าจะหาอนุพันธ์ที่ตำแหน่งใดก็ได้ค่าความชันเท่ากัน แต่ก็เกิดปัญหาขึ้นคือการประมาณค่าอนุพันธ์ด้วยสมการที่ 3.2 และ 3.3 จะไม่ได้เป็นการประมาณค่าเกรเดียนที่ตำแหน่ง x, y แต่จะเป็นการประมาณค่าที่ตำแหน่ง $x-1/2, y-1/2$ ดังนั้นตำแหน่งของขอบภาพที่ได้จะเลื่อนไปในทิศทาง $-x$ และ $-y$ เป็นระยะทางครึ่งพิกเซล จึงได้มีการปรับปรุงโดยใช้ตัวดำเนินการ ∇_2 แทนโดยจะมีค่าดังนี้

$$\nabla_{x_2} A(x, y) = A(x + 1, y) - A(x - 1, y) \quad (3.4)$$

$$\nabla_{y_2} A(x, y) = A(x, y + 1) - A(x, y - 1) \quad (3.5)$$

จะเห็นว่าตัวดำเนินการ ∇_2 นี้จะสมมาตรที่ตำแหน่ง x, y และเป็นการประมาณค่าเกรเดียนที่ตำแหน่ง x, y ถึงแม้ว่าจะไม่ได้พิจารณาค่าระดับเทาที่ตำแหน่งดังกล่าวเลยก็ตาม

เมื่อใช้ตัวดำเนินการ ∇_2 ในการคำนวณค่าเกรเดียน ผลที่ได้จะเป็นเวกเตอร์ในทิศทางแกน x และ y คือ ∇_x, ∇_y ซึ่งจะบอกถึงข้อมูลของความแข็งแรง และทิศทางของขอบภาพที่ตำแหน่งนั้น โดยขนาดและทิศทางของเวกเตอร์รวมของ ∇_x, ∇_y จะเป็นค่าความแข็งแรงของขอบภาพหรือผลตอบสนองของขอบภาพ (Edge Response) และทิศทางของขอบภาพตามลำดับซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการที่ 3.6 และ 3.7

$$G_{mag} = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2} \quad (3.6)$$

$$G_{dir} = a \tan\left(\frac{\partial A}{\partial y} / \frac{\partial A}{\partial x}\right) \quad (3.7)$$

ในการหาขอบภาพโดยใช้ตัวดำเนินการอนุพันธ์นี้ พิกเซลที่ตำแหน่งใดมีค่าขนาดของเกรเดียนมากกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดไว้ ก็จะกำหนดให้เป็นพิกเซลของขอบภาพ

3.4 แบบจำลองของขอบภาพและตัวดำเนินการลาปลาเซียน [4],[5]

การหาขอบภาพแบบนี้ทำโดยใช้แบบจำลอง (Template) ขนาดเล็กของขอบภาพในทิศทางต่างๆเป็นหน้ากากคอนโวลูชันเพื่อนำมาคอนโวลูชันกับภาพต้นฉบับ แทนที่ใช้ตัวดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุพันธ์เพื่อหาเกรเดียนต์ที่ตำแหน่งต่างๆโดยตรงเหมือนในหัวข้อที่แล้ว อย่างไรก็ตามเป้าหมายหลักที่ใช้แบบจำลองของขอบภาพก็ยังเป็นการประมาณค่าเกรเดียนต์นั่นเอง ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างแบบจำลอง 2 แบบซึ่งได้รับการยอมรับว่าให้ผลดี และมีขนาดเล็กมาแสดง

แบบแรกคือ Sobel Edge Detector ใช้หน้ากากคอนโวลูชันขนาด 3×3 พิกเซล 2 ตัวในการหาเกรเดียนต์ในทิศทางแกน x และแกน y โดยมีค่าดังต่อไปนี้

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

สังเกตว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคอนโวลูชันจะเป็นการหาค่าเกรเดียนต์นั่นเอง โดยค่าน้ำหนักในทิศทางทแยงมุมจะมีค่าน้อยกว่าค่าน้ำหนักในทิศทางแกนตั้งและแกนนอน ส่วนประกอบในทางแกน x คือ s_x และส่วนประกอบในทางแกน y คือ s_y จะนำไปใช้หาขนาดและทิศทางของเกรเดียนต์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6 และ 3.7

หลังจากคอนโวลูชันแล้วทุกพิกเซลจะมีค่าขนาดของเกรเดียนต์ ถ้าพิกเซลใดมีค่ามากกว่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ก็จะเป็นพิกเซลของขอบภาพ วิธีที่ดีที่สุดในการหาขนาดของเกรเดียนต์สามารถทำตามสมการที่ 3.6 แต่จากสมการจะเห็นว่าต้องเกี่ยวข้องกับการถอดรากที่สอง และผลที่ได้ยังเป็นเลขทศนิยมด้วย เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณเราสามารถเลือกวิธีหาขนาดของเกรเดียนต์อีกวิธีหนึ่งแทนได้ โดยให้เท่ากับผลรวมของค่าสมบูรณ์ของ s_x และ s_y (คือ $|s_x| + |s_y|$) หรือค่าที่มากที่สุดระหว่างสองค่า s_x และ s_y ก็ได้

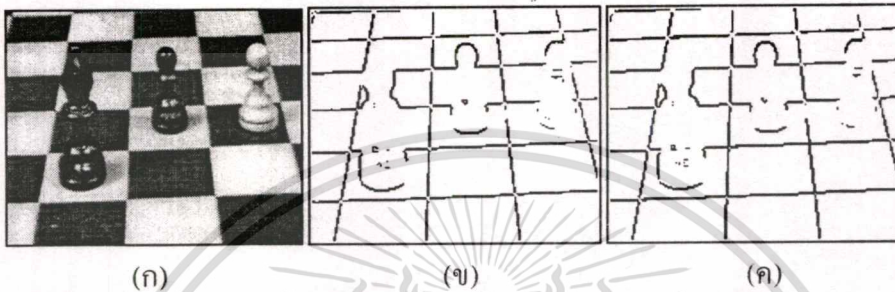
ตัวอย่างที่สองทำโดย Kirsch หน้ากากคอนโวลูชันจะมีขนาด 3×3 เช่นเดียวกับ Sobel แต่ทำในหลายทิศทางมากกว่า โดยหน้ากากคอนโวลูชันทั้งแปดตัวมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} K0 &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix} & K1 &= \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} & K2 &= \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} & K3 &= \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \\ K4 &= \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix} & K5 &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix} & K6 &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} & K7 &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

หน้ากากคอนโวลูชันชนิดนี้พยายามที่จะจำลองชนิดของการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับเทาให้มีหลายทิศทางเหมือนกับขอบภาพมากที่สุด จะเห็นว่าหน้ากากคอนโวลูชันหนึ่งตัวถูกใช้สำหรับแทนทิศทาง 1 ใน 8 ของวงกลม (45 องศา) ตัวอย่างเช่นถ้าผลตอบสนองจาก $K0$ มีค่ามากจะสามารถบอกได้ว่ามีขอบในแนวตั้ง (เกรเดียนต์ในแนวนอน) ที่ตำแหน่งพิกเซลกลางของแบบจำลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

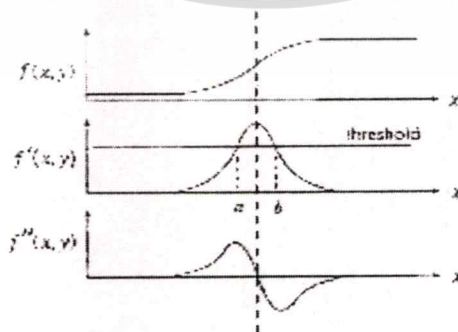
ในการหาขอบภาพ ภาพต้นฉบับจะต้องคอนโวลูชันกับหน้ากากทุกตัว ขนาดของผลตอบสนองที่ตำแหน่งใดๆ ให้มีค่าเท่ากับผลตอบสนองที่มีค่ามากที่สุดของแบบจำลองทั้ง 8 และทิศทางขอบภาพจะมีค่าเท่ากับ $\pi/4 \cdot t$ โดย t เป็นเลขที่ของแบบจำลองที่ให้ผลตอบสนองมากที่สุด

ตัวอย่างของภาพผลลัพธ์ของการหาขอบภาพโดยใช้แบบจำลองของ Sobel และ Kirsch เป็นหน้ากากคอนโวลูชันแสดงตามรูปที่ 3.5 โดย ก. ภาพต้นฉบับ ข. ภาพขอบที่ได้จากวิธีของ Sobel ค. ภาพขอบที่ได้จากวิธีของ Kirsch



รูปที่ 3.5 ขอบภาพที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ Sobel และ Kirsch

จะเห็นได้ว่าการหาขอบภาพที่ได้จากค่าเกรเดียนในรูปแบบต่างๆ ที่กล่าวไปแล้ว จะหาโดยใช้ค่าเทรชโฮลด์ค่าหนึ่งเป็นตัวตัดสินว่าจะเป็นตำแหน่งที่พิจารณาเป็นขอบภาพหรือไม่ โดยถ้าตำแหน่งดังกล่าวมีค่าเกรเดียนสูงกว่าเทรชโฮลด์ก็จะกำหนดให้เป็นขอบภาพ ทำให้ผลที่ได้ออกมา มีตำแหน่งที่เป็นขอบภาพอยู่จำนวนมาก (คือขอบภาพจะมีลักษณะเป็นเส้นหนา) ซึ่งไม่เป็นผลดี มีวิธีการที่จะแก้ไขการที่มีขอบภาพจำนวนมากได้คือ การให้เฉพาะจุดที่มีค่าเกรเดียนสูงสุดในบริเวณนั้นเป็นขอบภาพ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งหมายความว่าตำแหน่งที่เป็นขอบภาพจะต้องมีค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่สูงที่สุดหรือจะต้องเป็นตำแหน่งที่เกิดซีโร่ ครอสซิง (Zero Crossing) ของอนุพันธ์อันดับที่สองของค่าความเข้มของค่าระดับเทาในภาพ



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งของขอบภาพและการหาขอบภาพจากอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสอง

พิจารณาตัวดำเนินการลาปลาเซียนที่เมื่อคอนโวลูชันกับสัญญาณใดๆจะให้ผลตอบสนองเท่ากับการหาอนุพันธ์อันดับสองของสัญญาณนั้น ถ้าให้ f เป็นฟังก์ชันสองมิติของตัวแปร x, y ใดๆ ลาปลาเซียนของฟังก์ชัน f จะหาค่าได้จากสมการที่ 3.8

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (3.8)$$

ในการสร้างหน้ากากคอนโวลูชันของตัวดำเนินการลาปลาเซียนนั้น ค่าอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชัน f ตามทิศทางแกน x และแกน y สามารถประมาณได้โดยใช้ความต่างแหนดังนี้

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial G_x}{\partial x} \quad (3.9)$$

$$= \frac{\partial(f[i, j+1] - f[i, j])}{\partial x} \quad (3.10)$$

$$= \frac{\partial f[i, j+1]}{\partial x} - \frac{\partial f[i, j]}{\partial x} \quad (3.11)$$

$$= (f[i, j+2] - f[i, j+1]) - (f[i, j+1] - f[i, j]) \quad (3.12)$$

$$= f[i, j+2] - 2f[i, j+1] + f[i, j] \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 จะเห็นว่าเป็นการประมาณค่าตัวดำเนินการลาปลาเซียนโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่ง $i, j+1$ แต่เนื่องจากเราต้องการประมาณค่าที่ตำแหน่ง i, j จึงต้องแทนค่า j ด้วย $j-1$ และจะได้ค่าตามสมการที่ 3.14

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f[i, j+1] - 2f[i, j] + f[i, j-1] \quad (3.14)$$

เช่นเดียวกับการประมาณค่าในทิศทางแกน y จะมีค่าตามสมการที่ 3.15

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f[i+1, j] - 2f[i, j] + f[i-1, j] \quad (3.15)$$

และโดยการรวมกันของสมการที่ 3.14 และ 3.15 ทำให้ได้ตัวดำเนินการที่ใช้ประมาณค่าหน้ากากคอนโวลูชันของตัวดำเนินการลาปลาเซียนในสองมิติดังนี้

$$\nabla^2 \approx \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ผลที่ได้จากการคอนโวลูชันจะถูกนำไปหาขอบภาพจากตำแหน่งที่เกิด ซีโร่ ครอสซิง (Zero Crossing) พิจารณาตัวอย่างของการหาขอบภาพในรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงผลตอบสนองของการใช้ตัวดำเนินการลาปลาเซียนคอนโวลูชันกับขอบภาพแบบขั้นบันไดอุดมคติ จะเห็นว่าผลที่ได้แสดงตำแหน่งที่เกิด ซีโร่ ครอสซิง จะอยู่ระหว่างพิกเซลตรงกลางสองพิกเซล อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่เป็นขอบภาพจะต้องอยู่ที่พิกเซลด้านใดด้านหนึ่ง ในกรณีนี้ถ้าต้องการหาตำแหน่งที่เป็นขอบภาพที่แท้จริงต้องทำการอินเตอร์โพล (Interpolate) ระหว่างค่าระดับเทาทั้งสองค่าเพื่อหาตำแหน่งที่เป็นขอบภาพที่แท้จริง อย่างไรก็ตามขอบภาพแบบขั้นบันไดอุดมคตินี้จะสามารถพบได้น้อยมากตามเหตุผลที่กล่าวไปแล้ว ตัวอย่างต่อไปจะเป็นกรณีที่พบได้มากในภาพทั่วไป พิจารณารูปที่ 3.8 แสดงผลตอบสนองของการใช้ตัวดำเนินการลาปลาเซียนคอนโวลูชันกับขอบภาพแบบลาดจะเห็นว่าผลที่ได้แสดงตำแหน่งที่เป็นขอบภาพจะอยู่ตรงกลางพอดี

2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	8	0	0	0	6	-6	0	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	8	0	0	0	6	-6	0	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	8	0	0	0	6	-6	0	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	8	0	0	0	6	-6	0	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	8	0	0	0	6	-6	0	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	8	0	0	0	6	-6	0	0	0

รูปที่ 3.7 (ซ้าย) ขอบภาพแบบขั้นบันไดและ (ขวา) ผลตอบสนองจากตัวดำเนินการลาปลาเซียน

2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	0	0	0	3	0	-3	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	0	0	0	3	0	-3	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	0	0	0	3	0	-3	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	0	0	0	3	0	-3	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	0	0	0	3	0	-3	0	0
2	2	2	2	2	5	5	8	8	8	0	0	0	3	0	-3	0	0

รูปที่ 3.8 (ซ้าย) ขอบภาพแบบลาด (ขวา) ผลตอบสนองจากตัวดำเนินการลาปลาเซียน

3.5 อัลกอริทึมของ Marr และ Hildreth [5]

เนื่องจากขอบภาพที่เราได้จากตำแหน่งที่เกิดซีโร่ครอสซิง โดยใช้ตัวดำเนินการลาปลาเซียนในการหาของอนุพันธ์อันดับสองของค่าความเข้มของค่าระดับเทาของภาพ จะมีขอบภาพปลอมเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเนื่องจากสัญญาณรบกวนในภาพ ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดสัญญาณรบกวนในภาพออกไปเสียก่อน การลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนดังกล่าวทำได้โดยใช้โลว์พาส ฟิลเตอร์ (Lowpass Filter) คอนโวลูชันกับภาพต้นฉบับ

Marr และ Hildreth ได้สร้างหน้ากากคอนโวลูชันแบบใหม่ขึ้นมา ซึ่งประกอบด้วยตัวดำเนินการลาปลาเซียนทำหน้าที่เน้น (Enhance) ขอบภาพ และเกาส์เซียนฟิลเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ในการลดสัญญาณรบกวน (Smoothing) เรียกว่า ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ (Laplacian of Gaussian Filter)

การหาขอบภาพวิธีนี้ภาพต้นฉบับจะต้องทำการคอนโวลูชันกับเกาส์เซียนฟิลเตอร์เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนออกไป หลังจากนั้นจึงนำไปหาอนุพันธ์อันดับสองโดยการคอนโวลูชันกับตัวดำเนินการลาปลาเซียน แล้วหาดำแหน่งที่เป็นขอบภาพจากตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง แต่ Marr ได้สรุปว่าในภาพโดยทั่วไปนั้น ส่วนที่สนใจ (Feature of Interest) จะเกิดขึ้นในหลายสเกล (Scale) และไม่มีตัวดำเนินการใดที่สามารถให้ผลดีในทุกสเกลได้ ดังนั้นอัลกอริธึมของ Marr จึงต้องใช้สมูทติงฟิลเตอร์หลายสเกล โดยใช้เกาส์เซียนฟิลเตอร์สองตัวที่มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่างกัน (ใช้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกาส์เซียนฟิลเตอร์จะเป็นตัวปรับสเกล) แล้วนำผลที่ได้ (ตำแหน่งของขอบภาพ) มาพิจารณาประกอบกัน โดยตำแหน่งใดที่ผลตอบสนองของตัวดำเนินการลาปลาเซียนเกิดซีโรครอสซิงทั้งสองสเกล จึงจะให้ตำแหน่งนั้นเป็นขอบภาพที่แท้จริง ตัวดำเนินการลาปลาเซียนนั้นมีค่าตามสมการที่ 3.8 ส่วนเกาส์เซียนฟิลเตอร์สองมิติจะมีค่าตามสมการ 3.16

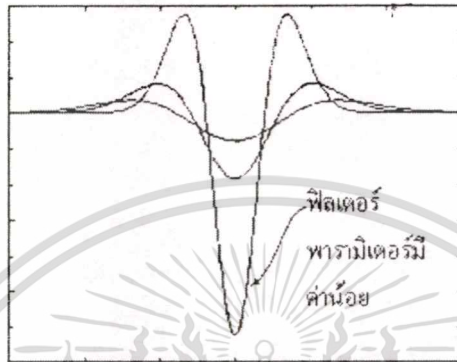
$$G_{\sigma}(x, y) = \sigma^2 e^{\left(\frac{-(x^2 + y^2)}{\sigma^2}\right)} \quad (3.16)$$

อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ลำดับของตัวดำเนินการลาปลาเซียน และเกาส์เซียนฟิลเตอร์จะไม่มีผล ดังนั้นเพื่อความสะดวกสามารถรวมตัวดำเนินการลาปลาเซียน เข้ากับเกาส์เซียนฟิลเตอร์เป็นฟิลเตอร์ตัวเดียวเรียกว่า ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียน ฟิลเตอร์ได้และมีค่าตามสมการที่ 3.17

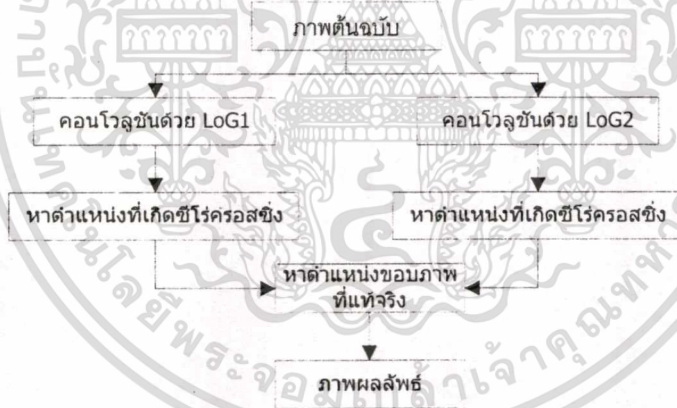
$$\nabla^2 G_{\sigma} = \left(\frac{r^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4}\right) e^{\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (3.17)$$

โดยที่ $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ดังนั้นการหาขอบภาพวิธีนี้สามารถทำได้โดยใช้ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียน ฟิลเตอร์ตามสมการที่ 3.17 ไปคอนโวลูชันกับภาพแล้วหาดำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง จากนั้นเปลี่ยนสเกลที่พิจารณาโดยเปลี่ยนค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ในสมการ 3.17 แล้วทำขบวนการเดิมซ้ำอีกครั้ง ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพจะได้จากตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงทั้งสองสเกล รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนในโดเมนของระยะทางเมื่อเปลี่ยนค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานให้มีค่าต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อย

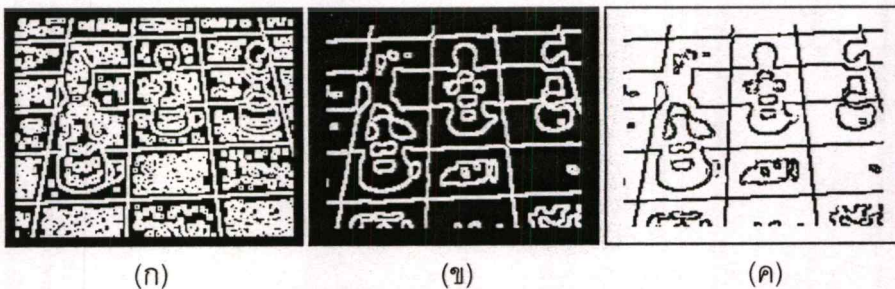
จะทำให้ขนาด (ความกว้าง) ของฟิลเตอร์มีค่าน้อยทำให้ระดับของการสมูทมีค่าน้อย และถ้าให้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่ามากจะทำให้ขนาดของฟิลเตอร์มีค่ามากตามไปด้วยเช่นกันทำให้ระดับของการสมูทจะมีค่ามากและตำแหน่งของขอบภาพที่ได้ก็จะมีจำนวนน้อย รูปที่ 3.10 แสดงผังการทำงานของ การหาขอบภาพ Marr และรูปที่ 3.11 แสดงผลที่ได้จากแต่ละขั้นตอนของการหาขอบโดยใช้อัลกอริทึมของ Marr



รูปที่ 3.9 ลักษณะของลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ในโดเมนระยะทางเมื่อใช้ฟิลเตอร์พารามิเตอร์มีค่าต่างๆ



รูปที่ 3.10 ผังการทำงานของ การหาขอบภาพแบบ Marr



รูปที่ 3.11 การหาขอบภาพแบบ Marr (ก)ขอบที่ได้จากการกำหนด σ มีค่าน้อย (ข)ขอบที่ได้จากการกำหนด σ มีค่ามาก (ค)ขอบภาพเมื่อพิจารณาทั้งสองสเกลประกอบกัน

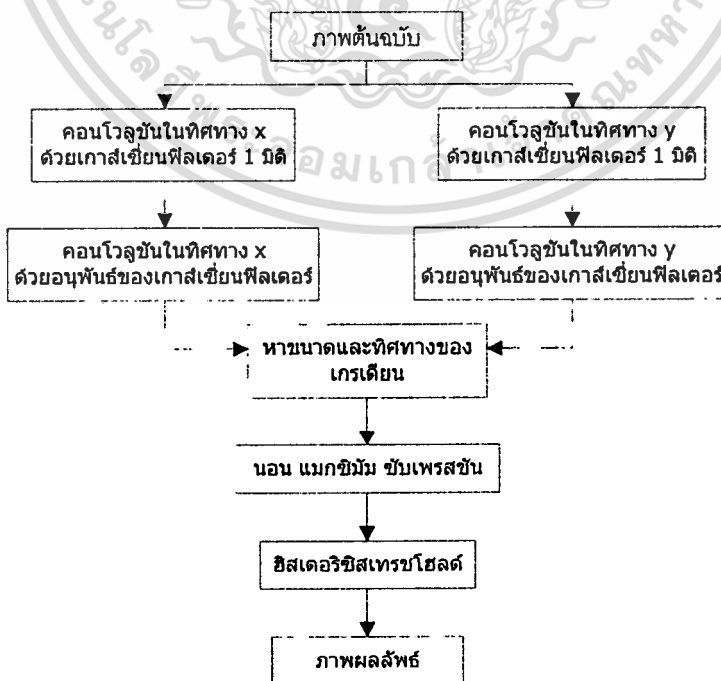
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 อัลกอริทึมของ Canny [5]

วิธีการในการหาขอบภาพของ Canny ทำโดยใช้หน้ากากคอนโวลูชันที่เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเกาส์เซียนฟิลเตอร์ ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 3.18

$$G'(x) = \left(-\frac{x}{\sigma^2} \right) e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (3.18)$$

อัลกอริทึมของ Canny จะใช้การทำคอนโวลูชันหนึ่งมิติโดยเริ่มจากคอนโวลูชันระหว่างภาพต้นฉบับกับเกาส์เซียนฟิลเตอร์ หลังจากนั้นคอนโวลูชันกับอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเกาส์เซียนฟิลเตอร์อีกครั้ง โดยในการทำคอนโวลูชันจะแยกทำในแกน x แกน y อย่างละครั้ง ผลที่ได้จะเป็นส่วนประกอบทางแกน x (I'_x) และ y (I'_y) ตามลำดับ ส่วนประกอบทั้งสองนี้จะนำไปคำนวณหาขนาดและทิศทางของเกรเดียนที่แต่ละพิกเซลได้ตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ จากนั้นนำไปทำกระบวนการนอน-แมกซิมัม ซัปเพรสชัน (Nonmaximum Suppression) โดยกระบวนการนี้จะหาพิกเซลที่มีขนาดของเกรเดียนตามทิศทางที่ตำแหน่งนั้นมากที่สุด จากนั้นพิกเซลดังกล่าวจะนำไปทำกระบวนการฮิสเทอรีซิส เทรชโฮลด์ (Hysteresis Threshold) โดยกำหนดค่าเทรชโฮลด์ขึ้นมาสองค่าโดยค่ามากเป็น T_h และค่าน้อยเป็น T_l พิกเซลใดมีขนาดของเกรเดียนมากกว่า T_h จะให้เป็นขอบภาพ จากนั้นพิกเซลใดที่อยู่ติดกับพิกเซลที่เป็นขอบภาพและมีความมากกว่า T_l จะให้เป็นขอบภาพเช่นกัน ผังการทำงานของ Canny แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ผังการทำงานของ Canny

3.7 อัลกอริธึมของ Shen และ Castan [5]

Shen และ Castan ได้ใช้หน้ากากคอนโวลูชันหรือฟิลเตอร์ที่มีชื่อเรียกว่า Infinite Symmetric Exponential Filter หรือ ISEF ในการคอนโวลูชันระหว่างภาพต้นฉบับกับ ISEF จะทำแบบซ้ำ (Recursive) ซึ่งทำได้ดังนี้

ในทางแกน x จะได้ผลตอบสนองเป็น $r[i, j] = y_1[i, j] + y_2[i, j + 1]$ ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

$$y_1[i, j] = \frac{1-b}{1+b} I[i, j] + b y_1[i, j - 1], j = 1 \dots N, i = 1 \dots M \quad (3.19)$$

$$y_2[i, j] = b \frac{1-b}{1+b} I[i, j] + b y_1[i, j - 1], j = 1 \dots N, i = 1 \dots M \quad (3.20)$$

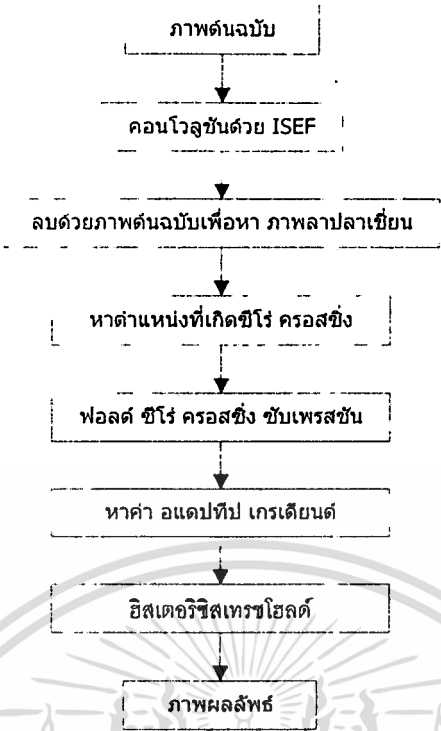
จากนั้นนำ $r[i, j]$ ไปหาผลตอบสนองทางแกน y, $y[i, j] = y_3[i, j] + y_4[i + 1, j]$ ดังนี้

$$y_3[i, j] = \frac{1-b}{1+b} r[i, j] + b y_3[i - 1, j], j = 1 \dots N, i = 1 \dots M \quad (3.21)$$

$$y_4[i, j] = b \frac{1-b}{1+b} r[i, j] + b y_3[i + 1, j], j = 1 \dots N, i = 1 \dots M \quad (3.22)$$

โดยที่ข้อกำหนด $I[i, 0] = I[0, j] = 0, y_1[i, 0] = 0, y_2[i, M + 1] = 0, y_3[0, j] = 0$ และ $y_4[N + 1, j] = 0$

ภาพที่ได้จากการฟิลเตอร์ $y[i, j]$ จะถูกนำไปประมาณค่าของลาปลาเซียน โดยการนำไปลบกับภาพต้นฉบับ $I[i, j]$ แล้วหาขอบภาพจากตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง จากนั้นจะเป็นการปรับปรุงขอบภาพที่ได้โดยการตัดส่วนที่เป็นขอบภาพปลอม (False Edge)ทิ้ง โดยขั้นแรกเรียกว่า False Zero-Crossing Suppression วิธีนี้ทำโดยตั้งสมมติฐานว่า ในตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงจากบวกเป็นลบ (Positive Zero-Crossing) นั้นจะต้องตรงกับตำแหน่งที่มีค่าเกรเดียนต์ที่จุดนั้นเป็นบวก และในตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงจากลบเป็นบวก (Negative Zero-Crossing) จะต้องตรงกับตำแหน่งที่มีค่าเกรเดียนต์ที่จุดนั้นเป็นลบ ดังนั้นตำแหน่งใดที่ไม่เป็นตามเงื่อนไขนี้จะตัดทิ้ง ขั้นที่สอง พิกเซลที่เป็นขอบภาพจะได้รับค่าเกรเดียนต์โดยค่าเกรเดียนต์นี้จะปรับตามแต่ละพื้นที่ในภาพ (Adaptive Gradient) จากนั้นตำแหน่งที่เป็นขอบภาพนี้จะถูกทำการเทรชโฮลด์อีกครั้งโดยใช้วิธีฮิสเตอรีซิส เทรชโฮลด์ (Hysteresis Threshold) เช่นเดียวกับในอัลกอริธึมของ Canny ซึ่งการใช้ค่าเกรเดียนต์แบบปรับได้รวมกับการทำเทรชโฮลด์แบบนี้จะมีประโยชน์มากโดยเฉพาะเมื่อภาพต้นฉบับมีสัญญาณรบกวนมาก



รูปที่ 3.13 ผังการทำงานของ การหาขอบภาพแบบ Shen และ Castan

3.8 สรุป

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบขั้นตอนในการหาขอบของ Marr, Canny และ Shen

อัลกอริธึม	หน้ากากคอนโวลูชัน	การหาตำแหน่งขอบภาพ	การปรับปรุงขอบภาพ
Marr-Hildreth	LoG. Filter	ซีไร์ครอสซิง	ทำสองครั้ง(สองสเกล)
Canny	Derivative of Gaussian Filter	ตำแหน่งที่เกรเดียนต์มีค่าสูงสุด	ฮิสเตอร์ริซิส เทรชโฮลด์
Shen-Castan	ISEF.	ซีไร์ครอสซิง	ฮิสเตอร์ริซิส เทรชโฮลด์

จากเนื้อหาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า อัลกอริธึมในการหาขอบภาพจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ สามขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการเน้นขอบภาพ (Edge Enhancement) ซึ่งเป็นการเน้นให้ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพเด่นชัด และสามารถตรวจพบได้ง่ายขึ้น ทำโดยการคอนโวลูชันระหว่างภาพต้นฉบับกับหน้ากากคอนโวลูชัน ซึ่งในแต่ละอัลกอริธึมก็จะใช้หน้ากากคอนโวลูชันต่างกัน ขั้นตอน

ที่สอง คือ การหาตำแหน่งที่เป็นขอบภาพ ซึ่งมีหลายวิธีเช่นหาจากตำแหน่งที่เกิดซีไร้ ครอสซิง, หาจากตำแหน่งที่มีค่าเกรเดียนมากที่สุด ขึ้นอยู่กับหน้ากาคอนโวลูชันที่ใช้ ขั้นตอนที่สามจะเป็นการปรับปรุงขอบภาพที่ได้ ตารางที่3.1 จะเปรียบเทียบขั้นตอนต่างๆที่ใช้ในอัลกอริธึมของMarr, Canny และ Shen



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติเรโซลูชันDST

4.1 บทนำ

อัลกอริทึมในการหาขอบภาพต่างๆที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 เป็นอัลกอริทึมที่ทำในโดเมนของระยะทาง Sundaram[6],[7] ได้เสนออัลกอริทึมในการหาขอบภาพโดยทำในโดเมนความถี่ ซึ่งจะเปลี่ยนการคอนโวลูชันเป็นการคูณ ทำให้สามารถลดการคำนวณลงได้ และยังสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ในแต่ละพื้นที่ของภาพโดยใช้วิธีการแบบรีเคอร์ซีฟ (Recursive) ด้วย การปรับค่าพารามิเตอร์นี้เป็นผลดี แต่การทำแบบรีเคอร์ซีฟนี้ในบางครั้งอาจต้องใช้เวลามาก จึงเกิดความพยายามที่จะปรับค่าพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติตามคุณสมบัติของแต่ละพื้นที่ในภาพขึ้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียน ฟิลเตอร์ในโดเมนความถี่ อัลกอริทึมในการหาขอบภาพของ Sundaram การปรับคุณสมบัติของฟิลเตอร์อย่างอัตโนมัติ การลดการคำนวณในการหาขอบภาพโดยใช้โครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรี อัลกอริทึมในการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติเรโซลูชันDST นอกจากนั้นในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึง การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมดังกล่าวในการหาพื้นผิวของข้อมูลเชิงปริมาตรอีกด้วย

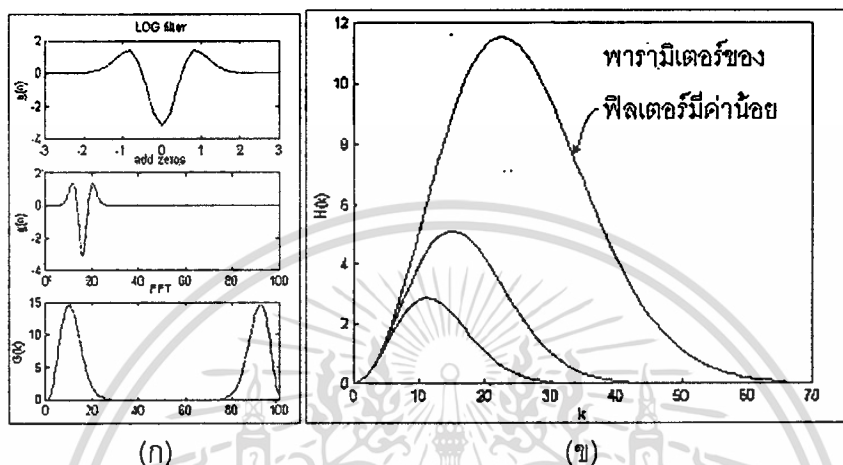
4.2 ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ในโดเมนความถี่ [6],[7],[8]

ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียน ฟิลเตอร์ ในโดเมนความถี่ $H(k)$ ได้จากการทำการแปลงฟูเรียร์ของลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ในโดเมนของระยะทางในสมการที่ 3.17 ให้อยู่ในโดเมนของความถี่แสดงในรูปที่ 4.1 ก. หลังจากนั้นสุ่มตัวอย่างด้วยอัตราการสุ่มเท่ากับ N จะได้ ลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียน ฟิลเตอร์หนึ่งมิติในโดเมนของความถี่ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 4.1

$$H(k) = C\sigma_{rr}^2 k^2 e^{-\sigma_{rr}^2 k^2} \tag{4.1}$$

โดยที่ $C = 1/\sigma_{lr}^2 \sqrt{2/\pi}$, $\sigma_{rr} = (\pi\sqrt{2}/N)\sigma_{lr}$ และ σ_{lr} เป็นค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ รูปที่ 4.1 ข. แสดงลักษณะของลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียน ฟิลเตอร์ในโดเมนของความถี่ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ต่างๆกัน สังเกตว่าฟิลเตอร์ที่ได้จากสมการที่ 4.1 มีลักษณะเป็นเพียงด้านเดียวของ ฟิลเตอร์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ และมีคุณสมบัติเป็นแบนด์พาส ฟิลเตอร์ (Bandpass Filter)

เราสามารถควบคุมคุณสมบัติของฟิลเตอร์ได้โดยการปรับเปลี่ยนค่า σ_{LP} ให้เหมาะสม จะเห็นว่าเมื่อพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์มีค่าน้อยทำให้ช่วงแบนด์พาสมีค่ากว้างขึ้น (ความถี่สูงผ่านได้มากขึ้น) และเนื่องจากขอบภาพเป็นสัญญาณความถี่สูงดังนั้นจะทำให้ได้ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าให้พารามิเตอร์ของฟิลเตอร์มีค่ามาก ช่วงแบนด์พาสจะแคบทำให้ได้ตำแหน่งของขอบภาพน้อยลง



รูปที่ 4.1 ก. การแปลงฟูเรียร์ของลาปลาเซียน ออฟ แกสเซียนฟิลเตอร์ในโดเมนระยะทาง
ข. ลักษณะของลาปลาเซียน ออฟ แกสเซียนฟิลเตอร์ในโดเมนของความถี่เมื่อพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์มีค่าต่างๆ

สำหรับฟิลเตอร์สองมิติซึ่งใช้กับข้อมูลภาพสองมิติทั่วไป และฟิลเตอร์สามมิติซึ่งใช้กับข้อมูลเชิงปริมาตรจะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยที่ $C = 1 / \sigma_{LP}^2 \sqrt{2/\pi}$, $\sigma_{BP} = (\pi\sqrt{2}/N)\sigma_{LP}$ และ σ_{LP} เป็นค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์

$$H(k_1, k_2) = C\sigma_{BP}^2 (k_1^2 + k_2^2) e^{(-\sigma_{BP}^2 (k_1^2 + k_2^2))} \quad (4.2)$$

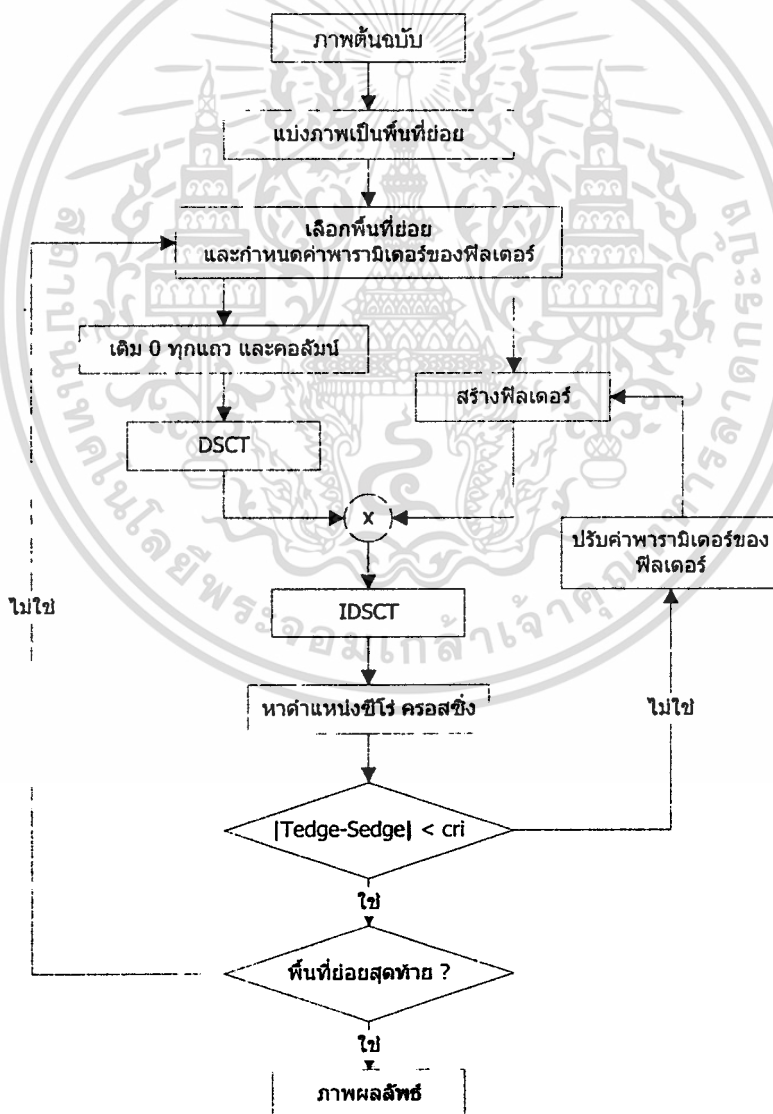
$$H(k_1, k_2, k_3) = C\sigma_{BP}^2 (k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) e^{(-\sigma_{BP}^2 (k_1^2 + k_2^2 + k_3^2))} \quad (4.3)$$

4.3 อัลกอริธึมในการหาขอบภาพของ Sundaram [6],[7]

ผังการทำงานของอัลกอริธึมที่ Sundaram นำเสนอมีวิธีการทำตามรูปที่ 4.2 เริ่มจากแบ่งภาพต้นฉบับเป็นพื้นที่ย่อยๆ จากนั้นแต่ละพื้นที่ย่อยจะนำไปหาขอบภาพ โดยใช้การแปลงดิสครีตซิมเมตริกซ์ โคซายน์แปลงไปอยู่ในโดเมนความถี่ แล้วนำไปคูณกับลาปลาเซียน ออฟ แกสเซียนฟิลเตอร์ตามสมการที่ 4.2 จากนั้นผลที่ได้จะแปลงกลับมากในโดเมนของระยะทางแล้วหาขอบภาพจากตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นต่อไปการปรับค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์จะถูกกระทำ ถ้าจำนวนของตำแหน่งที่เกิดที่เกิดซีโรครอสซิงทั้งหมด (Tedge) ลบกับจำนวนตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงและผ่านการทำ Sobel Gradient Test (Sedge, ตำแหน่งที่มีขนาดเกรเดียนของ Sobel มากกว่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดไว้) มีค่ามากกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าเรากำหนดให้ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้เป็น 5 และจำนวนตำแหน่งซีโรครอสซิงทั้งหมดที่ตรวจพบเป็น Tedge หลังจากนั้นนำตำแหน่ง Tedge ทั้งหมดไปทำ Sobel Gradient Test แล้วได้จำนวนที่ผ่านเกณฑ์เป็น Sedge ในกรณีนี้ถ้าความแตกต่างระหว่างค่า Tedge และ Sedge มากกว่า 5 ก็จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ เพื่อหาขอบภาพของพื้นที่ย่อยนั้นอีกครั้ง การปรับค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์อาจทำได้ 2 วิธี คือกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ให้มีค่ามากแล้วปรับให้ลดลง (coarse-to-fine) หรือกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ให้มีค่าน้อยแล้วปรับให้มากขึ้น (fine-to-coarse)



รูปที่ 4.2 ผังการทำงานของอัลกอริธึมในการหาขอบภาพของ Sundaram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การปรับคุณสมบัติของฟิลเตอร์อย่างอัตโนมัติ [8]

พื้นที่ต่างๆในภาพดิจิตอลนั้นจะมีคุณสมบัติต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าระดับเทาในพื้นที่นั้นๆ จึงทำให้เกิดความพยายามที่จะสร้างฟิลเตอร์ที่มีคุณสมบัติเหมาะกับแต่ละพื้นที่ขึ้น เพื่อพิจารณาแต่ละพื้นที่ด้วยความละเอียดต่างๆกัน จากรูปที่ 4.1 ข. จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิลเตอร์ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดของฟิลเตอร์มีค่าจำกัด ค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์จะต้องถูกจำกัดไว้ในช่วงหนึ่ง เพื่อที่จะรักษาคุณสมบัติแบนด์พาสของฟิลเตอร์ไว้

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้สมมติฐานว่าถ้าข้อมูลในพื้นที่ใดมีการเปลี่ยนแปลงมาก พิกเซลของขอบภาพก็จะมีจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อให้ฟิลเตอร์มีโอกาสตรวจพบขอบภาพได้ถูกต้องขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ก็ควรจะมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ก็ควรจะมีค่ามาก

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์จากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าระดับเทาในพื้นที่ที่พิจารณา จากการทดลองพบว่าสำหรับพื้นที่ขนาด 16x16 พิกเซล, ความถี่ของการสุ่มตัวอย่าง (ค่า N ในสมการที่ 4.1) มีค่าเท่ากับ 2 และให้ $std.$ เป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าระดับเทาในพื้นที่ ค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ควรจะมีค่าตามสมการที่ 4.4

$$s = 0.065 - (0.01 / 90) \times (std. - 10) \quad (4.4)$$

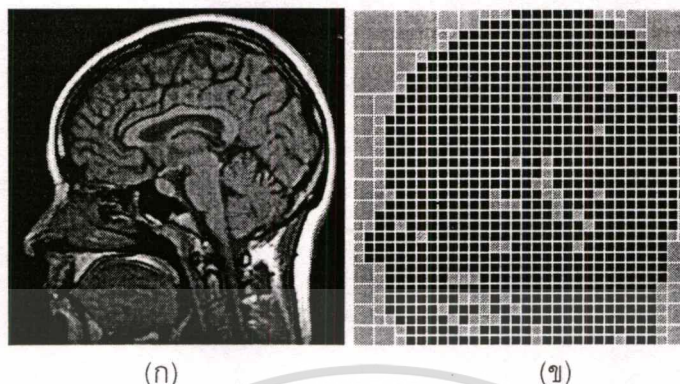
4.5 การลดการคำนวณโดยใช้โครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรี [8]

พื้นที่ต่างๆในภาพดิจิตอลนั้นจะประกอบด้วย พื้นที่ที่มีความแตกต่างระหว่างข้อมูลมีค่านาน้อยต่างกัน จากความจริงว่าในพื้นที่ที่ความแตกต่างของข้อมูลมีค่าน้อยจะไม่มีขอบภาพ ดังนั้นเราสามารถพิจารณาข้ามการคำนวณในพื้นที่ดังกล่าวไปได้

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของโครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรีที่สามารถเข้าถึงข้อมูลที่มีลักษณะเฉพาะได้ และในการแปลงจะทำการเป็นระดับชั้นย่อยลงไปเรื่อยๆ จากคุณสมบัติดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำมาใช้ในการข้ามการคำนวณในพื้นที่ที่เป็นฉากหลัง หรือแม้แต่ส่วนที่เป็นวัตถุในภาพเองที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สามารถเข้าถึงส่วนที่พิจารณาว่ามีข้อมูลขอบภาพได้เร็วขึ้น

โดยเพิ่มกระบวนการควอดทรีดีคอมโพลีชันก่อนทำการหาขอบภาพเพื่อหาโครงสร้างควอดทรีของภาพต้นฉบับ โดยในการแบ่งภาพเป็นส่วนแต่ละครั้ง จะเก็บเฉพาะตำแหน่งของพื้นที่ย่อยที่มีขอบภาพเท่านั้น พื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าระดับเทาน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดไว้จะพิจารณาว่าไม่มีขอบภาพและข้ามไป รูปที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการทำกระบวนการควอดทรี

ดีคอมโพสิชัน ก. ภาพต้นฉบับ และ ข. พื้นที่ที่มีสีเทาจะพิจารณาเป็นเนื้อเดียวกันและจะข้ามไป
ส่วนพื้นที่สีดำจะพิจารณาว่ามีขอบภาพและจะนำไปเก็บในโครงสร้างควอดทรี



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างของผลลัพธ์จากการทำควอดทรีดีคอมโพสิชัน

4.6 วิธีการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติรีโซลูชัน DSCT (M. DSCT)

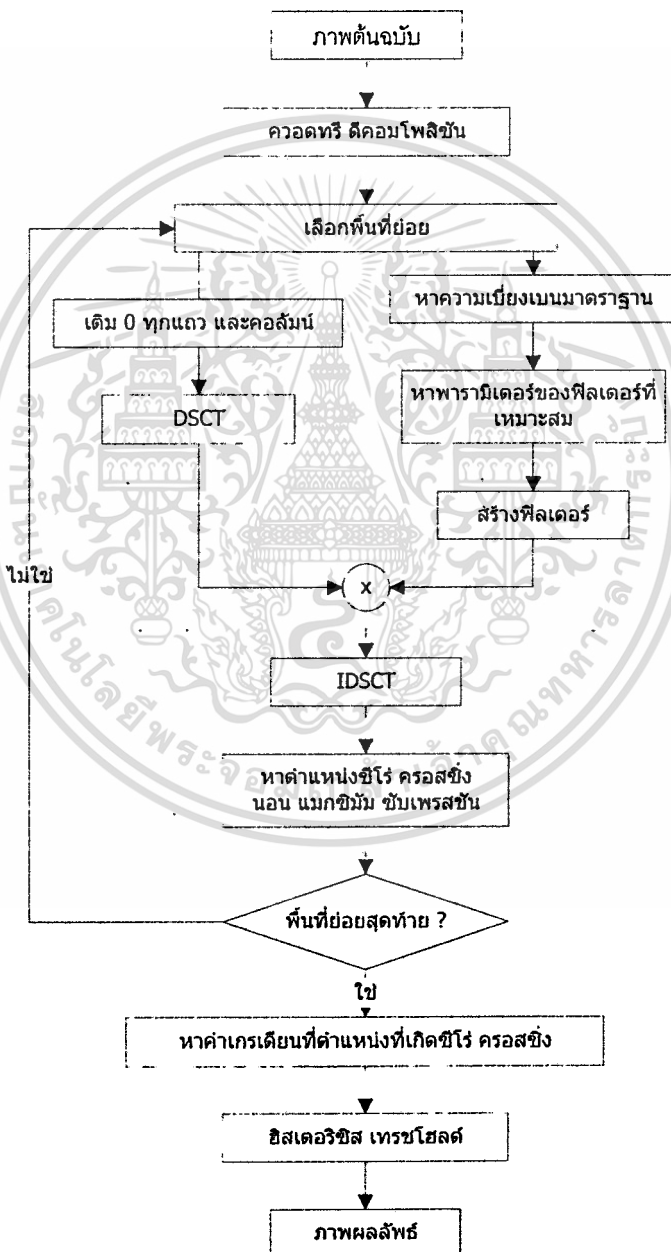
วิธีการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติรีโซลูชัน DSCT ได้ปรับปรุงมาจากวิธีการของ Sundaram โดยมีความแตกต่างดังนี้

1. Sundaram ได้แบ่งภาพเป็นพื้นที่ย่อยจากนั้นทำการหาขอบภาพทุกพื้นที่ที่ละพื้นที่ย่อย ส่วนวิธีการ M.DSCT ได้เพิ่มกระบวนการควอดทรีดีคอมโพสิชันเพื่อหาโครงสร้างควอดทรีของภาพต้นฉบับ ซึ่งมีความสำคัญมากในการช่วยลดการคำนวณเพราะจะนำไปใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของพื้นที่ย่อยในภาพที่มีขอบภาพ โดยข้ามส่วนที่เป็นเนื้อวัตถุชนิดเดียวกัน เช่น ฉากหลัง
2. การหาขอบภาพในแต่ละพื้นที่ย่อย Sundaram ใช้ฟิลเตอร์แบบปรับได้ (adaptive filter) โดยการปรับเป็นแบบทำซ้ำจนกว่า ความแตกต่างระหว่าง Tedge และ Sedge จะมีค่าน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดไว้ ส่วนวิธีการ M.DSCT นั้นค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์จะถูกกำหนดอย่างอัตโนมัติ(หัวข้อที่ 4.4) ดังนั้นแต่ละพื้นที่ย่อยจะทำการหาขอบภาพเพียงครั้งเดียว
3. ในวิธีการ M.DSCT เมื่อได้ตำแหน่งซีโรครอสซึ่งครบทุกพื้นที่แล้ว จะนำตำแหน่งดังกล่าวไปการตรวจสอบหาตำแหน่งขอบภาพที่แท้จริง(ปรับปรุงขอบภาพ) โดยใช้กระบวนการฮิสเตอร์รีซิส เทรชโฮลด์ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

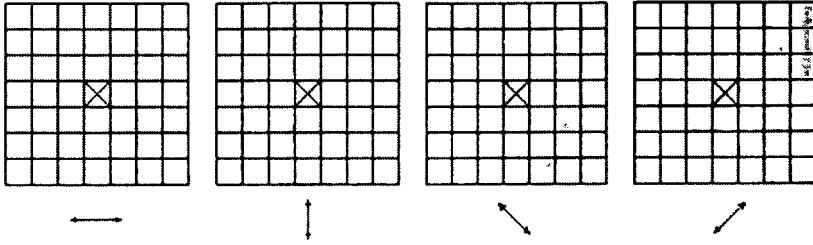
ขั้นตอนโดยรวมของการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติรีโซลูชัน DSCT ได้แสดงในรูปที่ 4.4 หลังจากได้โครงสร้างแบบควอดทรีของภาพต้นฉบับแล้ว แต่ละพื้นที่ในโครงสร้างควอดทรีจะนำไปหาขอบภาพโดย สร้างลาปลาเซียน ออฟ เกาส์เซียนฟิลเตอร์ที่เหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆขึ้น ส่วน

ของข้อมูลภาพจะทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคไซน์ หลังจากนั้นจะนำไปคูณกับฟิลเตอร์ที่สร้างขึ้น ผลที่ได้จะแปลงกลับมาในโดเมนของระยะทางเพื่อหาตำแหน่งที่เกิดซีโร ครอสซิง

ตำแหน่งซีโรครอสซิงที่ได้นั้นจะต้องนำมาทำการตรวจสอบเพื่อหาตำแหน่งของขอบภาพโดยใช้วิธีการนอน-แมกซิมัม ซัมเพรสชันโดยจะตรวจสอบค่าเกรเดียนในทิศทางที่เกิดซีโรครอสซิงว่า ที่ตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงนั้นเกรเดียนมีค่าสูงสุดหรือไม่ ถ้าไม่จะตัดตำแหน่งนั้นออก หลังจากนั้นจะทำฮิสเตอร์ิซิส เทรชโฮลด์เพื่อปรับปรุงขอบภาพที่ได้



รูปที่ 4.4 การหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติมันัลติเรโซลูชันDSC



รูปที่ 4.5 พื้นที่ต่างที่ใช้หาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณค่าเกรเดียนของตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงในทิศทางต่างๆ (ลูกศรด้านล่างแสดงถึงทิศทางที่เกิดซีโรครอสซิง)

ในการทำการเทรซโฮลด์นั้นก็ต้องทราบค่าเกรเดียนในตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงก่อน วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประมาณค่าเกรเดียนในตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง จากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าระดับเทาในพื้นที่ที่อยู่ในทิศทางที่เกิดซีโรครอสซิง(รูปที่ 4.5) ค่าเกรเดียนที่คำนวณโดยใช้วิธีนี้จะสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าการคำนวณค่าเกรเดียนโดยวิธีของ Sobel เนื่องจากค่าเกรเดียนที่ได้จากวิธีของ Sobel จะขึ้นกับตำแหน่งพิกเซลที่ติดกับตำแหน่งที่ต้องการหาเท่านั้น ดังนั้นเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาจะสามารถทำให้ค่าเกรเดียนที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าผิดจากความจริงได้ง่าย

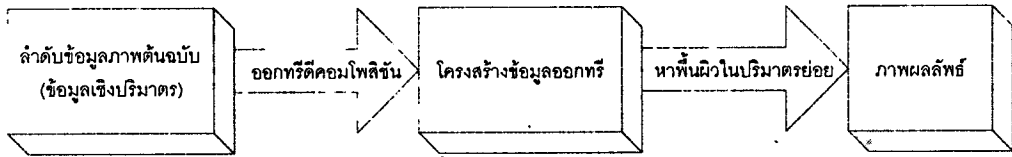
4.7 การประยุกต์ใช้ในการหาพื้นผิวของข้อมูลเชิงปริมาตร [9]

ภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์เป็นชุดข้อมูลของภาพตัดขวางสองมิติหลายๆ สไลด์ซึ่งจะมีข้อมูลสามมิติของอวัยวะนั้นๆ อยู่ การสร้างภาพเชิงพื้นผิว (Surface Rendering) เริ่มจากหาดำแหน่งที่มีพื้นผิว (Surface Detection) ซึ่งเป็นการแปลงภาพเป็นไบนารีซึ่งอาจทำได้โดยการตัดเทรซโฮลด์, การหาขอบภาพวิธีต่างๆ โดยทั่วไปการแปลงภาพเป็นไบนารีเหล่านี้จะทำที่ละสไลด์ ซึ่งจะไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลในแนวแกนสไลด์(แกน z)

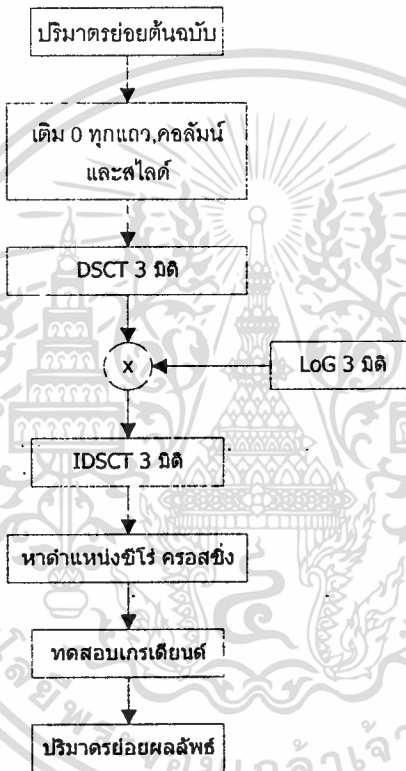
หัวข้อนี้จะนำเสนอการประยุกต์อัลกอริธึมที่ใช้หาขอบภาพในหัวข้อที่ 4.6 มาใช้กับการหาดำแหน่งพื้นผิวซึ่งทำโดยการเปลี่ยนการทำควอดทรีดีคอมโพสิชันเป็นการทำออกทรีดีคอมโพสิชันและเปลี่ยนฟิลเตอร์สองมิติเป็นฟิลเตอร์เชิงปริมาตร

วิธีการที่เสนอเริ่มจากอ่านชุดข้อมูลภาพต้นฉบับเข้ามาที่เก็บเป็นข้อมูลเชิงปริมาตร หาโครงสร้างข้อมูลแบบออกทรีของปริมาตรนั้น จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการตรวจหาพื้นผิวแต่ละปริมาตรย่อยในโครงสร้างออกทรี โดยแต่ละปริมาตรย่อยจะถูกแปลงไปอยู่ในโดเมนของความถี่โดยใช้การแปลงดิสครีต ซิมเมตริกซ์ โคซายน์แล้วนำไปคูณกับฟิลเตอร์ตามสมการที่ 4.3 หลังจากนั้นให้แปลงกลับมาในโดเมนของระยะทาง ผลที่ได้จะนำไปหาพื้นผิว โดยการหาดำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง

เมื่อทำจนครบทุกปริมาตรย่อยแล้วจะได้ข้อมูลเชิงปริมาตรของตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะนำไปทำการทดสอบเกรเดียนต์ ถ้ามีค่าเกรเดียนต์มากกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดไว้ก็จะพิจารณาให้เป็นพื้นผิวที่แท้จริง ผังลำดับงานแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แผนผังการทำงานของการทำงานตรวจหาพื้นผิว



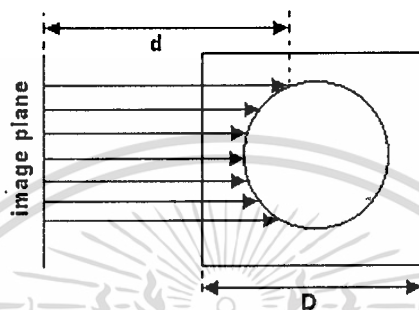
รูปที่ 4.7 แผนผังการทำงานของการทำงานหาพื้นผิวของแต่ละปริมาตรย่อย

ข้อดีของการหาพื้นผิวของข้อมูลในวิธีนี้คือ

1. การพิจารณาข้อมูลและฟิลเตอร์ที่ใช้เป็นเชิงปริมาตรทำให้สามารถตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับเทาที่เกิดขึ้นในแนวแกนสไลด์ (แกนZ) ได้
2. โครงสร้างข้อมูลแบบออกทรี ทำให้สามารถข้ามบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกันได้ นอกจากนั้นการคำนวณที่ละปริมาตรย่อยทำให้สามารถประหยัดหน่วยความจำที่ใช้

4.7.1 การสร้างภาพเชิงพื้นผิว 3 มิติ [3]

ตำแหน่งของพื้นผิว(ตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง)ในข้อมูลเชิงปริมาตรที่ตรวจพบจากวิธีการที่นำเสนอต้องถูกนำมาสร้างเป็นภาพเชิงพื้นผิวสามมิติ การสร้างภาพเชิงพื้นผิวสามมิตินั้นจะเป็นการฉาย (Projection) ตำแหน่งที่เป็นพื้นผิวลงบนฉากรับสองมิติ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกการฉายแสงแบบขนาน โดยให้แสงเงาด้วยวิธีหาระยะทางจากพื้นผิวถึงระนาบของภาพตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การฉายแสงแบบขนาน

จากรูปที่ 4.9 ความเข้มแสงที่จะแสดงบนระนาบภาพ สามารถคำนวณได้ตามระยะทาง d ซึ่งวัดจากระนาบของภาพสองมิติถึงตำแหน่งต่างๆที่เกิดพื้นผิวตามสมการที่ 4.5

$$I(i,j) = I_{\max} \frac{(D-d)}{D} \quad (4.5)$$

โดยที่ $I_{\max}$ เป็นค่าความสว่างสูงสุดที่จะมีได้ภายในภาพ(ในกรณีที่ภาพแสดงด้วยความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซลจะเท่ากับ 255), D เป็นความลึกของภาพ(หน่วยเป็นพิกเซล)ตามทิศทางที่แสงเดินทาง และ d เป็นระยะทางจากระนาบภาพจนถึงตำแหน่งที่เกิดพื้นผิว

4.8 สรุป

อัลกอริทึมในการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของมัลติรีโซลูชันDSCT ได้นำกระบวนการควอดรี ดีคอมโพสิชันมาใช้เป็นส่วนประมวลผลก่อนเพื่อลดการสูญเสียของการคำนวณในบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น ฉากหลัง

ในส่วนการปรับคุณสมบัติของฟิลเตอร์ในแต่ละพื้นที่ที่กำลังพิจารณา อัลกอริทึมของ Sundaram ได้ใช้วิธีการแบบทำซ้ำ ซึ่งวิธีดังกล่าวหากกำหนดค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น หากกำหนดไว้มีค่าน้อยเกินไป อาจทำให้ใช้เวลานานใน

การคำนวณหรือ มีผลต่อเสถียรภาพของระบบได้(คือเกิด infinite loop) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าววิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดให้การปรับคุณสมบัติของฟิลเตอร์เป็นแบบอัตโนมัติ จากนั้นเมื่อทำการหาขอบภาพครบทุกพื้นที่เรียบร้อยแล้วจึงปรับปรุงขอบภาพโดยใช้วิธีการนอน-แมกซิมัม ซับเพรสชัน และฮิสเตอร์ริซิส เทรชโฮลด์อีกครั้ง



การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็นสี่ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองและผลการทดลองของการหาขอบภาพของภาพทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของอัลกอริธึมต่างๆ ส่วนที่สองจะเป็นการนำเสนอผลการทดลองของการหาขอบภาพที่ทำกับภาพจริงเพื่อเปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ที่ได้ของอัลกอริธึมต่างๆ ส่วนที่สามเป็นการเพิ่มความเร็วในการหาขอบภาพโดยใช้โครงสร้างแบบควอดทรี และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการเสนอผลการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการประยุกต์อัลกอริธึมที่นำเสนอในการหาพื้นผิว

ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ทำการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เขียนขึ้นโดยใช้ภาษา C บนระบบปฏิบัติการ Linux เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่มี Intel Pentium II 266 MHz เป็นตัวประมวลผลกลาง หน่วยความจำ 64 MB

5.2 ประสิทธิภาพของอัลกอริธึม

ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการใดใช้หาประสิทธิภาพของอัลกอริธึมที่เป็นมาตรฐาน แต่อาจมองจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ในการหาขอบภาพ ความผิดพลาดเหล่านี้ประกอบด้วย การตรวจพบพิกเซลขอบภาพในตำแหน่งที่ไม่มีขอบภาพ (false positive), การตรวจไม่พบพิกเซลขอบภาพในตำแหน่งที่มีขอบภาพ (false negative) และการตรวจพบพิกเซลขอบภาพในตำแหน่งที่ผิดไปจากภาพต้นฉบับ (localization error) ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้(ตำแหน่งของขอบภาพ, ปริมาณของสัญญาณรบกวน) เราจะสามารถวัดประสิทธิภาพของอัลกอริธึมใดๆได้โดยพิจารณาจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเหล่านี้

Pratt ได้เสนอตัววัดค่า (figure of merit) ตัวหนึ่งซึ่งได้พิจารณาหาประสิทธิภาพของอัลกอริธึมโดยใช้หลักเกณฑ์จากความผิดพลาดที่กล่าวไว้ด้านบน สามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 5.1

$$E1 = \frac{\sum_{i=1}^I \left(\frac{1}{1 + \alpha d(i)^2} \right)}{\max(I_A, I_I)} \quad (5.1)$$

โดยที่ α เป็นค่าคงที่ในที่นี้ให้เท่ากับ $1/9$, I_A เป็นจำนวนของพิกเซลขอบภาพที่ได้จากอัลกอริธึมต่างๆ, I_I เป็นจำนวนของพิกเซลขอบภาพที่แท้จริงในภาพทดสอบและ $d(i)$ เป็นระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างพิกเซลที่เป็นขอบภาพจริงตัวที่ i และพิกเซลของขอบภาพที่ได้จากอัลกอริธึม ค่า $E1$ จะบอกถึงความถูกต้องของภาพผลลัพธ์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 โดยที่ค่าใกล้ 1 หมายถึงมีความถูกต้องสูง

ตัววัดค่าอีกตัวหนึ่งเสนอโดย Kitchen และ Rosenfield ซึ่งพิจารณาจากสิ่งที่เรียกว่า local edge coherence โดยไม่ได้พิจารณาตำแหน่งที่แท้จริงของพิกเซลขอบภาพ ค่าที่วัดได้จะบอกถึงความต่อเนื่องและความบางของขอบภาพ ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่เสริมตัววัดค่าของ Pratt ในการพิจารณาประสิทธิภาพของอัลกอริธึมได้เป็นอย่างดี การหาค่าเริ่มจากการหาความต่อเนื่องของพิกเซลขอบภาพทางด้านซ้ายและขวาจากสมการที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

$$L(k) = \begin{matrix} a(d, d_k) \times a\left(\frac{k\pi}{4}, d + \frac{\pi}{2}\right) & \text{เมื่อพิกเซลในทิศทาง } k \text{ เป็นขอบภาพ} \\ 0 & \text{กรณีอื่น} \end{matrix} \quad (5.2)$$

$$R(k) = \begin{matrix} a(d, d_k) \times a\left(\frac{k\pi}{4}, d - \frac{\pi}{2}\right) & \text{เมื่อพิกเซลในทิศทาง } k \text{ เป็นขอบภาพ} \\ 0 & \text{กรณีอื่น} \end{matrix} \quad (5.3)$$

โดยที่ d เป็นทิศทางของขอบภาพที่พิกเซลทดสอบ, $d_0 - d_k$ เป็นทิศทางของขอบภาพที่พิกเซลที่ติดกับพิกเซลทดสอบ โดยเริ่มจาก d_0 เป็นทิศทางของพิกเซลทางด้านขวา และทวนเข็มนาฬิกาจนครบ ส่วน $a()$ เป็นความแตกต่างระหว่างมุมสองมุมซึ่งหาค่าดังนี้

$$a(\alpha, \beta) = \frac{\pi - |\alpha - \beta|}{\pi} \quad (5.4)$$

จากนั้นหาค่าความต่อเนื่องรวม c ได้จากค่าเฉลี่ยของค่ามากที่สุดของ $L(k)$ และค่ามากที่สุดของ $R(k)$

ต่อจากนั้นจะหาค่าความบางของขอบภาพ T ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(6-n)/6$ โดย n เป็นจำนวนของพิกเซลที่เป็นขอบภาพที่ติดกับพิกเซลทดสอบ โดยไม่นับพิกเซลที่มีค่า $L(k)$ และ $R(k)$ มากที่สุด

ตัววัดค่าของ Kitchen และ Rosenfield จะหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความต่อเนื่อง c และความบางของขอบภาพ T ตามสมการที่ 5.5 โดยที่ γ เป็นค่าคงที่ ที่นี้ให้เท่ากับ 0.8

$$E2 = \gamma C + (1 - \gamma)T \quad (5.5)$$

การทดลองแรกจะทดลองหาขอบภาพของภาพทดสอบโดยใช้อัลกอริทึมของ Marr, Canny, Shen Castan, Sundaram และ อัลกอริทึมที่นำเสนอคือ M.DSCT. (Multiresolution DSCT) จากนั้นเพิ่มสัญญาณรบกวนให้มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 6, 2 และ 1

การวัดประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึมจะทำการพิจารณาจากทั้งความถูกต้อง(ตัววัดค่าของ Pratt) และความต่อเนื่องและความบาง(ตัววัดค่าของ Kitchen และ Rosenfield)ของภาพผลลัพธ์ โดยภาพทดสอบใช้ภาพทดสอบจำนวน 5 ภาพมีรายละเอียดดังนี้

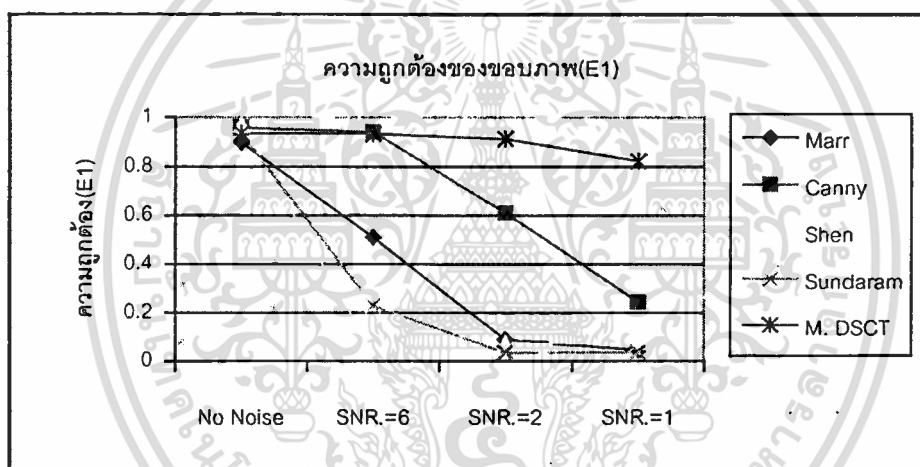
ภาพ T1 : ขอบแบบขั้นบันไดในแนวตั้ง การเปลี่ยนแปลงค่าระดับเทาเท่ากับ 18 ที่ $j=127$

ภาพ T2 : ขอบแบบขั้นบันไดในแนวนอน การเปลี่ยนแปลงค่าระดับเทาเท่ากับ 18 ที่ $i=127$

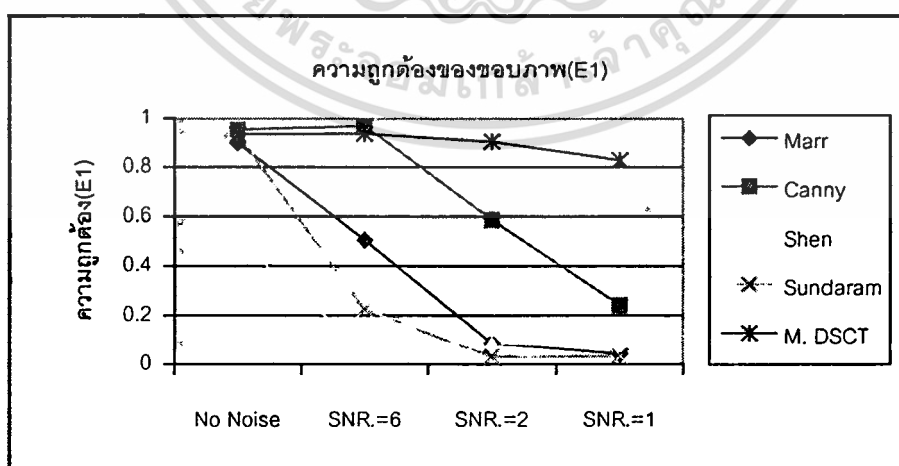
ภาพ T3 : ขอบแบบขั้นบันไดในแนวทแยงมุม การเปลี่ยนแปลงค่าระดับเทาเท่ากับ 18 ที่ $i=j$

ภาพ T4 : ขอบในแนวตั้ง มีการเปลี่ยนแปลงสองครั้งแต่ละครั้งเท่ากับ 9

ภาพ T5 : ขอบในแนวตั้ง มีการเปลี่ยนแปลงสามครั้งแต่ละครั้งเท่ากับ 6



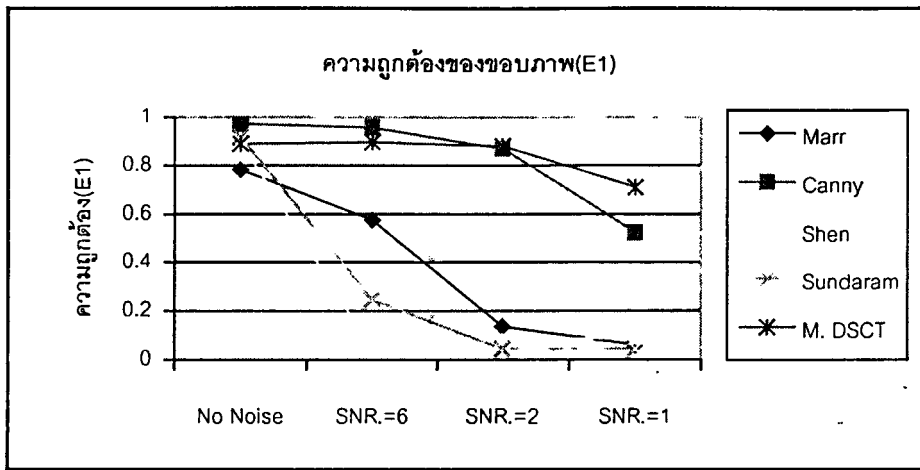
(ก) T1



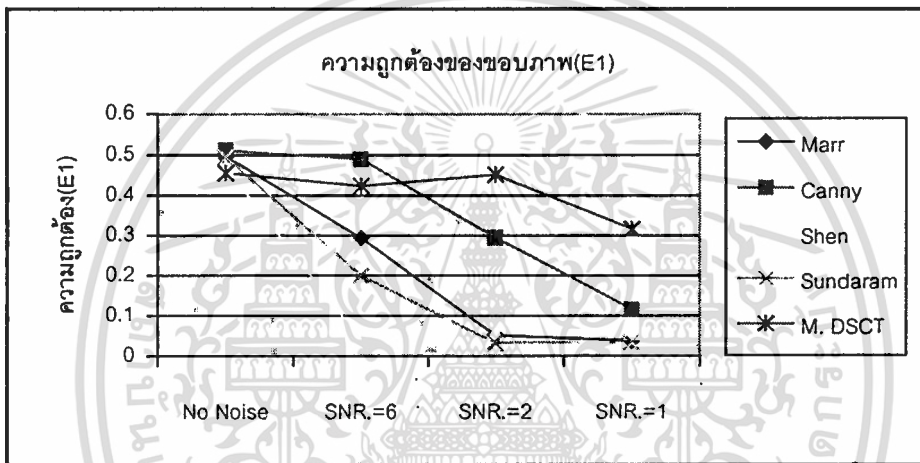
(ข) T2

รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความถูกต้องของขอบภาพที่ได้จากอัลกอริทึมต่างๆ

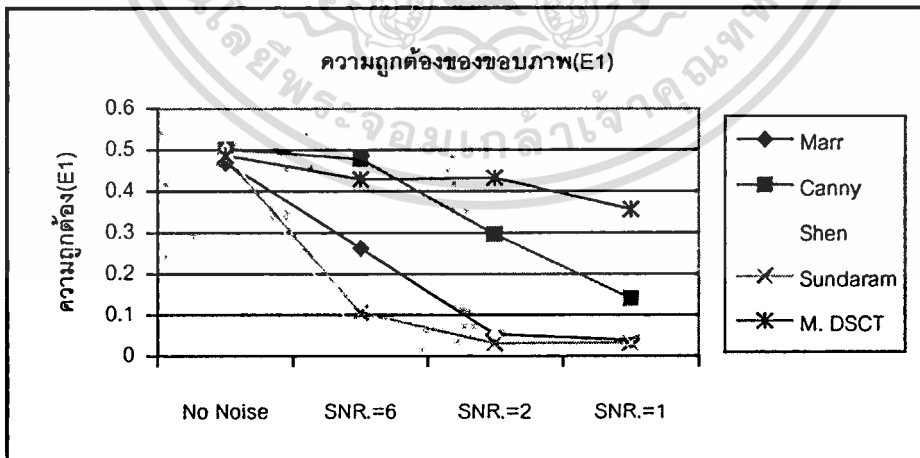
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) T3

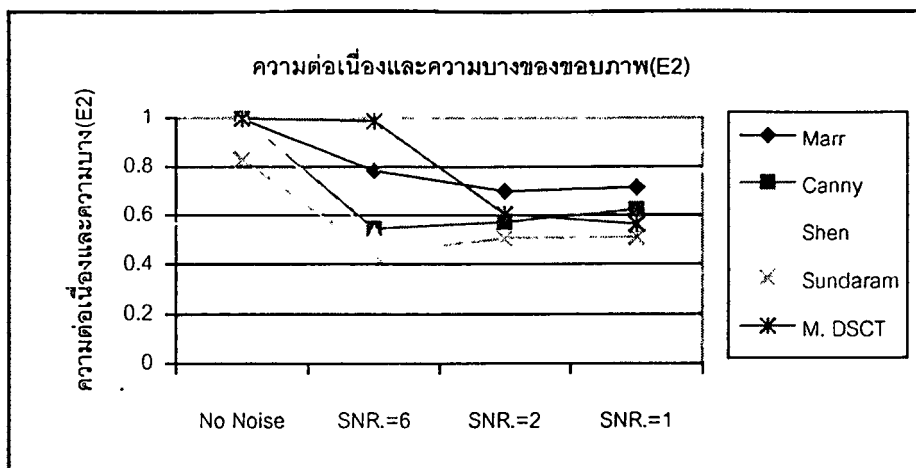


(ง) T4

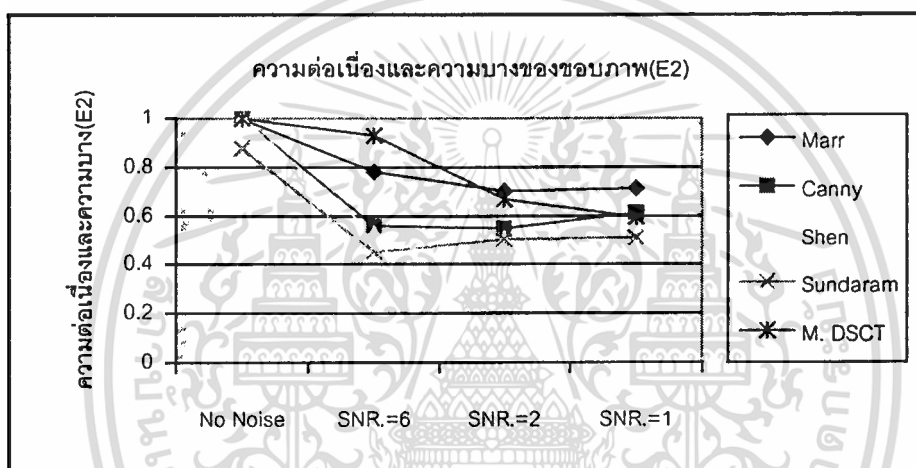


(จ) T5

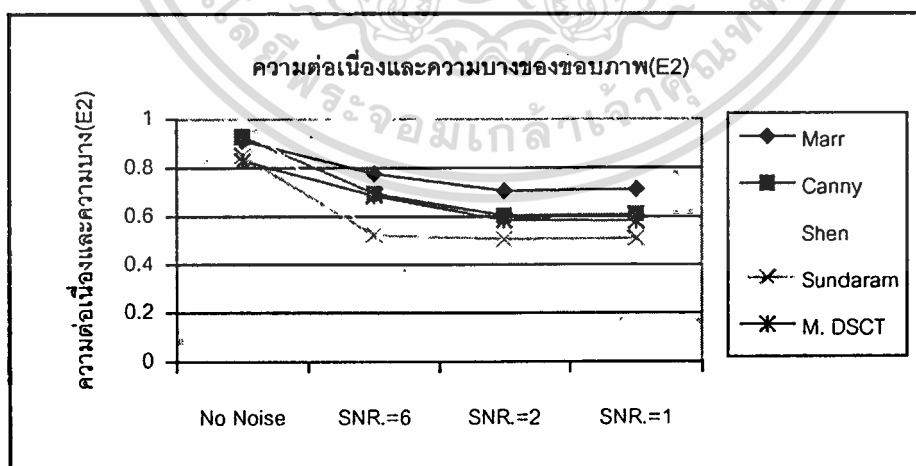
รูปที่ 5.1(ต่อ) กราฟแสดงความถูกต้องของขอบภาพที่ได้จากอัลกอริทึมต่างๆ



(ก) T1

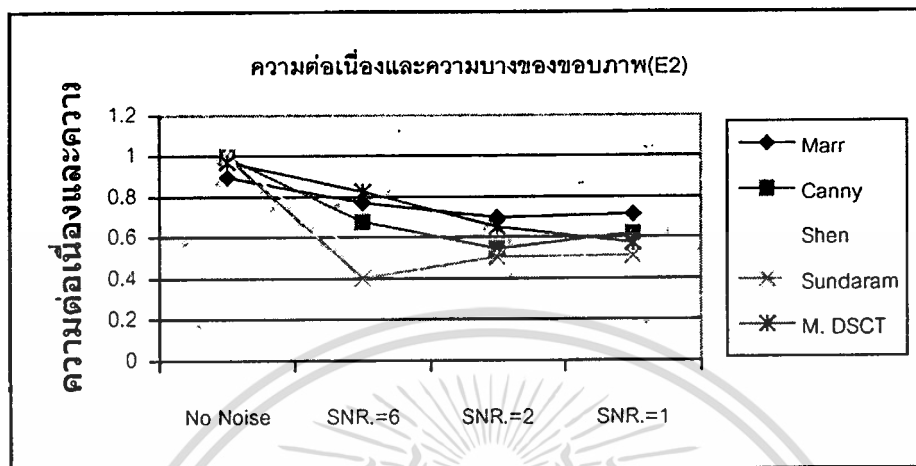


(ข) T2

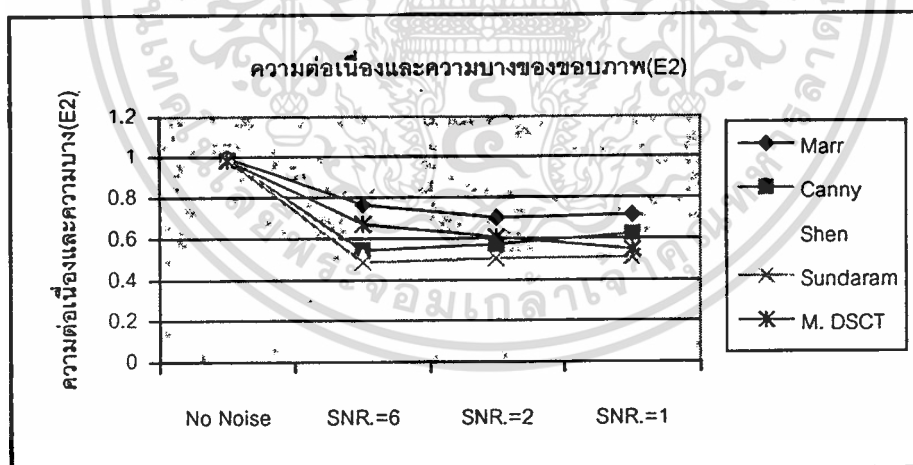


(ค) T3

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความต่อเนื่องและความบางของขอบภาพที่ได้จากอัลกอริธึมต่างๆ

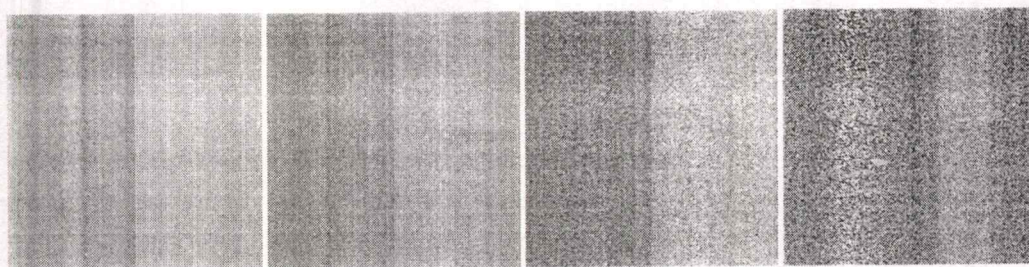


(ง) T4

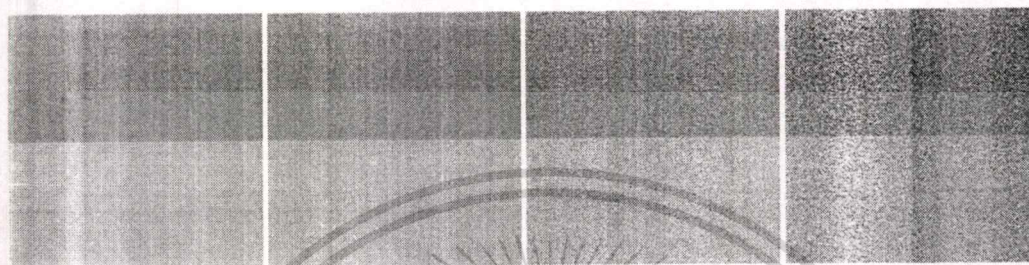


(จ) T5

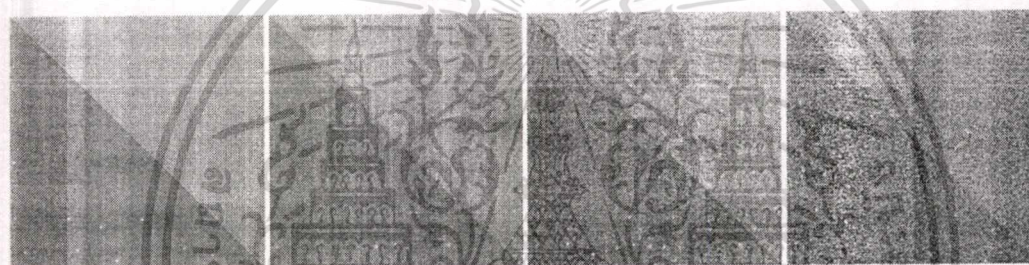
รูปที่ 5.2(ต่อ) กราฟแสดงความต่อเนื่องและความบางของขอบภาพที่ได้จากอัลกอริทึมต่างๆ



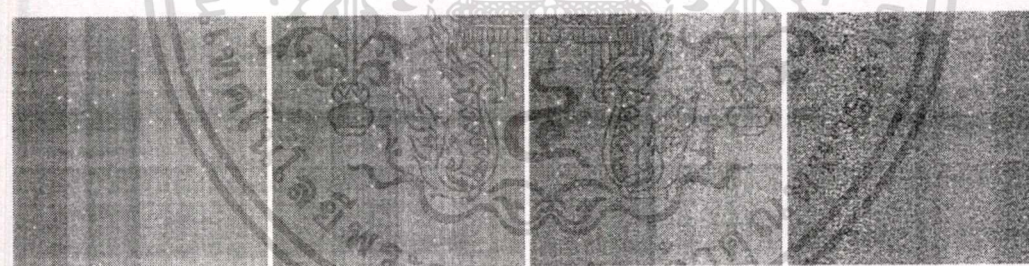
(ก) ภาพต้นฉบับ T1



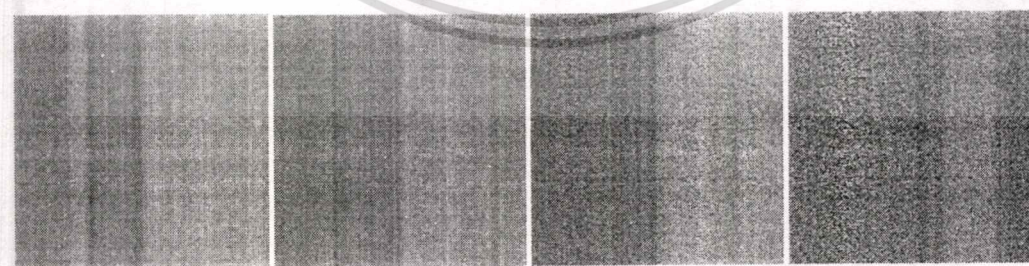
(ข) ภาพต้นฉบับ T2



(ค) ภาพต้นฉบับ T3



(ง) ภาพต้นฉบับ T4

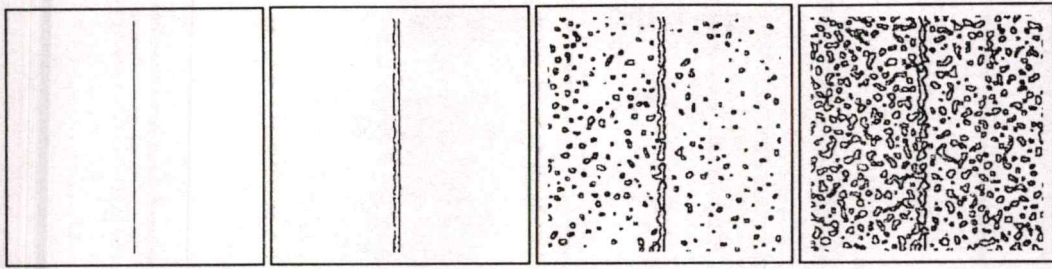


(จ) ภาพต้นฉบับ T5

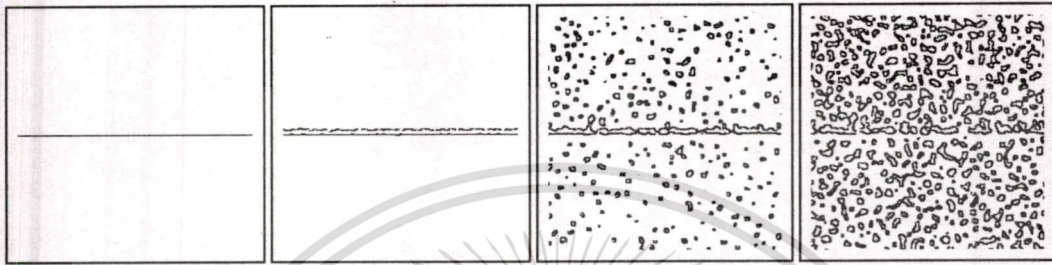
รูปที่ 5.3 ภาพต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน, SNR.=6,

SNR. = 2, SNR. = 1

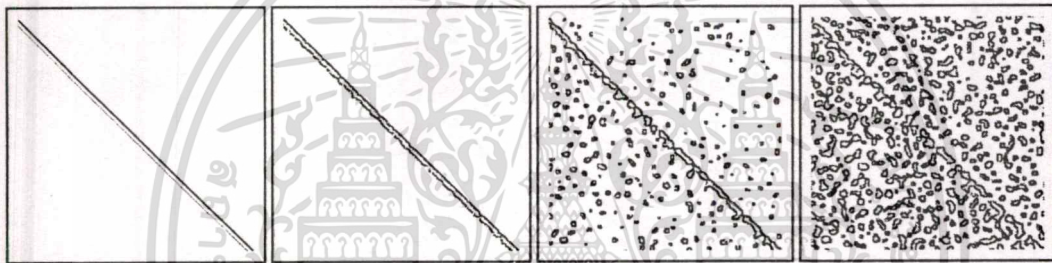
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



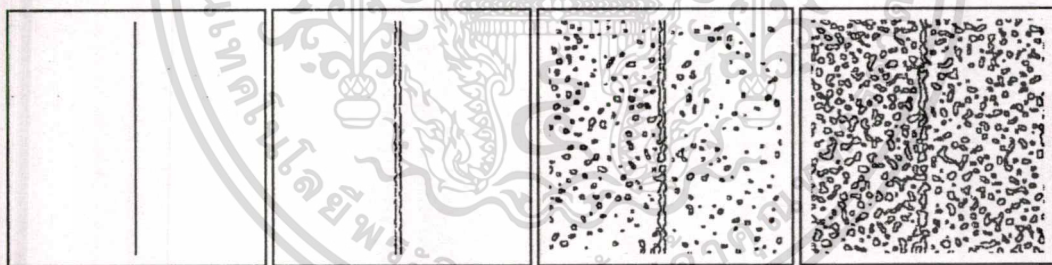
(ก) T1



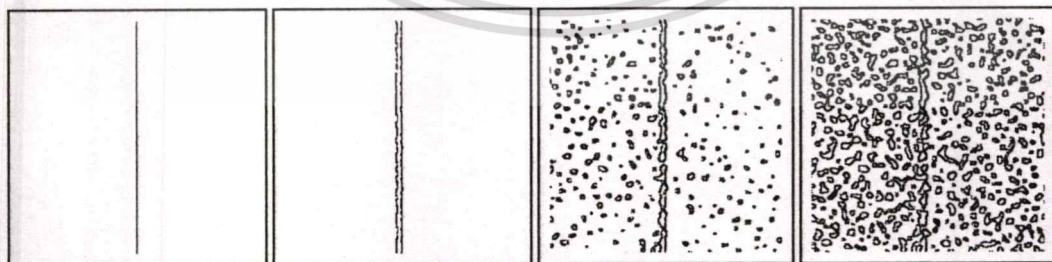
(ข) T2



(ค) T3



(ง) T4

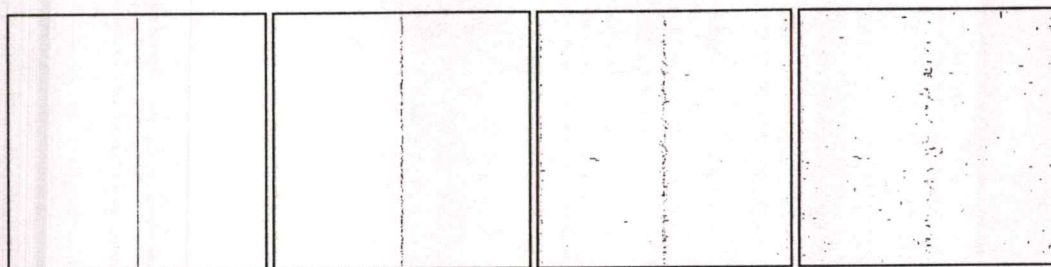


(จ) T5

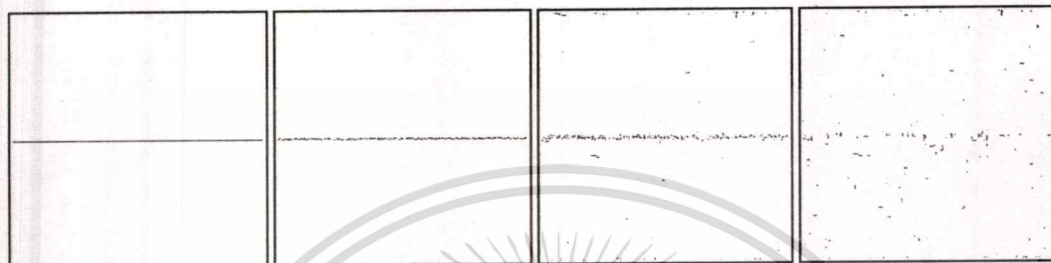
รูปที่ 5.4 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมของ Marr (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน,

SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1

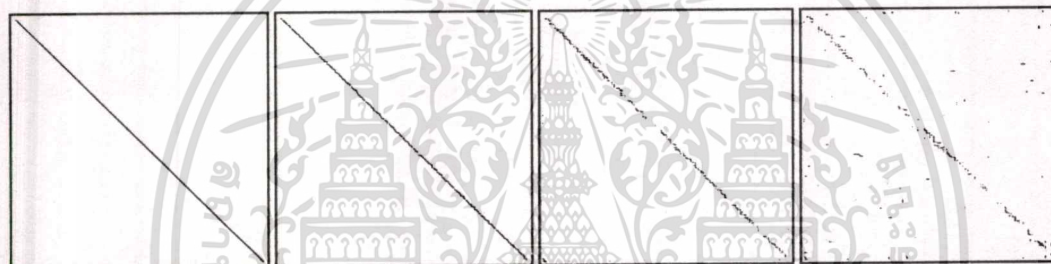
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



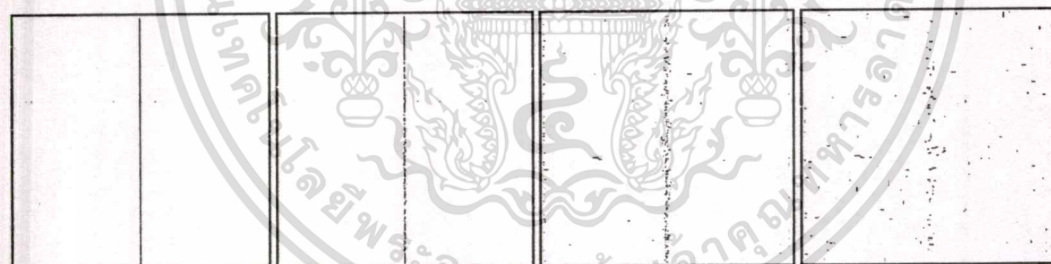
(ก) T1



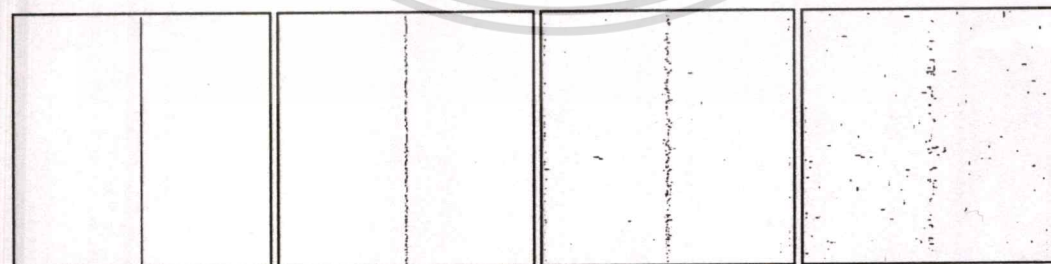
(ข) T2



(ค) T3



(ง) T4

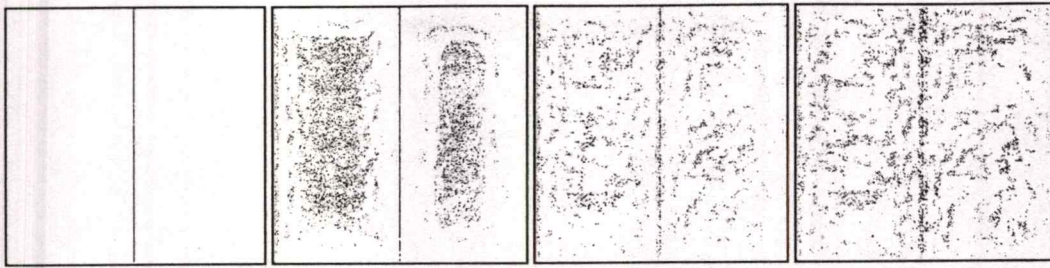


(จ) T5

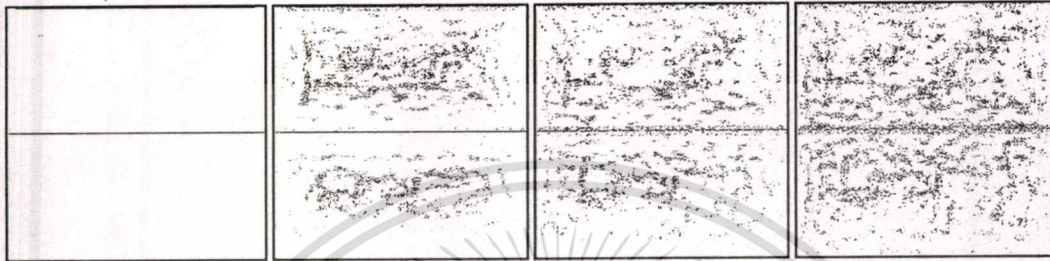
รูปที่ 5.5 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมของ Canny (จากซ้ายไปขวา) ไม่มีสัญญาณรบกวน,

SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1

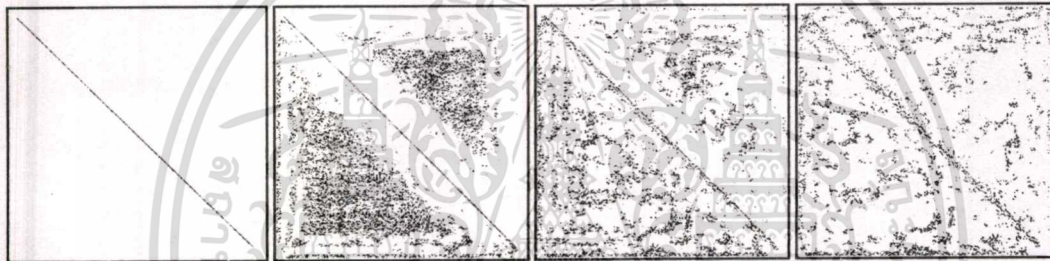
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) T1



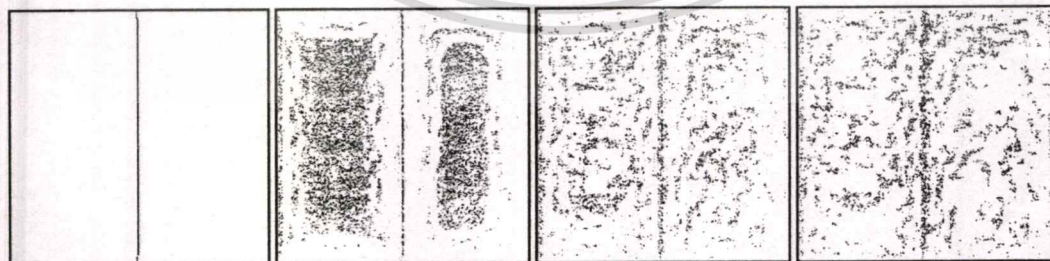
(ข) T2



(ค) T3



(ง) T4

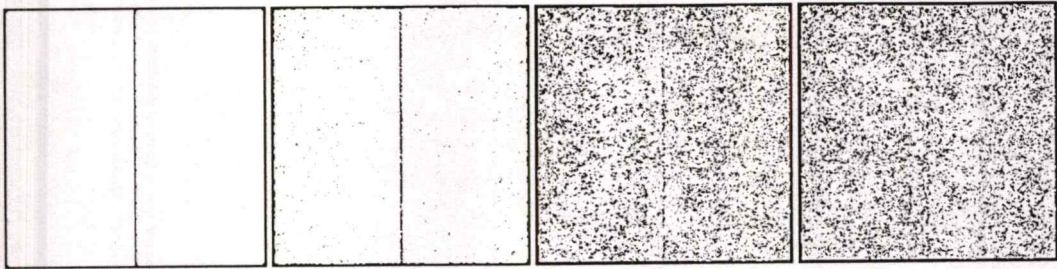


(จ) T5

รูปที่ 5.6 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมของ Shen (จากซ้ายไปขวา)ไม่มีสัญญาณรบกวน,

SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1

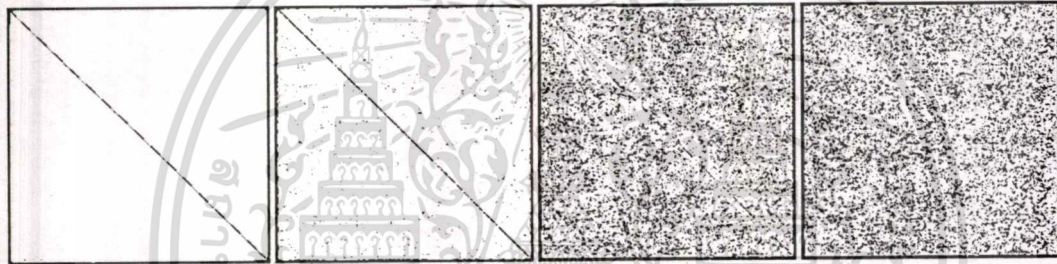
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



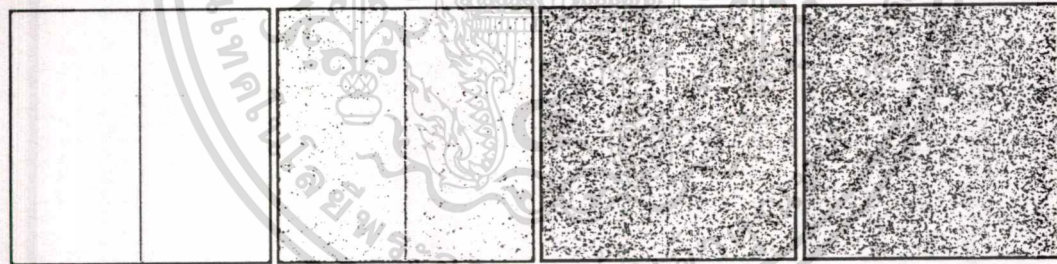
(ก) T1



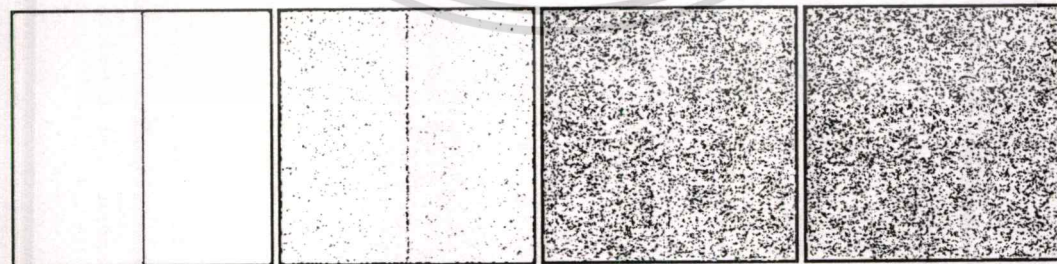
(ข) T2



(ค) T3



(ง) T4

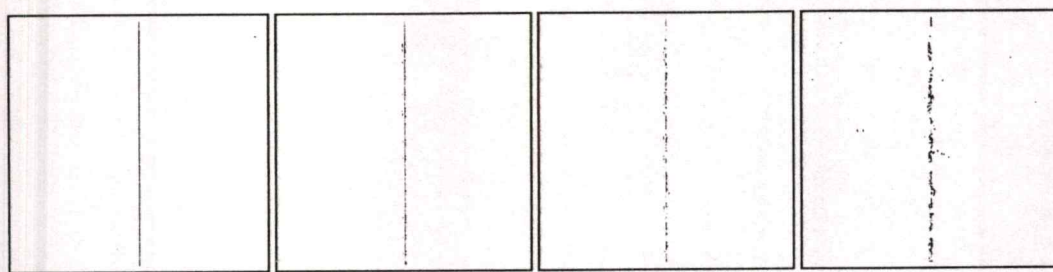


(จ) T5

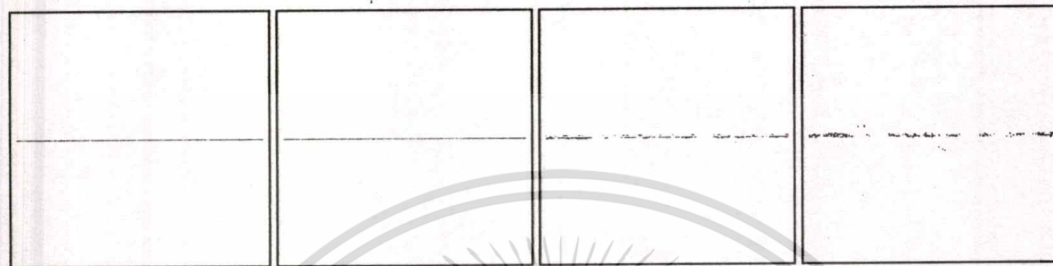
รูปที่ 5.7 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมของ Sundaram(จากซ้ายไปขวา)ไม่มีสัญญาณรบกวน,

SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) T1



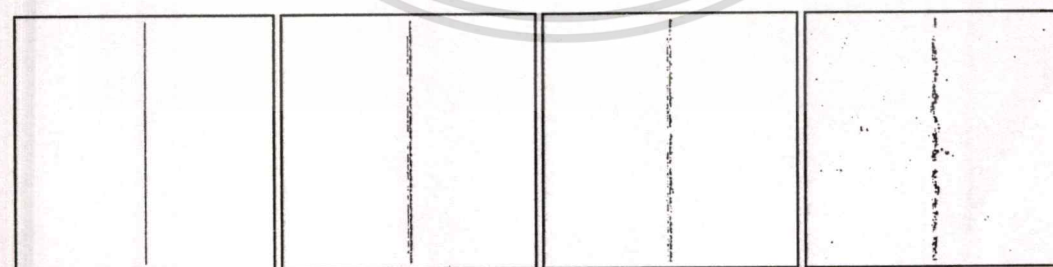
(ข) T2



(ค) T3



(ง) T4



(จ) T5

รูปที่ 5.8 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึม M.DSCT (จากซ้ายไปขวา)ไม่มีสัญญาณรบกวน,

SNR.=6, SNR. = 2, SNR. = 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

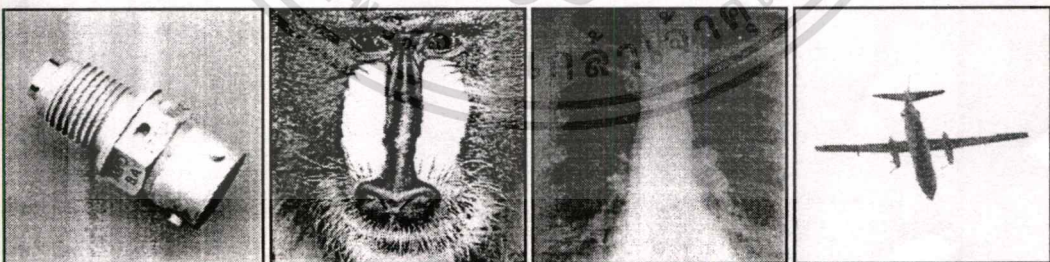
ผลการทดลองจากกราฟรูปที่ 5.1 แสดงความถูกต้องของขอบภาพ(พิจารณาจาก false positive, false negative และ localization error) พบว่าทุกภาพทดสอบให้ผลลัพธ์คล้ายกัน คือ กรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน ขอบภาพที่ได้จากทุกอัลกอริธึมจะมีความถูกต้องสูงใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไป จะเห็นว่าในอัลกอริธึมอื่น ความถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่อัลกอริธึมแบบ M.DSCT จะสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้มากกว่า

ผลการทดลองจากกราฟรูปที่ 5.2 แสดงความต่อเนื่องและความบางของขอบภาพ พบว่า กรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน ขอบภาพที่ได้จากทุกอัลกอริธึมจะมีความต่อเนื่องและความบางสูง แต่เมื่อเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไป ทุกอัลกอริธึมจะมีความต่อเนื่องและความบางของขอบภาพลดลง และเมื่อสัญญาณรบกวนมีค่ามาก($SNR.=1$) อัลกอริธึม M.DSCT จะมีความต่อเนื่องและความบางของขอบภาพน้อยกว่าอัลกอริธึมของ Marr และ Canny เล็กน้อย

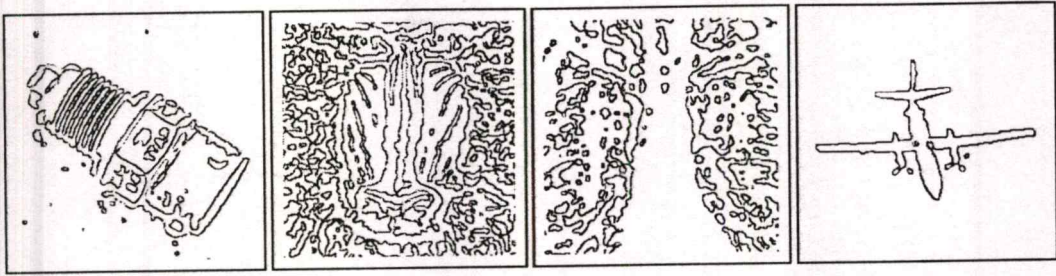
อย่างไรก็ตามอัลกอริธึมของ Canny, Shen Castan และ Sundaram รวมไปถึง M.DSCT เองก็มีพารามิเตอร์หลายตัวที่สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับภาพแต่ละภาพ เพื่อให้ประสิทธิภาพดีขึ้นได้

5.3 การทดลองกับภาพจริง

หัวข้อนี้จะเป็นการทดลองทำการหาขอบภาพเมื่อใช้กับภาพจริง แล้วเปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมต่างๆ ภาพต้นฉบับที่ใช้ทำการทดลองเป็นภาพระดับเทา(8บิต)ขนาด 256×256 พิกเซล จำนวนสี่ภาพประกอบด้วยภาพเครื่องบินรบ, ภาพลิง, ภาพกระดุก และภาพเครื่องบินซึ่งแต่ละภาพมีรายละเอียดของขอบภาพและพื้นที่ของฉากหลังต่างๆกัน



รูปที่ 5.9 ภาพต้นฉบับต่างๆ



(ก) Marr



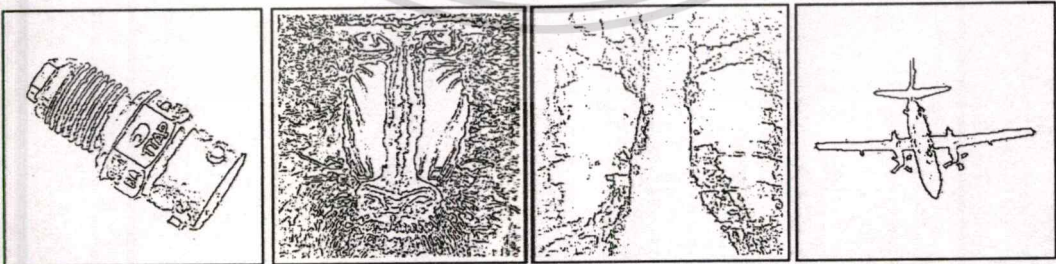
(ข) Canny



(ค) Shen



(ง) Sundaram



(จ) M. DSCT.

รูปที่ 5.10 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในภาพที่มีลายละเอียดน้อย เช่น ภาพเครื่องบิน ภาพผลลัพธ์ที่ได้จะไม่แตกต่างกันมาก แต่ในภาพอื่นๆที่มีลายละเอียดของภาพมากขึ้นการพิจารณาหาขอบภาพแบบหลายความละเอียดที่ใช้ในอัลกอริธึมของ Sundaram และ M.DSCT ทำให้ได้ลายละเอียดของขอบภาพในภาพผลลัพธ์มากกว่าอัลกอริธึมอื่น แต่ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริธึมของ Sundaram จะมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมากดังจะเห็นในภาพเครื่องจักรและภาพกระดูก นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า ซึ่งจะแสดงให้เห็นในการทดลองต่อไป

;-

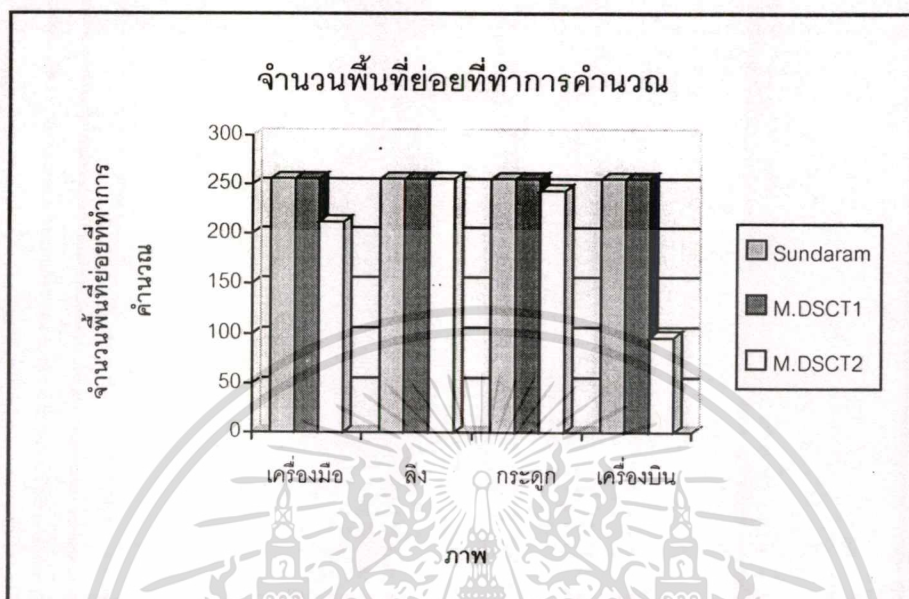
5.4 การเพิ่มความเร็วในการหาขอบภาพโดยใช้โครงสร้างควอดทรี

ในการทดลองตอนนี้จะเป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมของการใช้โครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7 มาช่วยในการระบุตำแหน่งของพื้นที่ที่มีขอบภาพและเพิ่มความเร็วในการหาขอบภาพโดยจะข้ามการคำนวณในส่วนที่เป็นฉากหลัง

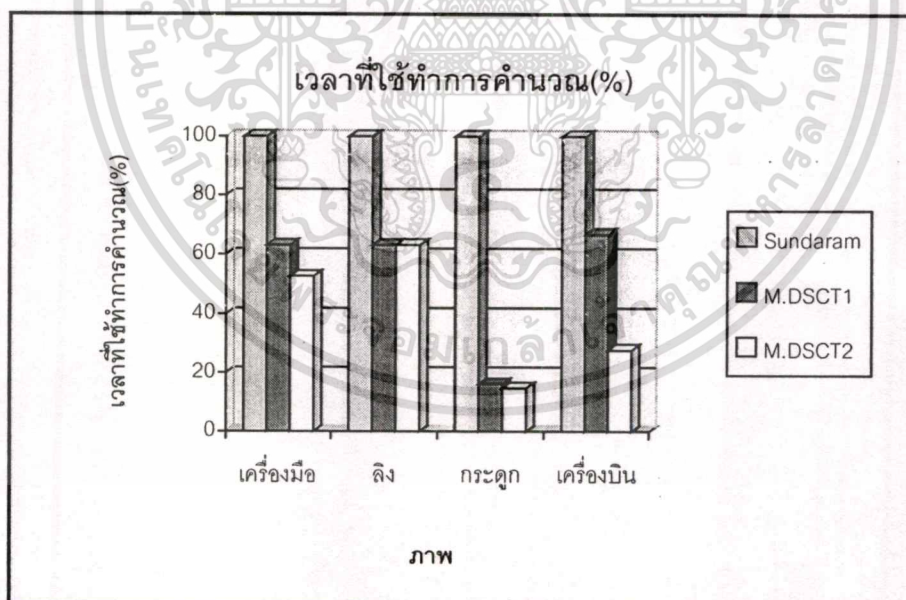
การทดลองได้ใช้ภาพต้นฉบับชุดเดียวกับการทดลองที่แล้ว(รูปที่5.9) โดยใช้อัลกอริธึมของ Sundaram เปรียบเทียบกับอีกสองอัลกอริธึมที่ทำการหาขอบภาพโดยใช้การปรับค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์แบบอัตโนมัติ อัลกอริธึมแรก(M.DSCT1)จะแบ่งภาพเป็นพื้นที่ย่อยขนาด 16x16 พิกเซลแล้วนำไปคำนวณหาขอบภาพ อัลกอริธึมที่สอง(M.DSCT2)จะทำการประมวลผลก่อนโดยทำการกระบวนกรควอดทรีดีคอมโพสิชันเพื่อหาโครงสร้างแบบควอดทรีของภาพต้นฉบับ จากนั้นจึงทำการหาขอบภาพของพื้นที่ย่อย

ตารางที่ 5.1 การทดลองการเพิ่มความเร็วในการหาขอบภาพโดยใช้โครงสร้างควอดทรี

ภาพ	จำนวนพื้นที่ย่อยที่ทำการคำนวณ(บล็อก)			เวลา(วินาที)		
	Sundaram	M.DSCT1	M.DSCT2	Sundaram	M.DSCT1	M.DSCT2
เครื่องมือ	256	256	212	19	12	10
ลิง	256	256	256	19	12	12
กระดูก	256	256	244	74	12	11
เครื่องบิน	256	256	96	18	12	5



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงจำนวนพื้นที่ย่อยที่ทำการคำนวณอัลกอริธึมต่างๆ

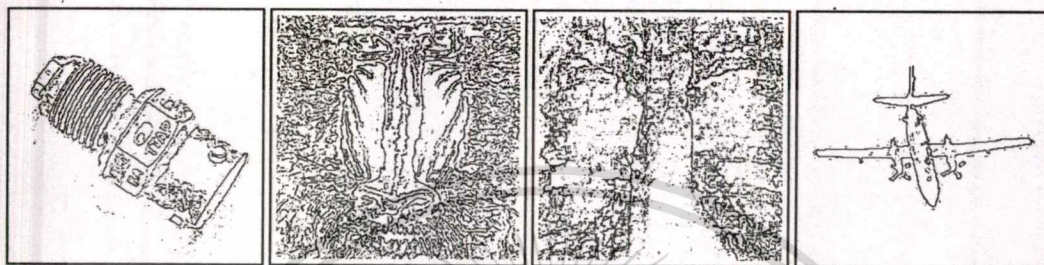


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณของอัลกอริธึมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Sundaram



(ข) M.DSCT1



(ค) M.DSCT2

รูปที่ 5.13 ภาพผลลัพธ์จากอัลกอริทึมของ Sundaram เปรียบเทียบกับ M.DSCT1 และ M.DSCT2

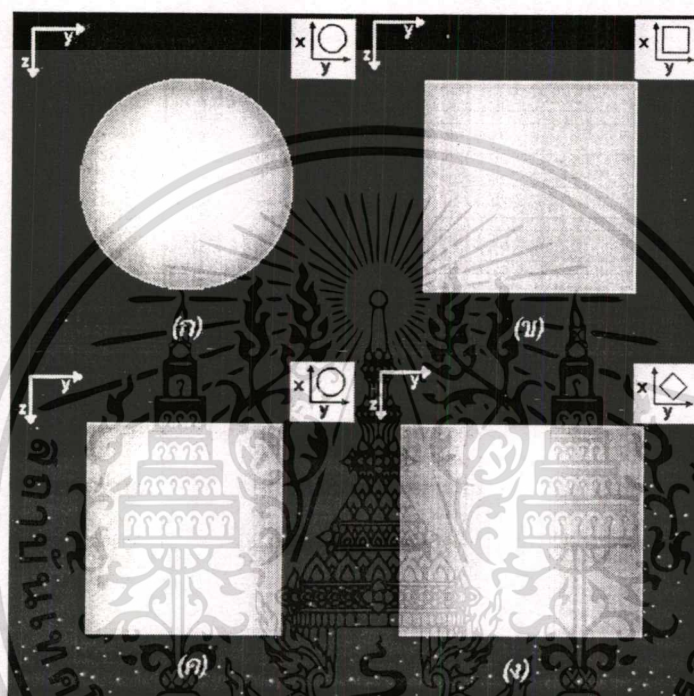
จากผลการทดลองพบว่าจำนวนพื้นที่ที่ย่อยที่ทำการคำนวณที่ใช้ในอัลกอริทึมของ Sundaram และ M.DSCT1 นั้นเท่ากัน แต่อัลกอริทึมของ Sundaram จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า เนื่องจากใช้การปรับค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์แบบทำซ้ำ

ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง M.DSCT1 และ M.DSCT2 พบว่าการใช้กระบวนการควอดทรีดีคอมโพสิชันเป็นส่วนประมวลผลก่อน(M.DSCT2)จะสามารถลดจำนวนพื้นที่ที่ย่อยและเวลาที่ใช้ในการหาขอบภาพได้ประมาณ 20-60% เมื่อเปรียบเทียบกับการแบ่งภาพเป็นพื้นที่ย่อยแบบปกติ(M.DSCT1) ในขณะที่ภาพผลลัพธ์ของอัลกอริทึมทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก

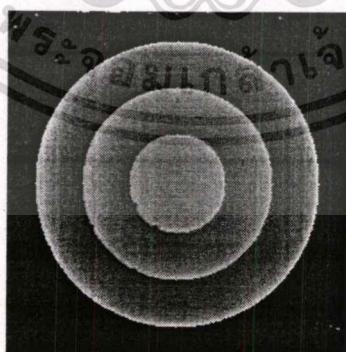
กระบวนการทำควอดทรีดีคอมโพสิชันในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความแตกต่างระหว่างค่าระดับเทาสูงสุดและต่ำสุดของพื้นที่ที่พิจารณาเป็นตัวตัดสินความเป็นโฮโมจีเนียสของพื้นที่ที่พิจารณา การกำหนดค่าดังกล่าวต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับแต่ละภาพ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดค่าดังกล่าวให้มีค่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของค่าระดับเทาสูงสุดและต่ำสุดในภาพ

5.5 การประยุกต์ใช้กับการหาพื้นผิวของข้อมูลภาพเชิงปริมาตร

การทดลองตอนนี้จะนำเสนอการทดลองใช้อัลกอริทึมในการหาพื้นผิวของข้อมูลภาพเชิงปริมาตรที่เสนอในหัวข้อที่ 4.7 ทำการหาดำแหน่งพื้นผิวของข้อมูล การทดลองได้แบ่งออกเป็นสองส่วน การทดลองแรกทำกับภาพเชิงปริมาตรของรูปทรงเรขาคณิตรูปแบบต่างๆที่จำลองขึ้นขนาด $256 \times 256 \times 256$ พิกเซล จำนวน 5 ภาพได้ผลการทดลองตามรูปที่ 5.14 (ภาพในกรอบเล็กที่มุมขวาด้านบนเป็นมุมมองจากด้านบนของแต่ละภาพ) และรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 ภาพผลลัพธ์ของ (ก)ทรงกลม (ข)ลูกบาศก์ (ค)ทรงกระบอก (ง)ลูกบาศก์หมุน45องศา

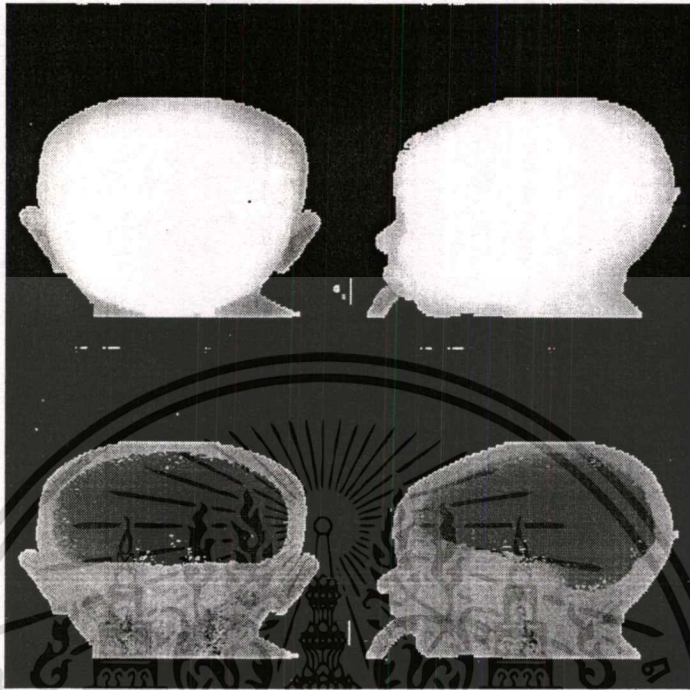


รูปที่ 5.15 ภาพผลลัพธ์ของภาพทรงกลมซ้อนกัน3ทรงกลมโดยให้ฉากรับภาพอยู่ที่กลางทรงกลม

การทดลองตอนที่ 2 ทำการทดลองกับข้อมูลภาพ CT (Computer Tomography) เป็นภาพตัดขวางของศีรษะเด็กจำนวน 80 สไลด์ แต่ละสไลด์มีขนาด 256×256 พิกเซล โดยได้ชุดข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างสไลด์ที่หายไปด้วยการแทรกค่า (interpolation) ระหว่างสไลด์ให้มีขนาด 256x256x256 พิกเซล ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ภาพผลลัพธ์ของภาพศรีษะเด็ก เมื่อฉายภาพในทิศทางต่างกัน และฉากรับภาพอยู่ที่ (บน) $n=0$, (ล่าง) $n=128$ โดย n เป็นระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการฉายแสง

ตารางที่ 5.2 เวลาที่ใช้ในการตรวจหาดำแหน่งของพื้นผิว

ภาพ	ลูกบาศก์	ลูกบาศก์ หมุน 45 องศา	ทรงกลม	ทรงกระบอก	ทรงกลม ซ้อนกัน	ภาพศรีษะ เด็ก
เวลา(นาที: วินาที)	1:30	2:10	1:42	1:25	3:26	3:14

ผลการทดลองในรูปที่ 5.14-5.16 ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาขอบภาพโดยใช้คุณสมบัติของ มัลติริโซลูชัน DSCT สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาดำแหน่งพื้นผิวได้ ในรูปที่ 5.15 และ 5.16 แสดงให้เห็นว่าเนื่องจากการหาพื้นผิวนี้ได้ประยุกต์มาจากการหาขอบภาพ ดังนั้นเมื่อให้ตำแหน่งของฉากรับภาพอยู่ภายในวัตถุ ก็จะสามารถมองเห็นพื้นผิวที่ซ่อนอยู่ภายในพื้นผิวอื่นได้ด้วย

นอกจากนั้นจากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาพื้นผิวของแต่ละภาพมีค่าประมาณ 1 ถึง 3 นาทีซึ่งถือว่าเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการที่ทำคอนโวลูชันในโดเมนของระยะทาง (งานวิจัย[11])

ใช้เวลาในการทำคอนโวลูชันถึง 93 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

6.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองวัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึม แม้ว่าในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีค่ามาก ขอบภาพที่ได้จากอัลกอริทึมแบบ M.DSCT จะมีค่าความต่อเนื่องและความบางน้อยกว่าอัลกอริทึมของ Marr และ Canny(กราฟรูปที่ 5.2) แต่เมื่อพิจารณาถึงความถูกต้องของขอบภาพ(กราฟรูปที่ 5.1) พบว่าอัลกอริทึม M.DSCT จะมีความถูกต้องมากกว่าจากอัลกอริทึมอื่นค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมแล้วอัลกอริทึม M.DSCT จะดีกว่า ความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของอัลกอริทึม M.DSCT นั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของวินโดวส์ที่ใช้ประมาณค่าเกรเดียนในตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง ถ้าความกว้างมีค่ามากจะทำให้ความทนต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูง อย่างไรก็ตามการให้ความกว้างของวินโดวส์มีค่ามากอาจทำให้ค่าเกรเดียนในตำแหน่งที่ไม่ได้เป็นขอบภาพแต่อยู่ใกล้กับขอบภาพมีค่าผิดไปจากความเป็นจริงได้เช่นกัน โดยเฉพาะกรณีที่ภาพต้นฉบับมีสัญญาณรบกวนน้อย ดังนั้นควรกำหนดความกว้างของวินโดวส์ให้เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละภาพ

ในส่วนที่สองเป็นการทดลองกับภาพจริง พบว่าในภาพที่มีลายละเอียดมากการพิจารณาปรับฟิลเตอร์ตามความเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละพื้นที่ของอัลกอริทึมที่นำเสนอจะทำให้ได้รายละเอียดของขอบภาพมากขึ้นเช่นเดียวกับ อัลกอริทึมของ Sundaram

สำหรับการทดลองการใช้โครงสร้างข้อมูลแบบควอดทรีมาใช้ในการลดพื้นที่ย่อยและเวลาในการหาขอบภาพนั้น สามารถแยกพิจารณาได้สองส่วน ส่วนแรกเปรียบเทียบระหว่างการปรับพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์แบบทำซ้ำ (Sundaram) และแบบอัตโนมัติ (M.DSCT1.) พบว่าการปรับพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์แบบอัตโนมัติสามารถทำได้เร็วกว่า

ส่วนที่สองเปรียบเทียบระหว่างการแบ่งภาพเป็นพื้นที่ย่อยตามปกติ(M.DSCT1.) กับการใช้กระบวนการควอดทรี ดีคอมโพสิชันเป็นส่วนประมวลผลก่อน(M.DSCT2.) จะเห็นว่าอัลกอริทึม (M.DSCT2.)ต้องเสียเวลาส่วนหนึ่งไปในการหาโครงสร้างข้อมูลควอดทรีของภาพต้นฉบับ อย่างไรก็ตามเวลาที่เสียไปนี้ไม่มีผลมากนักดังจะเห็นได้ในการทดลองกับของภาพลิง จำนวนพื้นที่ย่อยที่ทำการคำนวณของทั้งสองอัลกอริทึมเท่ากัน คือการใช้กระบวนการควอดทรีดีคอมโพสิชันไม่สามารถข้ามส่วนที่เป็นเนื้อเดียวกันได้เลย และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเท่ากันด้วย ขณะที่ในภาพที่มีพื้นที่ที่เป็นเนื้อเดียวกันมากเช่น ภาพเครื่องบิน การใช้กระบวนการควอดทรีดีคอมโพสิชันในการ

แบ่งภาพจะสามารถลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้มาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำกระบวนการควอดทรีดีคอมโพสิชันมาใช้เพื่อช่วยลดเวลาในการคำนวณ

ในการทดลองส่วนสุดท้ายได้นำเสนอผลการทดลองในการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอในการหาตำแหน่งของพื้นผิวในข้อมูลเชิงปริมาตร จากผลการทดลองจะเห็นว่าอัลกอริทึมสามารถหาตำแหน่งของพื้นผิวได้ดี และรวดเร็วกว่าวิธีที่ทำโดยการคอนโวลูชันในโดเมนระยะทาง

6.2 แนวทางในการพัฒนา

อัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการปรับพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ตามค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าระดับเทาในพื้นที่ที่พิจารณา โดยการตั้งสมมติฐานว่าในพื้นที่ที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานมาก ขอบภาพก็จะมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อให้ฟิลเตอร์ตรวจพบขอบภาพได้ถูกต้องมากขึ้น พารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ควรจะมีค่าน้อย จะเห็นได้ว่าสมมติฐานดังกล่าวจะใช้ได้ดีในกรณีที่ภาพต้นฉบับไม่มีสัญญาณรบกวน เนื่องจากหากภาพต้นฉบับมีสัญญาณรบกวนเพิ่มเข้ามาด้วยจะทำให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเปลี่ยนไป ทำให้พารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ผิดเพี้ยนไปจากที่ต้องการได้ การพัฒนางานวิจัยในการหาขอบภาพที่ควรดำเนินต่อไปคือ การหาวิธีในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ ให้เหมาะสมกับภาพที่มีสัญญาณรบกวนด้วย โดยอาจเป็นการใช้คุณสมบัติอื่นมาประกอบการพิจารณา อีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือการประยุกต์ในการหาตำแหน่งของพื้นผิวของภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ เช่น การแยกแยะส่วนประกอบของอวัยวะต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Maher A. Sid-Ahmed. Image Processing theory, Algorithm and Architectures. International Editions. Singapore: McGraw-Hill, Inc. 1995.
- [2] Hideo Kitajima. "A Symmetric Cosine Transform." IEEE Trans on Computers, vol. C-29, no.4, April 1980, pp. 317-323.
- [3] David Salomon. Computer Graphics and Geometric Modeling. New York : Springer-Verlag New York, Inc. 1999.
- [4] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi and Brian G. Schunck. Machine Vision. International Editions. Singapore: McGraw-Hill, Inc. 1995.
- [5] J.R. Parker. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [6] R. Sundaram, O. K. Ersoy, and D. Hansen, "Adaptive approach to edge detection" Opt. Eng., vol. 34, no. 11, Nov. 1995, pp. 3271-3276.
- [7] R. Sundaram. "Algorithms for Adaptive Transform Edge Detection." IEEE Trans on Signal Processing, vol.47, no.8, August 1999, pp.2313-2317.
- [8] Kiatsuksri W., Sookpotharam S., Tungjikusolmun S. and Sangworasil M. "Edge Detection Base On Multiresolution DSCT." Proc. First International Conference on Mechatronics – ICOM01, Kuala Lumpur, Malaysia, Feb 2001, pp.461-467.
- [9] วรพจน์ เกียรติสุขศรี, มนต์ สังวรศิลป์. "อัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับพื้นผิวของภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์" การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยมหิดล 2544 หน้า 83.
- [10] Gabriele Lohmann. Volumetric Image Analysis. Chichester : John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [11] M. Bomans, K.H. Hohne, U. Tiede and M. Riemer, "3-D Segmentation of MR Image of the head for 3-D display." IEEE Trans on Med. Imaging, vol. 9, June 1990, pp.177-183.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. วรพจน์ เกียรติสุขศรี สุรพันธุ์ เชื้อไพบูลย์ และ มนัส สังวรศิลป์ "Edge Detection Base On Multiresolution DSCT" Proceedings of the fourth National Computer Science and Engineering Conference, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2543 หน้า 318-319
2. วรพจน์ เกียรติสุขศรี มนัส สังวรศิลป์ "อัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับพื้นผิวของภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์" การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยมหิดล 2544 หน้า 83
3. Kiatsuksri W., Sookpotharam S., Tungjitkusolmun S. and Sangworasil M. "Edge Detection Base On Multiresolution DSCT." Proc. First International Conference on Mechatronics – ICOM01, Kuala Lumpur, Malaysia, Feb 2001, pp.461-467.

ประวัติผู้เขียน

นายวรพจน์ เกียรติสุขศรี เกิดเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2518 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้