

การสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้การวิเคราะห์เซกเมนต์



นายจักรพงศ์ นาคเดช

## ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEXTURE SYNTHESIS USING SEGMENT ANALYSIS



Mr. Jakrapong Narkdej

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

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้การวิเคราะห์เซกเมนต์

โดย

นายจักรพงษ์ นาคเดช

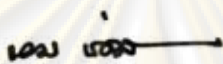
สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

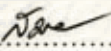
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

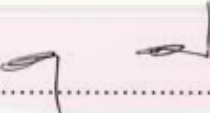
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภาวดี สมภักดี)

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จักรพงษ์ นาคเดช : การสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้การวิเคราะห์เซกเมนต์. (TEXTURE SYNTHESIS USING SEGMENT ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ. ดร. พิษณุ คนองชัยยศ, 96 หน้า.

การให้แสงและเงาเป็นกระบวนการที่สำคัญมากต่อความสมจริงในการสร้างภาพสามมิติ ข้อมูลสำคัญที่ช่วยให้ผลลัพธ์เหมือนจริงก็คือลายผิวซึ่งเป็นภาพที่เก็บรายละเอียดของพื้นผิวเอาไว้ แต่เนื่องจากกระบวนการเก็บตัวอย่างมักประสบปัญหาทำให้ไม่สามารถเก็บตัวอย่างลายที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะนำไปคลุ่มวัตถุได้ทั้งหมด กระบวนการวิเคราะห์และสังเคราะห์ลายผิวจึงเข้ามา มีบทบาทสำคัญในการสร้างลายผิวที่มีขนาดที่ต้องการโดยที่มองไม่เห็นการซ้ำกัน และไม่เห็นรอยต่อ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระเบียบวิธีการสังเคราะห์ลายผิวแบบใหม่โดยการประยุกต์นำเอา กระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพมาใช้วิเคราะห์ลายผิวดั้งฉบับก่อนเพื่อนำข้อมูลมาช่วยใน กระบวนการสังเคราะห์ลายผิว ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้ในการเลือกค่าตัวแปรขนาดของแผ่น และ พื้นที่ซ้อนทับ ช่วยเพิ่มความเร็วในกระบวนการสังเคราะห์ลายผิว และช่วยให้ผลลัพธ์มีความ ต่อเนื่องกันของลาย วิธีการที่เสนอสามารถใช้กับลายผิวได้หลากหลาย ไม่ต้องอาศัยความ ช่วยเหลือจากมนุษย์ และมีความเร็วเพียงพอที่จะนำไปใช้สังเคราะห์ลายผิวขนาดใหญ่ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อนิสิต *Pinus*  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ *๑๑*  
 ปีการศึกษา.....2551.....

## 5070235021 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : COMPUTER GRAPHICS / TEXTURE / TEXTURE ANALYSIS /  
TEXTURE SYNTHESIS / PATCH BASED TEXTURE SYNTHESIS / IMAGE  
SEGMENTATION

JAKRAPONG NARKDEJ : TEXTURE SYNTHESIS USING SEGMENT  
ANALYSIS. ADVISOR : PIZZANU KANONGCHAIYOS, Ph.D., 96 pp.

Rendering is the most important process in computer graphics. Texture really helps improving quality of the picture because it holds surface details in image format without having to store large geometry data. But texture acquirement process is limited to capturing devices and surface constraints that result in small texture. When using these textures, they must be expanded to cover surface area. But simple algorithm such as tiling can produces repetitive feature along with artifacts. Our research proposed new method to synthesize texture using segment data from image segmentation. We use this data to determine the suitable patch size and boundary zone to be used in synthesis and use segment information for suitable patch selection process. This technique speeds up the selection and brings better result patches. Our technique helps reducing synthesis time, improve result quality and provide automatic process for synthesis texture.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Computer Engineering Student's Signature : *Jakrapong Narkdej*  
Field of Study : Computer Engineering Advisor's Signature : *Pizzanu Kanongchaiyos*  
Academic Year : 2008

## กิตติกรรมประกาศ

ตลอดระยะเวลาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีอุปสรรคต่าง ๆ เกิดขึ้น นานัปการ อันเป็นบทเรียนที่ทรงคุณค่ายิ่งแก่ผู้จัดทำ เพื่อที่จะได้ฝึกฝน เรียนรู้ และแก้ไขปัญหา ตลอดจนได้เพิ่มพูนทักษะต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการวิจัย ซึ่งทั้งหมดนี้ ล้วนเป็นปัจจัยที่ช่วยส่งเสริม และผลักดันศักยภาพให้แก่ผู้จัดทำเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะไม่สามารถ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าขาดแรงสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่าย ซึ่งข้าพเจ้าซาบซึ้งในความ กรุณาเหล่านี้ อย่างล้นพ้น และใคร่ขอใช้เนื้อที่ในกิตติกรรมประกาศของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็น สื่อกลางในการแสดงความขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งจากผู้จัดทำ

ประการแรก ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ คนองชัยยศ ผู้ซึ่งอบรม สั่งสอน ชี้แนะ และแก้ไขศิษย์คนนี้ ด้วยดีเสมอมา อันเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้ข้อคิดและข้อเสนอแนะ ต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาคุณภาพของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งคณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์นั้น ประกอบไปด้วยรองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ประสิทธิ์ จูตระกูล และรอง ศาสตราจารย์ ดร. ภาวดี สมภักดี

ขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ช่วยให้ชีวิตในการทำวิจัยมีสีสันและมีความหมายมากยิ่งขึ้น รวมทั้งช่วยเสนอแนวคิดต่าง ๆ ในการแก้ไขปัญหา

ขอบคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย ทำให้มีอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำวิจัย และช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายในการนำเสนอผลงานที่ ต่างประเทศ

สุดท้ายที่ขาดเสียมิได้ ขอบพระคุณครอบครัวที่น่ารักของผู้จัดทำทุก ๆ คน ที่เป็น กำลังใจ และให้การสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างอย่างดีเสมอมา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 ลายผิว (texture).....	6
2.1.2 สนามสุ่มของมาร์คอฟ (Markov random field : MRF).....	10
2.1.3 การสังเคราะห์ลายผิว (texture synthesis) .....	11
2.1.4 การแบ่งย่อยรูปภาพ (image segmentation) .....	13
2.1.5 การจัดกลุ่มข้อมูล (data classification) .....	16
2.1.6 อัลกอริทึมการค้นหาเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุด (approximate nearest neighbour).....	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20
2.2.1 การวิเคราะห์และสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้พีรามิด (Pyramid-based Texture Analysis/ Synthesis) .....	21
2.2.2 การสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละจุดภาพ (Texture Synthesis by Non-Parametric Sampling).....	21

2.2.3 การสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ (Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer) .....	23
2.2.4 การสังเคราะห์ลายผิวโดยการตัดกราฟ (Graphcut Texture : Image and Video Synthesis Using Graph Cuts) .....	23
2.2.5 การสังเคราะห์ลายผิวโดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูป (Near-regular Texture Synthesis) .....	24
2.2.6 การหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ (Optimizing the Parameters for Patch-based Texture Synthesis) .....	24
2.2.7 การหุ้มลายผิว(Lapped Textures) .....	26
2.2.8 อนุภาคลายผิว (Texture Particles) .....	27
2.2.9 การสังเคราะห์ลายผิวแบบทันกาลด้วยโครงสร้างรูปหลายเหลี่ยม (Real-Time Structured Texture Synthesis and Editing Using Image-Mesh Analogies) .....	28
2.2.10 ระบบการจัดการกระจายตัวสำหรับองค์ประกอบ (An Example-based Procedural System for Element Arrangement) .....	29
บทที่ 3 การวิเคราะห์ลายผิวโดยการวิเคราะห์เซกเมนต์.....	31
3.1 แนวคิด.....	32
3.2 การแบ่งย่อยรูปภาพ.....	34
3.3 การจัดกลุ่มเซกเมนต์ของภาพ.....	36
3.4 การเลือกขนาดของแผ่นภาพและพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม.....	38
3.4.1 ขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสม.....	39
3.4.2 ขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม.....	41
3.4.3 อัลกอริทึมในการเลือกขนาดของแผ่นภาพและพื้นที่ซ้อนทับ.....	42
บทที่ 4 การสังเคราะห์ลายผิวโดยการวิเคราะห์เซกเมนต์ .....	47
4.1 แนวคิด.....	47
4.2 ลักษณะของการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่น.....	50
4.3 การสร้างโครงสร้างต้นไม้ของแผ่นภาพ .....	51
4.4 การคัดเลือกแผ่นภาพจกลายผิวดั้งฉบับ.....	53
4.4.1 การทดสอบกับลายผิวดั้งฉบับทุกแผ่นที่เป็นไปได้.....	53



4.4.2 การสุ่มเลือกแผ่นลายผิวจากต้นฉบับมาทดสอบ.....	53
4.4.3 การเลือกแผ่นลายผิวจากต้นฉบับโดยดูจากแผนภาพการกระโดด.....	53
4.4.4 การเลือกแผ่นลายผิวจากต้นฉบับโดยการสร้างโครงสร้างต้นไม้จากค่าสี.....	54
4.4.5 การใช้โครงสร้างต้นไม้ของความหนาแน่นของกลุ่มภาพ รวมกับการ วิเคราะห์ความเหมาะสมโดยพิจารณาถึงป้ายชื่อกลุ่ม.....	54
4.5 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแผ่นภาพ.....	55
4.6 การแปะแผ่นลายผิวด้วยวิธีการตัดกราฟ.....	55
บทที่ 5 การทดลองและวิเคราะห์ผล.....	56
5.1 การทดลองเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของผลลัพธ์.....	56
5.1.1 ลายผิวแบบสโทแคสติก.....	58
5.1.2 ลายผิวแบบเนียร์สโทแคสติก.....	59
5.1.3 ลายผิวแบบมีโครงสร้างสม่ำเสมอ.....	62
5.1.4 ลายผิวแบบมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ.....	63
5.2 การทดลองเกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาของวิธีที่นำเสนอ.....	66
5.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพโดยการทดสอบกับโปรแกรมจริง.....	66
5.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาโดยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีที่ใช้.....	68
5.3 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของระเบียบวิธีที่ใช้.....	69
5.3.1 การทดสอบระเบียบวิธีการแบ่งย่อยภาพ.....	69
5.3.2 การทดสอบโครงสร้างต้นไม้และการค้นหาตัวอย่างลายผิว.....	70
5.3.3 การทดสอบวิธีการทดสอบความเหมาะสมของลายผิว.....	71
5.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับระเบียบการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีอื่น..	72
5.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ลายผิวด้วยวิธีอื่น.....	72
5.5.1 การเปรียบเทียบด้านคุณภาพของผลลัพธ์.....	72
5.5.2 การเปรียบเทียบด้านเวลาการทำงาน.....	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	78
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	78
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	80

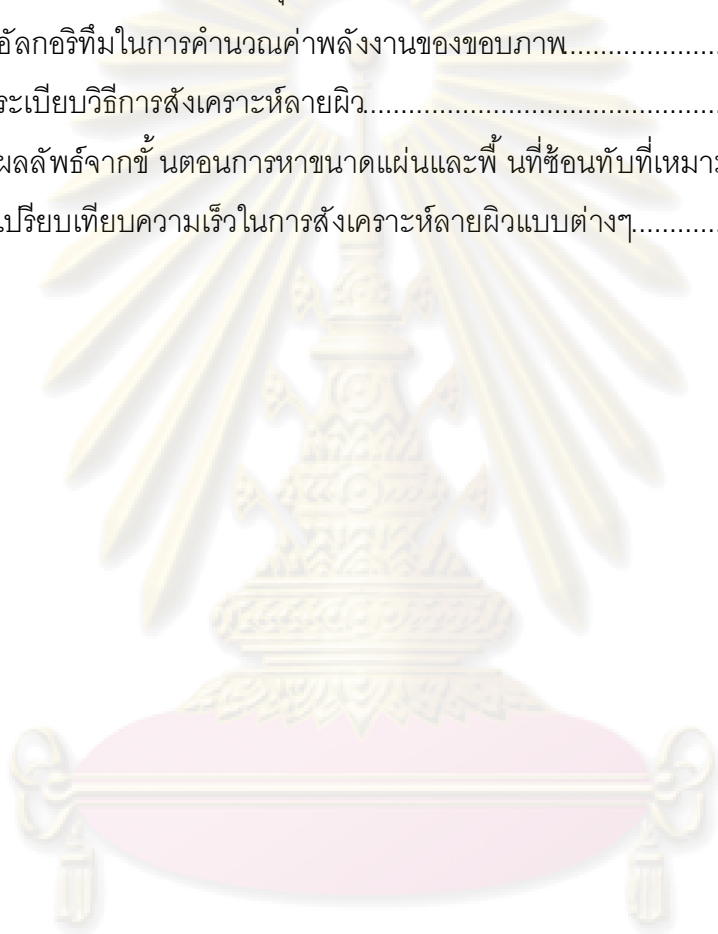
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96



# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 อัลกอริทึมการจัดกลุ่มข้อมูลที่ใ้.....	38
ตารางที่ 3.2 อัลกอริทึมในการเลือกขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ที่ซ้อนทับ.....	43
ตารางที่ 3.3 อัลกอริทึมในการเลือกกลุ่มที่เหมาะสม.....	44
ตารางที่ 3.4 อัลกอริทึมในการคำนวณค่าพลังงานของขอบภาพ.....	45
ตารางที่ 4.1 ระเบียบวิธีการสังเคราะห์หลายผิว.....	50
ตารางที่ 5.1 ผลลัพธ์จากขั้นตอนการหาขนาดแผ่นและพื้นที่ที่ซ้อนทับที่เหมาะสม.....	72
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความเร็วในการสังเคราะห์หลายผิวแบบต่างๆ.....	77



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณภาพและเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพ.....	7
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของลายผิวที่ไม่เหมาะสม.....	8
รูปที่ 2.3 การแบ่งประเภทของลายผิวตามงานวิจัยของหลิว.....	9
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเพื่อนบ้านเมื่อกำหนด $r$ เป็นค่าต่างๆ.....	10
รูปที่ 2.5 ลักษณะผลลัพธ์ของการสังเคราะห์ที่ดีและไม่ดีลายผิวแบบต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์ลายผิวด้วยเทคนิคต่างๆ.....	13
รูปที่ 2.7 ลักษณะของแผนภาพต้นไม้.....	19
รูปที่ 2.8 การแบ่งปริภูมิตามวิธีทั้งสามแบบ.....	20
รูปที่ 2.9 ผลลัพธ์จากระเบียบวิธีของโบเนต.....	21
รูปที่ 2.10 วิธีการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละจุด.....	22
รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของอัลกอริทึมตัดกราฟ.....	24
รูปที่ 2.12 แสดงผลจากวิธีการหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่น.....	26
รูปที่ 2.13 แสดงภาพต้นฉบับและภาพหลังการสังเคราะห์ด้วยวิธีการหุ้มลายผิว.....	27
รูปที่ 2.14 แสดงภาพการทำงานของวิธีอนุภาคลายผิว.....	28
รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของการสังเคราะห์ลายผิวด้วยโครงสร้างรูปหลายเหลี่ยม.....	29
รูปที่ 2.16 แสดงการทำงานของระบบการจัดการกระจายตัวสำหรับองค์ประกอบ.....	29
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมด.....	31
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างลายผิวที่มีองค์ประกอบภายในที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด.....	32
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพที่มีรอยต่ออย่างชัดเจน.....	33
รูปที่ 3.4 ผลลัพธ์จากระบวนการแยกย่อยรูปภาพ.....	34
รูปที่ 3.5 ผลลัพธ์จากการจัดกลุ่มตามค่าสี.....	37
รูปที่ 3.6 ขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของลาย องค์ประกอบ.....	39
รูปที่ 3.7 ขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดของลายองค์ประกอบ.....	40
รูปที่ 3.8 ขนาดของแผ่นภาพที่ใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการซ้ำกันของลาย.....	41
รูปที่ 3.9 ขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดคุณภาพของผลลัพธ์ลดลง.....	42
รูปที่ 3.10 การคำนวณระยะห่างระหว่างเซกเมนต์.....	44

รูปที่ 3.11 การแบ่งพื้นที่รอบๆ เซกเมนต์.....	45
รูปที่ 4.1 แสดงการทำงานของเครื่องฉายหลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพในงานของเอพอส.....	48
รูปที่ 4.2 แสดงวิธีการการคัดเลือกแผ่นที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	48
รูปที่ 4.3 แสดงการทำงานของเครื่องหาแผ่นที่เหมาะสม และการแก้ไขพื้นที่ทับซ้อน.....	49
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการคำนวณข้อมูลการกระจายตัวของแผ่นภาพ.....	51
รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์เปรียบเทียบระหว่างต้นไม้ที่ใช้ทุกแผ่นกับต้นไม้ที่เลือกใช้เพียงบางแผ่น.....	52
รูปที่ 5.1 ภาพหลายผิวที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	57
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสังเคราะห์หลายผิวแบบสแตติค.....	58
รูปที่ 5.3 ผลจากการแบ่งย่อยภาพ และการจัดกลุ่มของหลายผิวสโโทแคสติก.....	59
รูปที่ 5.4 ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์หลายผิวแบบเนียร์สโโทแคสติก.....	60
รูปที่ 5.5 ภาพหลายผิวด้านฉบับที่มีความแตกต่างกันของลาย ทำให้ผลลัพธ์ผิดพลาด.....	61
รูปที่ 5.6 ผลจากผลลัพธ์จากการสังเคราะห์เมื่อทำการแก้ไขขนาดของแผ่นให้ใหญ่ขึ้น นเล็กน้อย.....	61
รูปที่ 5.7 ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์หลายผิวแบบสม่ำเสมอ.....	62
รูปที่ 5.8 ผลจากผลลัพธ์จากการสังเคราะห์หลายผิวแบบสม่ำเสมอที่ใช้ค่าขนาดของแผ่นถูกต้อง.....	63
รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์หลายผิวแบบไม่สม่ำเสมอ.....	64
รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการจัดกลุ่มของหลายผิวด้านฉบับบางลาย.....	65
รูปที่ 5.11 การสังเคราะห์หลายผิว โดยการเลือกกลุ่มโดดเด่นด้วยตนเองเปรียบเทียบกับการเลือกโดยอัตโนมัติ.....	65
รูปที่ 5.12 เวลาที่ใช้สังเคราะห์หลายผิวเมื่อใช้หลายผิวด้านฉบับขนาดต่างๆ.....	66
รูปที่ 5.13 เวลาที่ใช้สังเคราะห์หลายผิวกำหนดขนาดของผลลัพธ์เป็นขนาดต่างๆ.....	67
รูปที่ 5.14 เวลาที่ใช้สังเคราะห์หลายผิวเมื่อหลายผิวด้านฉบับมีเซกเมนต์เป็นจำนวนต่างๆ.....	68
รูปที่ 5.15 ตัวอย่างหลายผิว และจำนวนเซกเมนต์ที่ได้จากการแบ่งย่อยภาพ.....	70
รูปที่ 5.16 ผลลัพธ์จากการค้นหาแผ่นภาพที่เหมาะสมจากโครงสร้างต้นไม้.....	71
รูปที่ 5.17 ตัวอย่างค่าพลังงานของพื้นที่ซ้อนทับจากการตรวจสอบหาแผ่นที่เหมาะสม.....	71
รูปที่ 5.18 แสดงผลลัพธ์ของการสังเคราะห์หลายผิวแบบต่างๆ(1).....	74
รูปที่ 5.19 แสดงผลลัพธ์ของการสังเคราะห์หลายผิวแบบต่างๆ(2).....	75
รูปที่ 5.20 การกระจายตัวของจำนวนเซกเมนต์ของหลายผิวที่ใช้ทดสอบ.....	76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การให้แสงและเงาแบบเหมือนจริง (photorealistic rendering) เป็นกระบวนการสร้างภาพสามมิติที่มีความเหมือนจริงด้วยคอมพิวเตอร์ การให้แสงและเงานั้นต้องการข้อมูลวัตถุในฉาก ซึ่งประกอบด้วย รูปร่าง ตำแหน่ง ทิศทาง ลักษณะของพื้นผิว แหล่งกำเนิดแสง และกล้อง ข้อมูลที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่งต่อความสมจริงก็คือลักษณะของพื้นผิว ซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติการสะท้อนของพื้นผิว (reflection) สีของพื้นผิว (surface color) ระดับคล้ำสี (shading) ความโปร่งแสงของพื้นผิว (transparency) เป็นต้น

เพื่อให้ภาพผลลัพธ์ได้ผลเหมือนจริงที่สุด ศิลปินส่วนใหญ่มักใช้วิธีการถ่ายรูปจากพื้นผิวจริงเพื่อเก็บตัวอย่างเป็นภาพ เพื่อที่จะนำมาใช้กำหนดสีพื้นผิวของรูปทรงสามมิติ การถ่ายรูปจากพื้นผิวมักมีข้อจำกัดในหลายด้าน เช่น ขนาดของพื้นผิว ความโค้งมนของพื้นผิว ความละเอียดของกล้องที่ใช้ ขนาดของพื้นที่เก็บข้อมูล เป็นต้น จากข้อจำกัดเหล่านี้ ทำให้รูปของพื้นผิวที่เก็บได้มักจะมีขนาดจำกัด ทำให้เวลานำไปใช้กับรูปทรงสามมิติจะต้องทำการขยายรูปด้วยวิธีต่างๆ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมดของรูปทรง

การขยายรูปของลายผิวเพื่อให้ครอบคลุมพื้นผิวของรูปทรงนั้น ไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากเมื่อขยายรูปก็จะทำให้รายละเอียดของลายขยายออกด้วย ซึ่งไม่ตรงกับความต้องการ ในปัจจุบันเทคนิคที่นิยมใช้ก็คือการสร้างลายผิวที่สามารถวางต่อกันได้โดยไม่เห็นขอบ แล้วใช้วิธีการวางลายเดิมซ้ำๆ เหมือนการปูกระเบื้องจนเต็มพื้นผิวที่ต้องการ แม้ว่าวิธีนี้จะสามารถเพิ่มขนาดของลายผิวได้ตามต้องการ แต่ศิลปินก็จะต้องมาแก้ปัญหาในเรื่องของการซ้ำกันของลายอีกทีหนึ่งด้วยวิธีอื่น เช่น การผสมลายต่างๆ ที่มีความละเอียดไม่เท่ากันเข้าด้วยกัน เพิ่มความแตกต่างของแสงและเงา เป็นต้น การสังเคราะห์ลายผิวจึงเป็นศาสตร์ที่เข้ามาช่วยแก้ปัญหานี้ โดยการวิเคราะห์ลายต้นฉบับเพื่อหาคุณลักษณะที่สำคัญ แล้วจึงนำเอาลักษณะของภาพที่ได้มาช่วยสังเคราะห์ให้ภาพใหญ่ขึ้น โดยที่ลายที่ได้จะต้องดูคล้ายกับลายเดิม และไม่เกิดการซ้ำกันของลาย

งานวิจัยด้านการสังเคราะห์ลายผิวเริ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 [1] และได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง แม้ในปัจจุบันก็มีงานวิจัยด้านนี้ออกมาอยู่ตลอด อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีที่เสนอก็ดังกล่าวไม่มีวิธีใดที่สมบูรณ์แบบ เนื่องจากลักษณะของลายผิวนั้นมีหลายชนิด และแต่ละชนิดก็เหมาะสมกับระเบียบวิธีที่แตกต่างกันไป วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งได้เป็นสามแนวทาง แนวทาง

แรกคือวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) แนวทางที่สองคือการสังเคราะห์ที่ละจุดภาพ (pixel-based) และแนวทางสุดท้ายเป็นการสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพ (patch-based) ทั้งสามแนวทางต่างก็ได้รับการพัฒนาจนสามารถใช้ได้กับลายผิวหลายประเภท แต่อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดมีข้อดีคือสามารถทำงานแบบขนานได้ และสามารถควบคุมผลลัพธ์ให้ตรงกับความต้องการได้ง่าย แต่ก็ต้องใช้เวลาในการประมวลผลมาก เพื่อให้โปรแกรมปรับปรุงคุณภาพของผลลัพธ์จนใช้ได้ วิธีสังเคราะห์ที่ละจุดภาพและกลุ่มภาพสามารถทำงานได้รวดเร็ว แต่ผลลัพธ์อาจจะไม่ต่อเนื่องของลาย และไม่สามารถทำงานแบบขนานได้ง่ายนัก นอกจากนี้ การเร่งความเร็วยังต้องอาศัยเทคนิคที่ต้องใช้หน่วยความจำมากอีกด้วย

แม้ว่างานวิจัยด้านการสังเคราะห์ลายผิวจะมีมากมาย แต่ก็ยังไม่มีวิธีใดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากประสิทธิภาพยังไม่เพียงพอที่จะใช้กับลายผิวที่มีความละเอียดสูง และแต่ละวิธีต่างก็ต้องอาศัยการปรับค่าตัวแปรเพิ่มจากผู้ใช้งาน นอกจากนี้ ระเบียบวิธีส่วนใหญ่ก็สามารถใช้ได้ดีกับลายบางรูปแบบเท่านั้น

งานวิจัยนี้นำเสนอระเบียบวิธีการสังเคราะห์ลายผิว ที่มีความเร็วสูงกว่าการสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพ และแก้ไขความไม่ต่อเนื่องของลายเมื่อใช้กับการสังเคราะห์ลายผิวที่มีโครงสร้าง และพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้คัดเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสม วิธีที่เสนอพัฒนาต่อยอดจากวิธีการสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพ เนื่องจากสามารถทำงานได้เร็วกับลายผิวขนาดใหญ่ สามารถรักษารายละเอียดย่อยๆ ในลายได้ และใช้ได้กับลายหลายประเภท โดยผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจากการแบ่งย่อยภาพมาช่วยในการแก้ไขปัญหาการไม่ต่อเนื่องของลาย ปัญหาการหาค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ต้องใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ และยังนำข้อมูลของลายย่อยๆ ในภาพเป็นข้อมูลเพื่อช่วยเร่งความเร็วในการค้นหาแผ่นภาพที่เหมาะสม ซึ่งทำให้กระบวนการสังเคราะห์มีความเหมาะสมกับการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอระเบียบวิธีการสังเคราะห์ลายผิวโดยการนำข้อมูลจากการแบ่งย่อยภาพมาใช้ในการบวนการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ เพื่อพัฒนาการสังเคราะห์ลายผิว ในด้านต่างๆ ดังนี้

1. ผลลัพธ์มีความถูกต้องมากขึ้น โดยมีความต่อเนื่องกันของลาย และไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์

2. เพิ่มความเร็วในการสังเคราะห์ เพื่อให้สามารถใช้ได้กับลายฉลุต้นฉบับขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 256x256 จุดภาพ จนถึง 4096x4096 จุดภาพ
3. สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยความช่วยเหลือจากมนุษย์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ในการสังเคราะห์ลายฉลุจะเน้นการสังเคราะห์บนระนาบสองมิติเท่านั้น การนำไปใช้กับรูปทรงหลายเหลี่ยมนั้น ผู้ใช้จะต้องกำหนดตำแหน่งของลายฉลุให้กับกระบวนการส่งผ่านลายฉลุด้วยตนเอง
2. ในงานวิจัยนี้ จะไม่สนใจการปรับแต่งลายผลลัพธ์ให้ตรงตามที่ใช้ต้องการ เช่น การควบคุมการวางตัว ขนาดของลาย การบังคับให้พื้นที่ที่กำหนดเป็นลายที่ต้องการ
3. ในกระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพจะมีตัวแปรเสริมที่ผู้ใช้อาจต้องปรับแต่งด้วยตนเอง ซึ่งในรายงานฉบับนี้ จะนำเสนอค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการสังเกตและทดลองเท่านั้น ซึ่งเมื่อนำไปใช้จริง ผู้ใช้อาจจะต้องปรับแต่งค่าตัวแปรเสริมเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
4. ลายฉลุที่นำมาใช้กับระเบียบวิธีตามงานวิจัยนี้ จะต้องสามารถแบ่งส่วนได้ชัดเจน ลายฉลุที่ไม่มีขอบเขตที่ชัดเจน เช่น ลายเมฆ แม้จะสามารถใช้ระเบียบวิธีที่เสนอได้ แต่อาจไม่ได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพตามที่คาดหวัง
5. ลายฉลุที่นำมาใช้จะต้องมีลักษณะเดียวกันทั้งภาพ เป็นลายฉลุที่คุณภาพดี และมีลักษณะที่เหมาะสม ลายฉลุที่ไม่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เช่น ลายฉลุที่มีความลาดเอียงของพื้นผิว ลายฉลุที่มีแสงและเงาไม่เท่ากันทั้งหมด ลายฉลุที่มีลายแตกต่างกันมากในแต่ละพื้นที่
6. ลายฉลุต้นฉบับจะต้องมีขนาดเพียงพอที่จะแสดงถึงพื้นที่ที่มีารซ้ำ กันของลายได้เพียงพอ เช่น ลายผนังอิฐก็ต้องมีรายละเอียดของก้อนอิฐเรียงตัวกันมากกว่า 20 ก้อนขึ้นไป เป็นต้น นอกจากนี้ รายละเอียดของลายก็ต้องชัดเจน ไม่มีสัญญาณรบกวน หรือมีความผิดพลาดของค่าสีจากการบีบอัดข้อมูล เป็นต้น
7. การทดสอบผลการทำงานของระเบียบวิธีที่เสนอ จะทำการทดสอบด้วยการคำนวณบนหน่วยประมวลผลกลางเท่านั้น โดยไม่ใช้วิธีการคำนวณแบบขนาน เพื่อให้กาทดสอบความเร็วมีความเป็นธรรม และสามารถวิเคราะห์ผลจากแต่ละขั้น ตอนได้ง่าย



#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้ระเบียบวิธีการสังเคราะห์หลายผิวที่ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องกับลายผิวหลายประเภท โดยเฉพาะลายผิวที่มีโครงสร้างของลาย ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของลายมีความต่อเนื่องกัน และยังช่วยเพิ่มความเร็วในการสังเคราะห์หลายผิวอีกด้วย ซึ่งทำให้ระเบียบวิธีนี้ เหมาะสมกับการสังเคราะห์ลายผิวขนาดใหญ่ และมีความละเอียดสูง ทำงานได้โดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ ยังสามารถประยุกต์นำเทคนิคนี้ ไปใช้ในงานอื่นได้ เช่น การซ่อมแซมรูปภาพที่ขาดหายไป การสร้างลายใหม่โดยการแก้ไขจากลายเดิม

#### 1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบระเบียบวิธีการสังเคราะห์หลายผิวในปัจจุบัน
2. ศึกษากระบวนการสังเคราะห์หลายผิวแบบแผ่น เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาระเบียบวิธีการสังเคราะห์ โดยอาศัยข้อมูลการแบ่งย่อยลายผิว
3. ออกแบบและพัฒนาระเบียบวิธีสำหรับการสังเคราะห์หลายผิว เพื่อให้รองรับการสังเคราะห์หลายผิวด้วยวิธีต่างๆ รวมถึงการสังเคราะห์ที่นำเสนอ รวมทั้งระบบเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ทดลองระเบียบวิธีการสังเคราะห์หลายผิวด้วยวิธีอื่นๆ แล้วเก็บผลลัพธ์เพื่อใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้
5. เลือกแนวทางที่ช่วยพัฒนากกระบวนการสังเคราะห์หลายผิวแบบแผ่น โดยการทดลองอิมพลีเมนต์ระเบียบวิธีที่น่าจะช่วยพัฒนาคุณภาพของระเบียบวิธีเดิมได้ แล้วทดสอบการทำงานกับลายผิวหลายๆ ประเภท
6. ทดสอบคุณภาพของผลลัพธ์ ความเร็วของวิธีที่นำเสนอเมื่อเทียบกับวิธีการสังเคราะห์หลายผิวด้วยวิธีอื่น และปรับปรุงอัลกอริทึมเพื่อให้เหมาะสมกับลายผิวทุกประเภท
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
8. สรุป เรียบเรียง และจัดทำวิทยานิพนธ์

## 1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย

ส่วนหนึ่งของงานวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการสองเรื่อง ดังนี้

- “Fast and robust parameter estimation method for patch-based texture synthesis” โดย จักรพงศ์ นาคเดช และ พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “7<sup>th</sup> ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI2008)” ซึ่งจัดขึ้น ณ ประเทศสิงคโปร์ ระหว่างวันที่ 8 - 9 ธันวาคม 2551 ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก
- “An Efficient Parameters Estimation Method for Automatic Patch-based Texture Synthesis” โดย จักรพงศ์ นาคเดช และ พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “6<sup>th</sup> International conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualization and Interaction in Africa (AFRIGRAPH2009)” ซึ่งจัดขึ้น ณ เมืองพิทัวเรีย ประเทศสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ ระหว่างวันที่ 4 - 6 กุมภาพันธ์ 2552 ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ นี้ นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มจากความรู้พื้นฐานคือ ทฤษฎีของลายผิว คุณสมบัติของลายผิว การแยกประเภทของลายผิว ต่อด้วยการวิเคราะห์ลายผิวด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการสังเคราะห์ต่อไป ทฤษฎีการแบ่งย่อยรูปภาพซึ่งถูกใช้เพื่อแยกเอาข้อมูลของส่วนภาพมาใช้ในการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ และวิธีการสังเคราะห์ลายผิวที่มีในปัจจุบัน รวมถึงการเร่งความเร็วการสังเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งจะอยู่ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะเริ่มต้นนำเสนอจากความรู้เบื้องต้น ซึ่งประกอบด้วย คำจำกัดความของลายผิวในคอมพิวเตอร์กราฟิก การแยกประเภทของลายผิว และคำจำกัดความของกระบวนการสังเคราะห์ลายผิว ต่อด้วยทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วย การแบ่งย่อยภาพ การจัดกลุ่มข้อมูล การกระจายตัวของสี และอัลกอริทึมการหาค่าเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด

##### 2.1.1 ลายผิว (texture)

ในกระบวนการให้แสงและเงาในคอมพิวเตอร์ คุณสมบัติของวัตถุมีผลอย่างมากต่อความสมจริงของผลลัพธ์ แต่รายละเอียดของวัตถุก็มีมากจนต้องอาศัยเทคนิคหลายชนิดเพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ต้องเก็บ ลายผิวจึงถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าสี และความหนาแน่นของผิววัตถุแทนที่การใช้รูปทรงหลายเหลี่ยม การใช้ลายผิวจะเป็นการแทนรายละเอียดระดับมีโซสตรักเจอร์ (mesostructure) ซึ่งเป็นรายละเอียดในระดับที่สามารถประมาณด้วยรูปภาพได้เมื่อทำการสังเกตวัตถุในระยะไกล โดยไม่ทำให้คุณภาพของภาพลดลงมากนัก ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้รูปภาพมาประมาณลักษณะของลายทำให้สามารถลดเวลาในการประมวลผลลงไปได้มาก โดยที่คุณภาพผลลัพธ์ก็ลดลงไปไม่มากนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



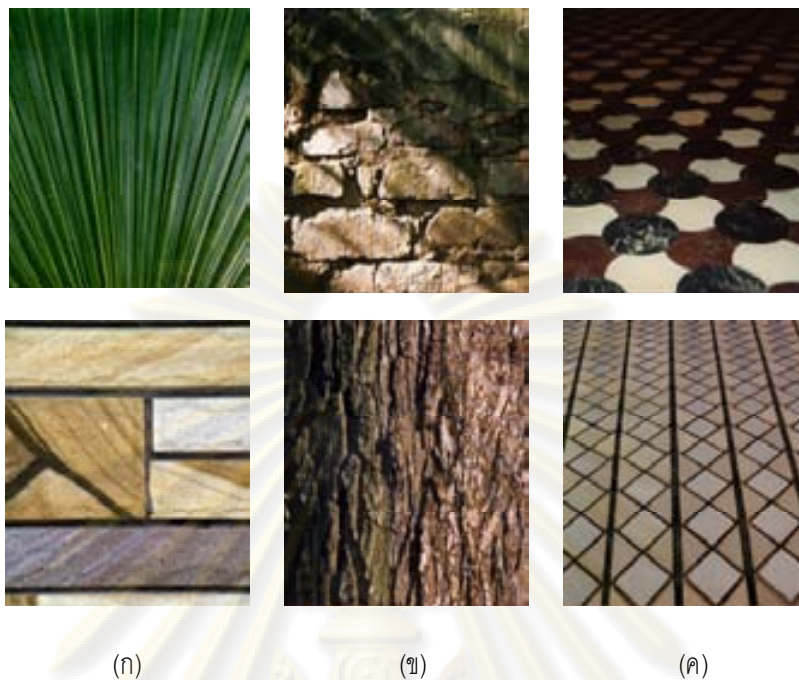
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณภาพและเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพด้วยโปรแกรม 3D Studio Max 9.0  
(ก) รูปทรงที่ใช้ทดสอบ (ข) การแทนลายผิวด้วยรูปทรงหลายเหลี่ยม (ค) การแทนลายผิวด้วยรูป

ลายผิวในด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกหมายถึงข้อมูลของพื้นผิวของวัตถุซึ่งถูกจัดเก็บในรูปแบบดิจิทัล ข้อมูลที่จัดเก็บอาจประกอบด้วยคุณสมบัติต่างๆ ของผิววัสดุ เช่น สี คุณสมบัติการสะท้อนแสง ความโปร่งแสง ความหนูนุ่มของพื้นผิว เป็นต้น ข้อมูลของลายผิวมักถูกจัดเก็บในรูปแบบของไฟล์ภาพดิจิทัล โดยใช้ค่าสีแทนข้อมูลต่างๆ เช่น ความลึกแทนระดับของโทนสีขาวดำ เป็นต้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการจัดเก็บข้อมูลของคอมพิวเตอร์ที่ไม่สามารถจัดเก็บลายผิวขนาดใหญ่เท่าวัตถุจริงได้จากข้อจำกัดด้านพื้นที่ ลายผิวจึงควรมีคุณสมบัติคือประกอบด้วยลายที่ซ้ำๆ กัน ในการซ้ำๆ กันนี้อาจจะมีความแตกต่างได้บ้างแต่ต้องไม่ดูว่าเป็นรายละเอียดคนละประเภท เช่น ลายหินในพื้นกระเบื้อง ซึ่งมีการซ้ำๆ กันของเม็ดหิน แต่เม็ดหินแต่ละเม็ดก็มีรูปร่างและการวางตัวแตกต่างกัน และปริมาณของการซ้ำๆ กันก็ควรจะครอบคลุมความเป็นไปได้ที่เพียงพอจะอธิบายลายผิวจริงได้ทั้งหมด เช่น ลายหินควรมีเม็ดหินในปริมาณมากเพียงพอที่จะครอบคลุมช่วงของขนาดเม็ดหินตั้งแต่เล็กที่สุดไปจนถึงใหญ่ที่สุด ซึ่งข้อจำกัดความถี่ก็จะถูกใช้ในงานวิจัยนี้เช่นกัน ลายผิวที่ไม่เหมาะสมดังรูปที่ 2.2 มักทำให้เกิดปัญหาเวลานำไปใช้งานวัตถุสามมิติ เนื่องจากทำให้ภาพลายบนวัตถุไม่ตรงกับวัตถุจริง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการบวนการวิเคราะห์และสังเคราะห์ลายผิวอีกด้วย

### บทนิยาม 2.1

“ลายผิว” คือข้อมูลภาพดิจิทัลที่เก็บข้อมูลพื้นผิวของวัสดุ โดยลายผิวจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน ระนาบนั้นตั้งฉากกับกล้อง ภาพลายผิวจะต้องมีรายละเอียดเพียงพอที่จะจัดเก็บลักษณะความแตกต่างทั้งหมดที่เป็นไปได้ในพื้นที่ผิวของวัสดุจริงทั้งหมด  $T$  ประกอบด้วยค่าสีที่แทนข้อมูลที่เก็บในตำแหน่ง  $(x, y)$  ดังสมการ (2.1)

$$T = \mathbf{U}T_{(x,y)} \mid 0 \leq x < \text{width}, 0 \leq y < \text{height} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของลายผิวที่ไม่เหมาะสม

- ก) ลายผิวที่มีรายละเอียดน้อยเกินไป หรือรายละเอียดไม่เป็นแนวเดียวกัน  
 ข) ลายผิวมีความแตกต่างของแสงและเงา ค) ลายผิวไม่อยู่ในระนาบตั้งฉากกับกล้อง

ลายผิวที่ใช้ในกระบวนการให้แสงและเงาสามารถสร้างขึ้นมาได้สามวิธี คือ

1. วาดขึ้นมาเอง เป็นวิธีที่เหมาะสมกับลายที่สร้างได้ง่าย หรือมีต้นฉบับเป็นข้อมูลรูปภาพอยู่แล้ว เช่น ลายป้ายข้อความ ลายการ์ตูนบนเสื้อ เป็นต้น วิธีนี้ไม่มีข้อจำกัดในรูปแบบและขนาดของลายที่สร้าง แต่มีข้อเสียคือผู้ที่สร้างจะต้องมีความสามารถค่อนข้างมาก

2. ใช้การกำหนดฟังก์ชันคณิตศาสตร์ วิธีนี้จะใช้สมการคณิตศาสตร์ หรือชุดคำสั่ง (computer program) สร้างข้อมูลของจุดภาพขึ้นมา วิธีนี้เหมาะกับการสร้างลายที่มีลักษณะที่สามารถอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้ง่าย ตัวอย่างเช่น ลายผิวของสัตว์ต่างๆ เช่น ม้าลาย ปลา ลายเมฆบนท้องฟ้า ลวดลายบนเนื้อหิน เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยตรง เช่น สามารถเพิ่มลดระยะของลายบนตัวม้าลายได้ ปรับเปลี่ยนโทนสี เป็นต้น ส่วนข้อเสียของวิธีนี้ ก็คือ ลายที่สร้างได้มีค่อนข้างจำกัด

3. การเก็บข้อมูลจากวัสดุจริง เป็นการใช้อุปกรณ์เก็บลักษณะลายจากผิวจริงในธรรมชาติ ในทางปฏิบัติจะใช้กล้องถ่ายรูปในการเก็บรายละเอียดเป็นหลัก วิธีนี้มีข้อดีที่สามารถ

เก็บลายได้ทุกประเภทที่มีในธรรมชาติ แต่ข้อเสียก็คือขนาดของลายที่ได้มักมีขนาดเล็ก เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์เก็บภาพ หรือพี้นผิวที่เก็บมีความโค้งงอ

ลายผิวสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท จากงานวิจัยของหลิว (Yanxi Liu) [2] ลายผิวสามารถแบ่งตามลักษณะการปรากฏของลายได้ตั้งแต่แบบสโตแคสติก (stochastic) จนถึงแบบสม่ำเสมอ (regular) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแบ่งประเภทของลายผิวตามงานวิจัยของหลิว

ก) ลายผิวแบบสม่ำเสมอ (regular) เป็นลายผิวที่มีการซ้ำ ๆ กันของลายอย่างสม่ำเสมออย่างชัดเจน ทุกๆ การซ้ำ ๆ จะไม่มีข้อแตกต่างกันเลย

ข) ลายผิวแบบเกือบสม่ำเสมอ (near-regular) เป็นลายผิวที่มีการซ้ำ ๆ กันของลาย แต่ในแต่ละการซ้ำ ๆ กันจะมีข้อแตกต่างกันอยู่บ้าง ตัวอย่างเช่น ผงงอิฐ ซึ่งอิฐแต่ละก้อนจะมีลักษณะคล้ายๆ กัน แต่ไม่เหมือนกันหมดทุกจุดภาพ

ค) ลายผิวแบบไม่สม่ำเสมอ (irregular) เป็นลายผิวที่ไม่มี การซ้ำ ๆ กันอย่างชัดเจน

ง) ลายผิวแบบเนียร์สโตแคสติก (near-stochastic) เป็นลายผิวที่มีการกระจายตัวของลายแต่ก็เป็นไปอย่างมีระเบียบบ้าง

จ) ลายผิวแบบสโตแคสติก (stochastic) เป็นลายผิวที่มีการกระจายตัวของลักษณะผิวอย่างสุ่มโดยสมบูรณ์

ลายผิวที่แตกต่างกันมีผลต่อการวิเคราะห์และสังเคราะห์ลายผิว ลายผิวบางประเภทสามารถทำการคัดลอกและต่อกันได้โดยไม่มีขอบ ซึ่งสามารถนำมาต่อกันได้โดยที่ไม่ผิดปกติ เช่น ลายกระเบื้อง ลายถักบนผ้า ลายผนังบนกำแพง เป็นต้น แต่ลายบางประเภทต้องอาศัยการคัดลอกแบบพิเศษ เพื่อป้องกันไม่ให้ลายดูซ้ำ ๆ ซ้อนกัน เช่น ลายเสือ ลายก้อนอิฐ เป็นต้น ในขณะที่ลายผิวแบบสโตแคสติกนั้นสามารถเรียงต่อกันได้อย่างสุ่ม เนื่องจากทุกส่วนของลายมีลักษณะเหมือนกันทั้งหมด

นอกจากการแบ่งด้วยวิธีของหลิวแล้ว ลายผิวยังสามารถแบ่งได้ตามรูปแบบของ ลวดลายได้เป็นสองกลุ่ม คือ แบบสโทแคสติก และแบบมีโครงสร้าง (structured texture) ลายผิว แบบมีโครงสร้างคือลายผิวที่มีลวดลายชัดเจนซึ่งอาจอยู่ในรูปของเส้น หรือพื้นที่บนพื้นผิวที่มีคสี ต่างกัน โครงสร้างนี้ ทำให้เกิดความแตกต่างกันของลายผิวในแต่ละส่วนที่เกิดจากคุณสมบัติของ โครงสร้างนั้น เช่น การจัดเรียงตัว ความหนาแน่นขนาด การหมุน ค่าสี เป็นต้น ลายผิวแบบนี้ มี อยู่มากมาย ซึ่งเป็นปัจจัยทำให้เกิดงานวิจัยด้านลายผิวตามมามากมาย

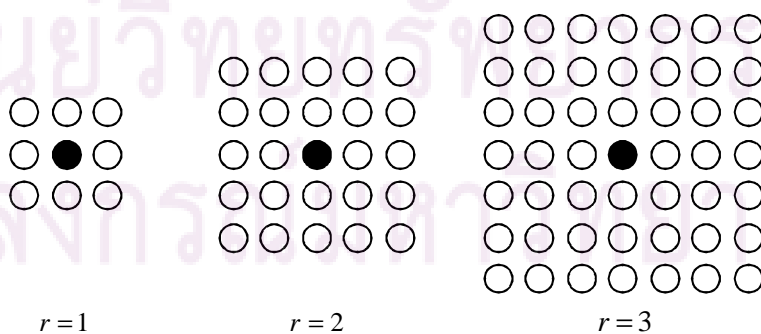
### 2.1.2 สนามสุ่มของมาร์คอฟ (Markov random field : MRF)

การแยกข้อมูลที่ต้องการออกจากภาพลายผิวเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองของลายผิว ซึ่งแบบจำลองลายผิวแต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน แบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ลายผิวมากที่สุดก็คือแบบสนามสุ่มของมาร์คอฟ [3] การที่แบบจำลองนี้ ให้ความน่าจะเป็นในการอธิบายค่าสีในแต่ละจุดภาพจึงทำให้สามารถใช้ได้กับ ลายผิวทุกประเภทที่เก็บข้อมูลเป็นรูปภาพ การอธิบายในลักษณะของการอิงกับข้อมูลรอบๆ จุดภาพที่สนใจ จึงทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีลักษณะเป็นลายซ้ำ ๆ ซ้อนซึ่งเป็นลักษณะหนึ่ง ของลายผิว นอกจากนี้ วิธีนี้ ยังมีความเหมาะสมกับลักษณะของการสังเกตของมนุษย์อีกด้วย

แบบจำลองสนามสุ่มของมาร์คอฟอธิบายลายผิวโดยการกำหนดเงื่อนไขที่ขึ้น กับบริบท (contextual constraint) เพื่อนบ้านของจุดภาพบนลายผิว  $T(x, y)$  คือ  $\partial(x, y)$  ซึ่งถูก กำหนดโดยค่ารัศมี  $r$  ดังสมการ (2.2)

$$\partial(x, y) = \{(i, j) \mid |i - x| \leq r, |j - y| \leq r\} \tag{2.2}$$

ซึ่งเราสามารถกำหนดรูปแบบของเพื่อนบ้านได้หลายขนาดตามค่า  $r$  ดังเช่น รูปที่ 2.4 ซึ่งการที่เพื่อนบ้านมีขนาดใหญ่ขึ้นหมายถึงข้อมูลที่จัดเก็บจะมีความละเอียดมากขึ้น นั่นเอง



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเพื่อนบ้านเมื่อกำหนด  $r$  เป็นค่าต่างๆ

แม้ว่าแบบจำลองของมาร์คอฟจะมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้วิเคราะห์หลายผิว แต่แบบจำลองนี้ ก็จำกัดด้วยเช่นกัน เนื่องจากแบบจำลองของมาร์คอฟจะให้ความสนใจกับจุดภาพรอบๆ จุดที่สนใจในรัศมีที่กำหนดเท่านั้น ดังนั้น รัศมีของเพื่อนบ้านจึงมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ ถ้ากำหนดรัศมีของเพื่อนบ้านน้อยเกินไปก็จะทำให้สูญเสียข้อมูลของลักษณะแบบวงกว้างไป ในขณะที่เดียวกันถ้ากำหนดรัศมีมากเกินไปก็จะทำให้ความเร็วในการประมวลผลช้าลงอย่างมาก

### 2.1.3 การสังเคราะห์หลายผิว (texture synthesis)

การเก็บข้อมูลลายผิวจากวัสดุจริงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการสร้างลายผิว วิธีนี้ แม้ว่าจะได้ลายผิวที่ตรงกับของจริง และง่ายต่อการสร้างมากที่สุด แต่วิธีการเก็บข้อมูลจากวัสดุจริงก็มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดของลายผิวที่มักจะมีขนาดไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน

ถึงแม้ว่าการวาดลายผิวเอง และการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการสังเคราะห์ลายผิวจะไม่มีปัญหาในเรื่องของขนาด เนื่องจากผู้ใช้สามารถสร้างลายได้ตามขนาดที่ต้องการ หรือสามารถคำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ แต่การสร้างลายผิวด้วยวิธีการเหล่านี้ ก็ทำได้ยาก และต้องใช้เวลาและแรงงานสูง และแม้ว่าจะสามารถสร้างลายที่มีขนาดที่ต้องการได้ การเก็บข้อมูลก็ต้องใช้พื้นที่มหาศาลเช่นกัน

จากข้อจำกัดของขนาดลายผิว กระบวนการสังเคราะห์หลายผิวจากลายผิวดั้งเดิม (texture synthesis by example) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการขยายขนาดของลายผิวให้สามารถครอบคลุมผิววัตถุได้ โดยกระบวนการสังเคราะห์หลายผิวมีเป้าหมาย คือ

1. สร้างลายผิวที่มีขนาดที่ถูกต้องตามความต้องการของผู้ใช้
2. ลายผิวที่สร้างต้องดูไม่แตกต่างจากรูปต้นฉบับ
3. ลายผิวที่สร้างต้องไม่มีร่องรอยของสิ่งแปลกปลอม เช่น ขอบ หรือจุดภาพที่ผิดปกติ
4. ลายผิวที่สร้างไม่ควรเห็นว่ามีกรู๊ ก้านของลวดลาย

การสังเคราะห์หลายผิวที่ดีจะมุ่งเน้นเพื่อจะแก้ปัญหาในด้านของการซ้ำ ๆ ซ้ำกันของลายที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.5 ก ซึ่งเป็นการสังเคราะห์โดยการนำภาพมาเรียงต่อกันและตำหนิที่เกิดขึ้น เมื่อนำลายผิวดั้งเดิมมาสร้างซ้ำ ใหม่เมื่อมีการสังเคราะห์ด้วยวิธีที่ซับซ้อนขึ้น ก็อาจเกิดการต่อกันไม่สนิทของลายเดิมดังรูปที่ 2.5 ข ผลลัพธ์ในภาพ 2.5 ค เป็นลายผิวที่เหมาะสมซึ่งมีคุณสมบัติครบทั้งสี่ข้อ

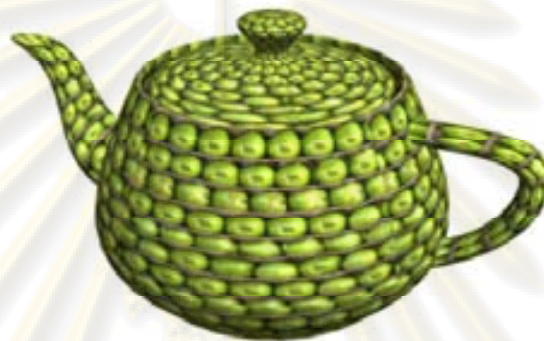




ก) ลายผิวที่มีความซ้ำซ้อนกัน



ข) ลายผิวมีตำหนิ



ค) ลายผิวที่เหมาะสม

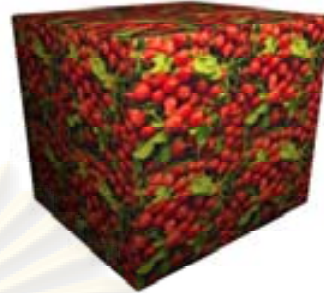
### รูปที่ 2.5 ลักษณะผลลัพธ์ของการสังเคราะห์ที่ดีและไม่ดีลายผิวแบบต่างๆ

การสังเคราะห์ลายผิวที่ง่ายที่สุดก็คือการปูลายผิว (tiling) ซึ่งเป็นการนำภาพมาต่อเรียงกันเหมือนกับการปูกระเบื้อง วิธีนี้ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากทำได้ง่าย โดยเป็นการโยนภาระในการสังเคราะห์ให้กับผู้ใช้ ที่จะต้องเลือกลายที่สามารถเรียงต่อกันได้โดยไม่เห็นขอบ ซึ่งแม้ว่าการเลือกลายที่ดีจะแก้ปัญหาการมองเห็นขอบไปได้ แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาการซ้ำซ้อนของลายได้ ซึ่งทำให้ภาพที่ได้เสียความสมจริงไป การสังเคราะห์ลายผิวจึงมีความซับซ้อนขึ้น โดยใช้วิธีต่างๆ ดังรูปที่ 2.6 เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้

การสังเคราะห์ลายผิวที่มีความซับซ้อนขึ้น ก็จะแบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วน คือ การวิเคราะห์หาลักษณะที่มีความโดดเด่นในลายผิวดั้งเดิม และการสังเคราะห์ลายผิวที่มีขนาดใหญ่ตามที่ต้องการ การวิเคราะห์หาลักษณะเด่นในภาพเป็นการเก็บข้อมูลลักษณะของภาพนั้นๆ เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการสังเคราะห์ลายผิวใหม่โดยให้ยังคงลักษณะนั้นๆ ไว้ในภาพ การสังเคราะห์ลายผิวด้วยวิธีนี้ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า แต่ก็ต้องการการประมวลผลที่มากกว่าด้วยเช่นกัน และแม้ในปัจจุบันจะมีงานวิจัยด้านนี้ ออกมามากมาย แต่ก็ยังไม่มีวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมกับลายผิวทุกรูปแบบ



ก) ลายผิวต้นฉบับ



ข) การปูลายผิว

ค) การปูลายผิวโดยการปรับแต่ง  
ให้ลายต่อเนื่องกันง) การสังเคราะห์ลายผิว  
ที่ละจุดภาพ

รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์ลายผิวด้วยเทคนิคต่างๆ

ประโยชน์ของการสังเคราะห์ลายผิวมีมากมาย นอกจากการขยายขนาดของลายผิวเพื่อช่วยในกระบวนการส่งลายผิว (texture mapping) แล้ว เทคนิคการสังเคราะห์ลายผิวสามารถนำไปใช้ในงานอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น ใช้ในการเติมรายละเอียดให้กับส่วนที่ขาดไปของภาพ การเปลี่ยนลายผิวจากลายเดิมเป็นลายใหม่ การรวมเอาลักษณะของลายเข้าไปในภาพเป็นต้น จะเห็นได้ว่าเทคนิคการสังเคราะห์ลายผิวนั้น มีประโยชน์เป็นอย่างมากในงานด้านคอมพิวเตอร์กราฟิก

#### 2.1.4 การแบ่งย่อยรูปภาพ (image segmentation)

ในกระบวนการวิเคราะห์รูปภาพ การแบ่งย่อยรูปภาพคือการตัดแบ่งส่วนของรูปออกเป็นกลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มของจุดภาพจะมีคุณลักษณะบางชนิดที่คล้ายกัน เช่น มีค่าสีที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันในปริภูมิสี มีความเข้มคล้ายกัน หรือมีลักษณะของลายคล้ายกัน ลักษณะที่ต่างกันจะเกิดเป็นรอยแยกระหว่างส่วนภาพ อีกนัยหนึ่งการแบ่งย่อยรูปภาพก็คือการกำหนดป้าย

ชื่อที่ใช้แบ่งแยกประเภทให้กับทุกจุดภาพ กระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพมีลักษณะการทำงานคล้ายกับการจัดกลุ่มข้อมูล ความแตกต่างกันก็คือตำแหน่งของข้อมูลแต่ละตัวเข้ามามีผลกับการแบ่งกลุ่มด้วย เนื่องจากจุดภาพที่อยู่ภายในกลุ่มเดียวกันจะต้องอยู่ติดกัน ดังนั้นแนวคิดพื้นฐานของกระบวนการทั้งสองจึงคล้ายกัน การแบ่งย่อยรูปภาพมักเป็นกระบวนการแรกๆ ในการประมวลผลรูปภาพ (image processing) จุดประสงค์ของกระบวนการนี้ก็คือการตัดแบ่งรูปออกเป็นส่วนๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาส่วนต่างๆ ที่มีความสำคัญในภาพ

การแบ่งส่วนภาพมีอยู่หลากหลายวิธี แม้ในปัจจุบันการแบ่งส่วนรูปภาพก็ยังเป็นประเด็นวิจัยอยู่เนื่องจากปัญหาการแบ่งย่อยรูปภาพมีความยาก ซับซ้อน และมักขึ้นกับการตั้งสมมติฐานของผู้วิจัย ว่าต้องการผลลัพธ์เช่นไร จึงยังไม่มีวิธีใดที่เหมาะสมกับรูปภาพทุกประเภท ในงานวิจัยนี้ จะขอกล่าวถึงการแบ่งย่อยรูปภาพสี่เท่านี้ เนื่องจากลายผิวทั้งหมดมักเป็นรูปสี่ ซึ่งการแบ่งย่อยรูปภาพสี่ในปัจจุบันสามารถแบ่งวิธีได้ออกเป็นสามรูปแบบ ดังนี้

#### 2.1.4.1 จำแนกตามลักษณะเด่น (feature-space based)

การแบ่งย่อยรูปภาพโดยจำแนกตามลักษณะเด่น มักจะจัดแบ่งกลุ่มของจุดภาพตามค่าสีที่แตกต่างกัน หรือเป็นค่าคุณลักษณะที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลจุดภาพอีกชั้น หนึ่ง

การจัดกลุ่มลักษณะนี้ จะคิดว่ารูปภาพ  $S$  เกิดจากการรวมตัวกันของกลุ่มจุดภาพที่มีหลายๆ แบบอย่าง  $S = \bigcup_{k=1}^K S_k$  โดยที่  $S_k$  คือพื้นที่ส่วนหนึ่งของภาพ โดยที่จุดภาพแต่ละจุดจะต้องอยู่ภายในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเท่านั้น  $S_i \cap S_j = \emptyset, \forall i \neq j$  จุดภาพที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันจะมีค่าความคล้ายกันสูงกว่าเมื่ออยู่คนกลุ่ม

การแบ่งย่อยรูปภาพด้วยแนวคิดนี้ มีอยู่หลายวิธี วิธีที่มักใช้กันมากที่สุดก็คือ วิธีค่าเฉลี่ยเค (k-means) เป็นวิธีจัดกลุ่มโดยการหาค่าเฉลี่ยของจุดที่อยู่ในกลุ่มแล้วจึงใช้ค่าที่ได้เป็นจุดศูนย์กลางในการคำนวณเพื่อกำหนดกลุ่มให้กับจุดภาพอื่นๆ นอกจากนี้ มีวิธีการที่คล้ายกันก็คือ ISODATA เป็นวิธีการจัดกลุ่มโดยการวนรอบจนได้คำตอบโดยมีรูปแบบการทำงานที่แน่นอน มีการประยุกต์ใช้วิธีอื่นๆ ในการแก้ปัญหา เช่น วิธีเคลื่อนย้ายค่าเฉลี่ย (mean shift) การประยุกต์ใช้สมการแรงโน้มถ่วงเพื่อหากลุ่มที่จุดที่สนใจจะเข้าไปรวม การเปลี่ยนปัญหาให้อยู่ในรูปของโครงสร้างต้นไม้ แล้วจึงทำการย่อให้เล็กลง (simplification)

อีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจก็คือการแปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบของกราฟไม่ระบุทิศทางแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted undirected graph) แล้วจึงเปลี่ยนปัญหาการแบ่งย่อยภาพให้เป็นปัญหาการตัดแบ่งกราฟ วิธีนี้ กำหนดให้แต่ละจุดภาพเป็นโหนด (node) ซึ่งถูกเชื่อมต่อกันโดยเส้นเชื่อม (edge) ไปยังจุดภาพด้านข้าง ซึ่งแต่ละเส้นเชื่อมจะมีค่าถ่วงน้ำหนักอยู่ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณว่าโหนดทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันมากเท่าใด ผลลัพธ์ได้จากการกำจัดเส้นเชื่อมที่เชื่อม

ระหว่างพื้นที่ภาพที่แตกต่างกันออกไป วิธีการใช้กราฟมีข้อดีคือทำงานได้เร็ว โดยใช้เวลาทำงานเพียง  $O(n \log n)$  เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ซึ่งมักมีความซับซ้อนมากกว่า  $O(n^2)$  เมื่อกำหนดให้  $n$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพต้นฉบับ อีกวิธีหนึ่งที่ยิยมใช้ในภาพระดับสีเทา (grey-level image) ก็คือการใช้การตัดแบ่งฮิสโทแกรม (histogram thresholding) ซึ่งวิธีการนี้ก็ได้มีการปรับใช้กับภาพสีเช่นกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะมีการแปลงค่าสีในปริภูมิ RGB ให้เป็นปริภูมิอื่นๆ เช่น  $L^*u^*v$  หรือ HSV เพื่อให้เหมาะสมก่อนทำการตัดแบ่งฮิสโทแกรม

#### 2.1.4.2 จำแนกตามลักษณะของภาพ (image-domain based)

การแบ่งย่อยภาพโดยการจำแนกตามลักษณะเด่น มีข้อจำกัดในเรื่องตำแหน่งจุดภาพที่แตกต่างกันในวัตถุชิ้นเดียวกัน เนื่องจากการจำแนกตามลักษณะเด่นจะไม่มีการสนใจเรื่องของวัตถุ จึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มักมีจำนวนส่วนของภาพมากเกินไป จุดภาพที่อยู่ภายใต้วัตถุเดียวกันมักจะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน ซึ่งบางครั้งอาจจะไม่เกี่ยวกับค่าสีเลยก็เป็นได้ เช่น ลักษณะของลวดลายบนพื้น นิว ซึ่งภายในลายก็อาจจะมีความแตกต่างกันในตัวของมันเอง แต่ก็ควรจะอยู่ในกลุ่มเดียวกันเมื่อทำการแบ่งย่อยรูปภาพ วิธีการในกลุ่มนี้ สามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มตามลักษณะการทำงาน คือ

1. **วิธีการแยกย่อย และรวม (split and merge techniques)** วิธีนี้ จะเริ่มจากการวิเคราะห์รูปที่ ารูปร่าง แล้วจึงทำการแบ่งย่อยรูปภาพให้เล็กที่สุดจนแต่ละส่วนมีความคล้ายกันภายในกลุ่ม ซึ่งสามารถใช้วิธีของการจำแนกตามลักษณะเด่นได้ทั้งหมด เพียงแต่ว่าในการแยกนั้น จะต้องเก็บความเชื่อมโยงกับกลุ่มรอบๆ ด้วย หลังจากนั้นจึงทำการรวมเอากลุ่มของจุดภาพที่มีความเกี่ยวข้องกันเข้าไว้ด้วยกัน โดยใช้การวิเคราะห์หลายรูปแบบต่างๆ เช่น โมเดลของสนามสุ่มแบบมาร์คอฟ (Markov random field) และการกระจายตัวแบบกิฟ (Gibbs distribution)

2. **วิธีการขยายขอบเขต (region growing techniques)** วิธีนี้ จะเริ่มต้นด้วยการเลือกจุดภาพที่สนใจ แล้วพยายามขยายขอบเขตไปยังจุดภาพรอบๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน วิธีนี้ มักมีข้อจำกัดคืออาจจะได้กลุ่มของจุดภาพที่เป็นส่วนย่อยๆ เนื่องจากถูกกำหนดเป็นคนละกลุ่มตั้งแต่นั้น วิธีนี้ จึงต้องมีการคำนวณเพิ่มเติม เพื่อทำการรวมส่วนเล็กๆ เข้าด้วยกันอีกรอบหนึ่ง

3. **การใช้เส้นเชื่อม (edge based techniques)** วิธีนี้ เริ่มต้นด้วยการหาขอบของภาพ แล้วจึงใช้ขอบของภาพที่ได้มาใช้ตัดแบ่งจุดภาพออกเป็นกลุ่มๆ วิธีนี้ จะได้รับการแบ่งที่ค่อนข้างหยาบ ในขณะที่การแบ่งที่ละเอียดก็ต้องใช้คำนวณสูงขึ้นไปมาก

4. **การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (neural-network based techniques)** วิธีนี้ จะใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้ ลักษณะเฉพาะของกลุ่มจุดภาพแต่ละกลุ่ม แล้วจึงใช้ความรู้ที่เรียนได้ไปจำแนกกลุ่มของจุดภาพ วิธีนี้ มีข้อดีที่สามารถทำงานได้เร็วมาก แต่ก็

เหมาะสมกับงานเฉพาะประเภทที่ต้องมีองค์ความรู้เกี่ยวกับภาพที่จะทำการแบ่งย่อยมาก่อน เช่น งานตรวจหาใบหน้าคน เป็นต้น

### 2.1.4.3 จำแนกตามกฎของฟิสิกส์ (physics based)

เนื่องจากภาพต่างๆ ที่นำมาทำการแบ่งย่อยจะเป็นภาพที่ได้จากธรรมชาติ ดังนั้น ค่าสีในภาพจึงถูกผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น เงา แสงสว่าง และวัสดุที่เป็นพื้นผิว ซึ่งสิ่งเหล่านี้ มีผลทำให้ค่าสีในภาพไม่คงที่ แม้ว่าจะเป็นวัตถุชิ้นเดียวกันก็ตาม งานวิจัยด้านนี้ จึงนำเอาคุณลักษณะเหล่านี้ เข้ามามีผลในการพิจารณาการแบ่งแยกกลุ่มด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความหลากหลายของวัสดุ และสภาพแสง วิธีนี้ จึงมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก เช่น จะต้องมีการกำหนดค่าต่างๆ จากผู้ใช้ หรือสามารถใช้ได้กับวัสดุประเภทเดียวกัน

วิธีการแบ่งย่อยรูปภาพที่มีผู้เสนออยู่ต่างก็มีความเหมาะสมกับงานเฉพาะประเภท ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับทฤษฎีและแนวคิดที่นำมาใช้ในการแบ่งส่วน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ จะนำเอาการแบ่งย่อยภาพไปใช้สำหรับงานด้านลายนิ้วโดยเฉพาะ ซึ่งภาพลายนิ้วจะมีลักษณะที่จำกัด ดังนี้

1. ภาพลายนิ้วมีผลกระทบของแสงและเงาเล็กน้อยเนื่องจากข้อจำกัดในการเอาไปใช้ และไม่มีผลกระทบที่เกิดจากวัสดุคุณลักษณะประเภท การแบ่งย่อยภาพโดยการจำแนกตามกฎของฟิสิกส์จึงไม่จำเป็นสำหรับภาพลายนิ้ว

2. โดยลักษณะการสังเกตของมนุษย์ ในภาพรวมลายนิ้วมักจะดูแตกต่างกันเมื่อค่าสีโดยรวมต่างกัน เท่านั้น เนื่องจากรายละเอียดถูกลดทอนลงไปเมื่อมองในระยะไกล ส่วนในรายละเอียดย่อยๆ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมองระยะใกล้ สิ่งที่มีอิทธิพลมากขึ้น นั่นคือลักษณะของลวดลาย

จากการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของลายนิ้ว พบว่าวิธีการแบ่งย่อยโดยใช้การพิจารณาเพียงค่าสีก็เพียงพอต่อการวิเคราะห์ลายนิ้วแล้ว นอกจากนี้ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องประสิทธิภาพในการทำงานกับลายขนาดใหญ่ เนื่องจากการวิเคราะห์ลายนิ้วจะต้องทำการวิเคราะห์ที่ความละเอียดสูงสุด เพื่อให้ได้รายละเอียดครบทั้งรายละเอียดแบบหยาบ และแบบละเอียด วิธีการใช้กราฟไม่ระบุทิศทางแบบถ่วงน้ำหนักจึงน่าสนใจมากที่สุดเมื่อพิจารณาในเรื่องของคุณภาพ และประสิทธิภาพในการทำงาน

### 2.1.5 การจัดกลุ่มข้อมูล (data classification)

การจัดกลุ่มข้อมูลคือการจำแนกข้อมูลออกเป็นกลุ่ม โดยแยกตามลักษณะต่างๆ ที่กำหนด เช่น ค่าพลังงาน ระยะห่าง เป็นต้น การจัดกลุ่มข้อมูลมีลักษณะการทำงานคล้ายกับการ

แบ่งย่อยรูปภาพ แต่แตกต่างกันที่ข้อมูลที่แบ่งจะเป็นข้อมูลใดๆ ก็ได้ การจัดกลุ่มข้อมูลสามารถแบ่งได้เป็นห้ากลุ่ม ตามระเบียบวิธี ดังนี้

### 2.1.5.1 วิธีการแบบลำดับชั้น (hierarchical methods)

วิธีนี้จะเริ่มจากการแบ่งข้อมูลเป็นกลุ่มย่อยๆ แต่ไม่ก็กลุ่มก่อน แล้วจึงทำการแบ่งย่อยกลุ่มที่แบ่งไว้แล้วโดยใช้วิธีการแบ่งแบบเดิม แต่มีกฎการแบ่งที่ละเอียดขึ้น การแบ่งแบบนี้มีข้อดีคือ ทำงานเร็ว ใช้งานได้กับข้อมูลทุกชนิด และง่ายต่อการทำความเข้าใจ แต่ข้อจำกัดคือไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอนว่าจะหยุดแบ่งเมื่อใด และเมื่อข้อมูลถูกจัดกลุ่มแล้วจะไม่สามารถย้ายกลุ่มได้

### 2.1.5.2 การแบ่งส่วนข้อมูล (partitioning method)

วิธีการแบ่งส่วนข้อมูลเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด วิธีนี้ ยังสามารถแยกออกได้เป็นหลายรูปแบบ ดังนี้

1. การแบ่งส่วนแบบเคลื่อนย้าย (partition relocation) เป็นการปรับปรุงวิธีการแบบลำดับชั้น โดยการทำเป็นวงรอบ โดยใช้อัลกอริทึมแบบตะกอละ เพื่อจะปรับปรุงผลลัพธ์ให้ดีที่สุด
2. การใช้ความน่าจะเป็น (probabilistic) เป็นการใช้ความน่าจะเป็นมากำหนดกลุ่มของข้อมูล ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถใช้ในการจัดกลุ่มข้อมูลที่เป็นคนละรูปแบบได้ แต่ข้อจำกัดคือผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่ถูกต้องนักเมื่อพิจารณาในวงแคบ
3. ค่าเฉลี่ยเค (k-mean) เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุด วิธีนี้ ใช้ค่าเฉลี่ยของกลุ่มทั้ง  $k$  กลุ่ม วิธีนี้ ใช้งานได้กับข้อมูลที่มีคุณลักษณะเป็นตัวเลข และสามารถคำนวณความสัมพันธ์ได้ในรูปแบบของสมการ ในการใช้วิธีนี้ ผู้ใช้จะต้องกำหนดจำนวนกลุ่มเป็นค่า  $k$  ก่อนทำงาน การทำงานของวิธีนี้ จะทำงานเป็นรอบ โดยเริ่มจากการกำหนดตัวแทนค่ากลางของแต่ละกลุ่มก่อน แล้วจึงค่อยๆ ปรับค่ากลางเหล่านี้ ให้ถูกต้องตามการจัดกลุ่ม โดยการทำงานจะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบ EM (expectation maximization) ซึ่งพยายามลดค่าพลังงานในแต่ละกลุ่มลงให้ได้มากที่สุด วิธีค่าเฉลี่ยเคมีข้อจำกัดคือต้องกำหนดจำนวนกลุ่มไว้ก่อน และผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับกำหนัดค่าเริ่มต้น

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้วิธีแบ่งส่วนข้อมูลที่มีพื้นฐานจากแบบค่าเฉลี่ยเค เพียงแต่ได้มีการปรับปรุงให้ไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า  $k$  ก่อนเริ่มทำงาน โดยในตอนแรกจะกำหนดค่าจำนวนกลุ่มเป็นสองกลุ่มก่อน แล้วจะทำการตรวจสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดว่าต้องเพิ่มจำนวนกลุ่มหรือไม่ หากต้องเพิ่มก็จะกำหนดค่ากลางของกลุ่มใหม่ แล้วทำการจัดกลุ่มใหม่อีกครั้ง แม้ว่าการทำวิธีนี้ จะมีประสิทธิภาพไม่สูงมาก แต่เนื่องจากจำนวนกลุ่มในภาพก็มีจำนวนไม่มาก

นัก และเป้าหมายของงานวิจัยนี้ คือการสังเคราะห์แบบอัตโนมัติ วิธีนี้จึงเหมาะสมกับงานวิจัยที่น่าเสนอมากที่สุด

4. การแบ่งโดยขึ้นกับความหนาแน่น (density-based) เป็นการจับกลุ่มโดยดูจากค่าความหนาแน่นของกลุ่มข้อมูลในบริเวณใด ๆ วิธีนี้มีข้อดีคือลักษณะของกลุ่มที่จัดจะไม่มีข้อจำกัดเรื่องรูปร่างของขอบเขต (ซึ่งการแบ่งแบบค่าเฉลี่ยเค ขอบเขตของแต่ละกลุ่มจะเป็นวงกลม) วิธีนี้ไม่เหมาะสมกับงานวิจัยที่น่าเสนอเนื่องจากข้อมูลของลายผิวที่แยกกลุ่มแล้วมีไม่มากเพียงพอที่จะคำนวณความหนาแน่นได้อย่างถูกต้อง

#### 2.1.5.3 วิธีการจับกลุ่มโดยใช้ตาราง (grid-based methods)

วิธีนี้จะใช้การแบ่งส่วนของปริภูมิแทนที่การแบ่งที่ข้อมูลโดยตรง การแบ่งโดยใช้วิธีนี้มีข้อดีคือผลลัพธ์ของการจับกลุ่มจะไม่ขึ้นกับลำดับของข้อมูลที่ป้อนให้ นอกจากนี้ การจับกลุ่มแบบนี้ยังทำงานได้อย่างรวดเร็ว โดยวิธีที่เร็วที่สุดมีความเร็ว  $O(n)$  แต่อย่างไรก็ตามการจับกลุ่มแบบนี้สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่สามารถกำหนดเส้นแบ่งได้ชัดเจนมากๆ เท่านั้น ซึ่งไม่เหมาะสมกับรูปแบบข้อมูลในงานวิจัยนี้

#### 2.1.5.4 วิธีการจับกลุ่มโดยใช้ข้อกำหนด (constraint-based methods)

วิธีในกลุ่มนี้ มักใช้ในระบบเชิงพาณิชย์ที่มีการกำหนดรูปแบบการแบ่งที่ชัดเจนจากผู้ใช้ ซึ่งปัญหาของการจับกลุ่มด้วยวิธีนี้ ก็คือการเลือกข้อกำหนดที่ดีเพื่อจะแบ่งกลุ่มข้อมูลให้ได้ตามต้องการ เนื่องจากต้องกำหนดเงื่อนไข หรือต้องมีการเรียนรู้ก่อน วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมกับงานวิจัยที่น่าเสนอ

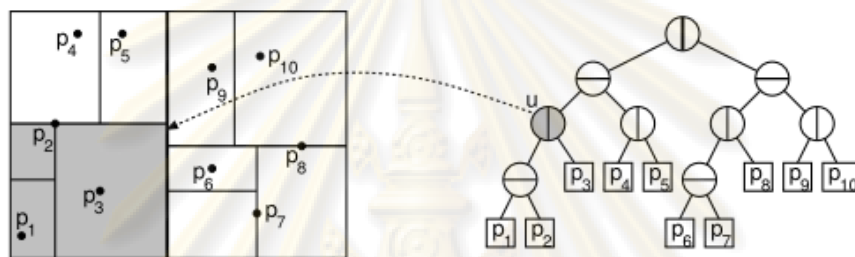
#### 2.1.5.5 วิธีอื่นๆ

นอกเหนือจากที่กล่าวมาก็มีการใช้หลักการที่หลากหลายเข้ามาช่วยตั้งแต่การใช้โครงข่ายประสาท การใช้วิธีพันธุกรรมศาสตร์ การประยุกต์เอาความรู้ด้านการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เข้ามาช่วย

#### 2.1.6 อัลกอริทึมการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (approximate nearest neighbour)

ปัญหาการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดเป็นหนึ่งในปัญหาพื้นฐานของคอมพิวเตอร์เมื่อกำหนดให้เซตของข้อมูล  $P$  ซึ่งมีขนาด  $d$  มิติ เราต้องการค้นหาข้อมูล  $p_i$  ที่อยู่รอบๆ จุด  $q$  ที่กำหนด ซึ่งวิธีแก้ปัญหานี้ ก็มีผู้เสนอโครงสร้างข้อมูลหลายรูปแบบด้วยกันแต่เนื่องจากวิธีการค้นหาเพื่อนบ้านส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการค้นหาที่มีการเติบโตเป็นฟังก์ชันเลขยกกำลังของจำนวนมิติ อย่างไรก็ตามถ้าเราไม่ต้องการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดจริงๆ การหาเพื่อนบ้านที่อาจมีความผิดพลาดเล็กน้อยได้จะช่วยเพิ่มความเร็วในการค้นหาเป็นอย่างมาก

เนื่องจากลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนี้ มีปริมาณมิติที่ค่อนข้างมากคือ ประมาณ 200 – 1000 มิติ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โครงสร้างข้อมูลแบบkd-tree มาจัดเก็บข้อมูลทั้งหมด โครงสร้างข้อมูลแบบนี้ถูกนำเสนอในงานของเบนท์เลย์ [4] โครงสร้างต้นไม้ถูกสร้างขึ้นโดยการตัดปริภูมิ  $d$  มิติ ออกเป็นส่วนๆ ซึ่งเรียกว่าเซลล์ (cells) แต่ละโหนดของต้นไม้จะประกอบด้วยขอบเขตของปริมาตรหนึ่งในปริภูมิที่ถูกตัดแบ่งแล้ว ระบายที่ใช้ตัดแบ่ง และจุดข้อมูลที่อยู่ภายในปริมาตรนั้น รากของต้นไม้จะครอบคลุมปริมาตรทั้งหมดที่เป็นไปได้ ส่วนลูกๆ จะถูกตัดแบ่งตามระนาบแบ่งที่ตั้งฉากกับแกนกับโหนดพ่อแม่โครงสร้างต้นไม้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



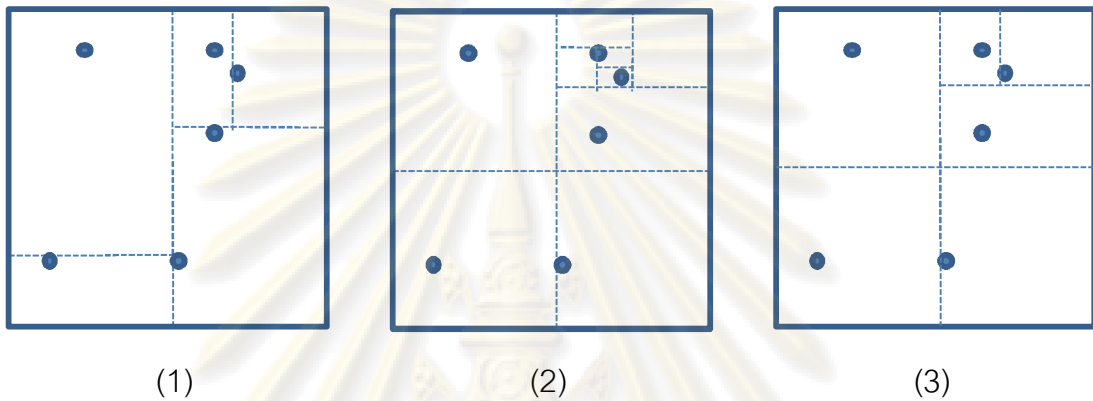
รูปที่ 2.7 ลักษณะของแผนภาพต้นไม้

เมื่อจำนวนของจุดในโหนดมีจำนวนมากกว่าค่าขนาดของถัง (bucket size) โหนดนั้น จะถูกแบ่งออกโดยใช้ระนาบที่ตั้งฉากกับแกน ซึ่งมีวิธีการแบ่งได้หลายวิธี ดังนี้

1. แบ่งปริมาตรโดยใช้ค่ามัธยฐาน ก่อนการแบ่งจะทำการคำนวณหาค่ามัธยฐานของข้อมูลในโหนดนั้นเสียก่อน แล้วจึงตัดแบ่งที่จุดมัธยฐานในระนาบที่ทำให้ข้อมูลกระจายตัวมากที่สุด ดังแสดงรูปที่ 2.8(1) วิธีนี้มีข้อดีคือจะได้ต้นไม้ที่มีความสูง  $\log_2(n)$  แน่นนอน แต่ก็มีข้อเสียคือจะทำให้ความหนาแน่นในแต่ละโหนดต่างกันมาก ซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าเพื่อนบ้าน
2. แบ่งปริมาตรเป็นส่วนที่เท่าๆ กัน ในแต่ละโหนดที่มีจำนวนสมาชิกมากกว่าขนาดของถัง จะทำการแบ่งครึ่งปริมาตรในโหนดนั้นตามด้านที่ยาวที่สุดดังแสดงรูปที่ 2.8 (2) วิธีนี้ อาจจะทำให้โครงสร้างต้นไม้มีความลึกสูงมาก ถ้าข้อมูลมีการกระจายตัวในลักษณะที่ทำให้เกิดโหนดว่าง
3. แบ่งปริมาตรฐานเป็นส่วนที่เท่าๆ กัน แต่ถ้ามีส่วนใดที่ไม่มีข้อมูลอยู่ จะทำการเลื่อนเส้นแบ่งไปให้ตรงกับข้อมูลที่อยู่ใกล้ที่สุด เพื่อให้ทุกโหนดมีข้อมูลอย่างน้อยหนึ่งตัว ดังแสดงรูปที่ 2.8 (3)



สำหรับการค้นคืนคำตอบของจุดที่อยู่ใกล้จุด  $q$  จะใช้การแวะผ่านต้นไม้ (tree traversal) โดยจะเลือกท่องไปยังลูกที่อยู่ใกล้กับจุด  $q$  มากที่สุด เมื่อได้คำตอบที่ต้องการแล้ว ก็ต้องตรวจสอบลูกอีกตัวหนึ่งถ้าระยะห่างของลูกกับจุด  $q$  มีค่าน้อยกว่า  $1/(1+e)$  เท่าของระยะห่างน้อยที่สุดที่พบ ก็จะท่องไปยังลูกอีกตัวหนึ่งต่อไปเพื่อหาจุดที่อาจจะใกล้กว่าจุดที่พบ โดยค่า  $e$  เป็นค่าความผิดพลาดที่ยอมให้มีได้ ถ้ากำหนดให้  $e$  มีค่ามากการทำงานก็จะเร็วขึ้นมากด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.8 การแบ่งปริภูมิตามวิธีทั้งสามแบบ

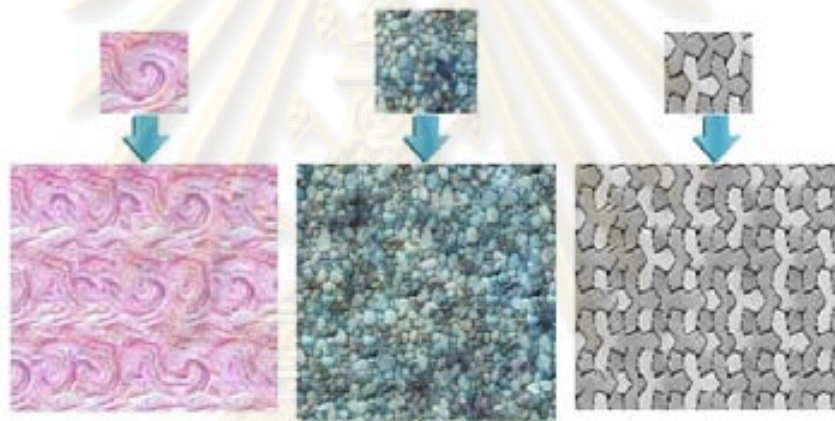
## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้านการสังเคราะห์หลายผิวมีค่อนข้างมากในช่วงสิบปีที่ผ่านมา การสังเคราะห์หลายผิวมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน งานวิจัยช่วงแรกเน้นการวิเคราะห์คุณลักษณะแบบวงกว้าง (global feature) โดยวิธีนี้ จะเลือกสีของจุดภาพผลลัพธ์จากการใช้ข้อมูลเชิงสถิติในปริภูมิลักษณะ (feature space) ซึ่งต่อมาได้พบว่าลักษณะการมองเห็นของมนุษย์มีความไวต่อคุณลักษณะแบบเฉพาะที่ (local feature) มากกว่า จึงเกิดงานวิจัยที่เน้นการสังเคราะห์โดยใช้แบบจำลองของมาร์คอฟ ซึ่งจะใช้การเลือกสีของจุดภาพผลลัพธ์โดยดูจากบริเวณรอบๆ เท่านั้น งานวิจัยด้านการสังเคราะห์หลายผิวช่วงหลังจะเน้นไปด้านการพัฒนาการความเร็วในการสังเคราะห์ พัฒนาระเบียบวิธีที่เหมาะสมกับหลายผิวเฉพาะแบบ และพัฒนาระเบียบวิธีที่มีความยืดหยุ่น ผู้ใช้สามารถปรับลักษณะของลายในภาพผลลัพธ์ได้

ในส่วนนี้ จะรวบรวมงานวิจัยด้านการสังเคราะห์หลายผิวที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ตั้งแต่ งานที่เป็นพื้นฐานของงานวิจัยที่น่าสนใจ งานวิจัยด้านการประมาณค่าตัวแปรของการสังเคราะห์แบบที่ละแผ่นภาพซึ่งเสนอวิธีการเลือกค่าตัวแปรเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ แล้วจึงตามด้วยงานวิจัยด้านการสังเคราะห์หลายผิวที่ใช้แนวคิดการสังเคราะห์หลายผิวที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

## 2.2.1 การวิเคราะห์และสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้พีรามิด (Pyramid-based Texture Analysis/ Synthesis)

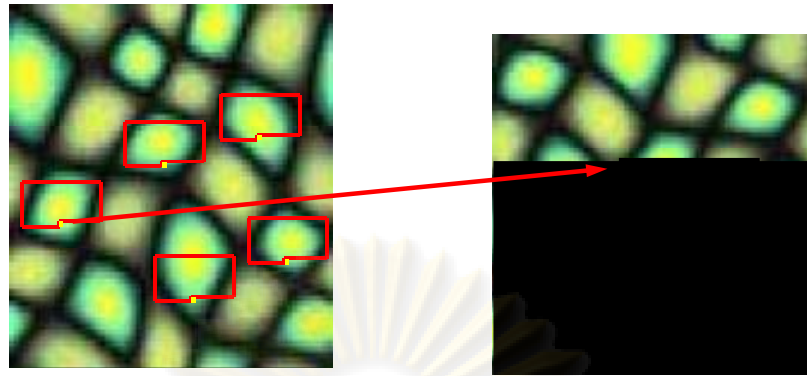
การวิเคราะห์และสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้พีรามิด [1] เป็นงานแรกที่น่าเสนอแนวคิดของการสังเคราะห์ลายผิว งานนี้เลือกใช้ลาปลาเซียนพีรามิด (laplacian pyramids) ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการใช้ตัวกรองลาปลาเซียน (laplacian filter) มาใช้วิเคราะห์ลายผิว พีรามิดที่สร้างขึ้น จะใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบฮิสโตแกรม (histogram) ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ แม้ว่าวิธีนี้จะได้รับการพัฒนาให้สามารถใช้กับลายผิวที่หลากหลายมากขึ้น ในงานของโบเน็ต [5] การสังเคราะห์ด้วยแนวคิดนี้ ก็ใช้ได้กับลายผิวแบบสโทแคสติก หรือเนียร์สโทแคสติก เท่านั้น ถ้าลายผิวมีโครงสร้างขนาดใหญ่ผลลัพธ์จะสูญเสียโครงสร้างเหล่านั้น ดังเช่น ในรูปที่ 2.9 ด้านขวา ซึ่งจะเห็นว่ารูปร่างของอิฐที่ควรจะเป็นรูปเหลี่ยมสามแฉกนั้นสูญเสียไป หรือในรูปตรงกลางที่อิฐบางก้อนมีลักษณะของการซ้อนทับกัน หรือมีการขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.9 ผลลัพธ์จากระเบียบวิธีของโบเน็ต

## 2.2.2 การสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละจุดภาพ (Texture Synthesis by Non-Parametric Sampling)

การสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละจุดภาพ [6] เสนอการสังเคราะห์ลายผิว วิธีการสังเคราะห์แบบนี้ เป็นการนำเอาข้อมูลจากแบบจำลองลายผิวแบบมาร์คอฟมาใช้โดยตรง การสังเคราะห์ลายผิวจะทำการเลือกค่าสีจากลายผิวต้นฉบับมาใส่ลงในลายผิวผลลัพธ์ที่ละจุด แต่ในการเลือกจุดภาพจะทำการเปรียบเทียบค่าสี โดยใช้สมการ  $d(I_k, J_k) = \sum_{p \in Y} \|I_k^p - J_k^p\|$  โดยกำหนดให้ค่า  $\Psi$  เป็นเพื่อนบ้านตามนิยามของแบบจำลองมาร์คอฟ กระบวนการการสังเคราะห์แสดงได้ดังรูป 2.10 a จากรูปจุดภาพที่กำลังถูกสังเคราะห์จะถูกเปรียบเทียบค่าสีบริเวณเพื่อนบ้านในรูปต้นฉบับ เพื่อค้นหาจุดภาพในต้นฉบับที่มีค่าพลังงานน้อยที่สุด เพื่อนำมาแปะลงในผลลัพธ์



รูปที่ 2.10 วิธีการสังเคราะห์หลายผิวแบบที่ละจุด

ในการสังเคราะห์หลายผิวแบบที่ละจุดภาพ การค้นหาจุดภาพเพื่อเอามาใส่ในผลลัพธ์เป็นกระบวนการที่มีผลต่อคุณภาพ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นอย่างมาก ด้านคุณภาพ ถ้าเลือกขนาดของเพื่อนบ้านเล็กเกินไป ผลลัพธ์ที่ได้จะสูญเสียลายที่มีขนาดใหญ่กว่าเพื่อนบ้านไป ซึ่งการเลือกขนาดของเพื่อนบ้านนั้นก็ขึ้นกับลักษณะของลายในภาพ ถ้าลายผิวมีขนาดลายที่หยาบ ขนาดของเพื่อนบ้านก็จะสูงขึ้นด้วย เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงเกิดการสังเคราะห์แบบลำดับขั้น ขึ้น เพื่อลดขนาดของเพื่อนบ้านที่ใช้ในการค้นหา โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการสังเคราะห์แทน

ในด้านประสิทธิภาพวิธีนี้ ต้องใช้เวลาทำงานสูงมากถึง  $O(knm)$  โดยที่  $k$  เป็นจำนวนจุดภาพเพื่อนบ้าน  $n$  คือจำนวนจุดภาพในภาพต้นฉบับ และ  $m$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพผลลัพธ์ ซึ่งแม้ว่าจะสังเคราะห์ภาพขนาดเล็ก แต่ถ้าภาพต้นฉบับมีขนาดใหญ่ก็ทำให้การทำงานช้าลงเช่นกัน นอกจากนี้ ถ้าต้นฉบับมีลักษณะของลายที่ใหญ่ การใช้งานก็ต้องเพิ่มค่า  $k$  อีกด้วยซึ่งโดยรวมแล้วอาจต้องใช้เวลาสูงถึงหลายชั่วโมงในการสังเคราะห์หลายผิวขนาดเพียง  $1024 \times 1024$  จุดภาพ เท่านั้น

อย่างไรก็ตามเราสามารถนำเอาวิธีการต่างๆ มาช่วยเร่งความเร็วได้ เช่น การใช้ภาพหลายความละเอียดเพื่อลดค่า  $k$  ลง สำหรับการค้นหาจุดภาพก็สามารถเร่งความเร็วได้หลายวิธี เช่น การใช้โครงสร้างต้นไม้ของเวกเตอร์แบบแจงหน่วย (tree-structured quantization vector) [7] มาช่วยสร้างโครงสร้างต้นไม้ในการค้นหา การใช้วิธีการประมาณค่าเพื่อนบ้าน (approximate nearest neighbour) [8] เพื่อช่วยประมาณค่าจุดที่มีค่าเพื่อนบ้านใกล้เคียงกับที่ต้องการที่สุด หรือการใช้แผนภาพแบบกระโดด (jump map) [9] เพื่อลดช่วยลดปริมาณจุดภาพในการค้นหา โดยการเลือกเฉพาะจุดภาพที่น่าจะเป็นคำตอบเท่านั้น

### 2.2.3 การสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ (Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer)

วิธีการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ [10] มีพื้นฐานเหมือนกับ การสังเคราะห์ที่ละจุดภาพ เพียงแต่วิธีนี้ จะทำการสังเคราะห์ภาพที่ละหลายจุด โดยใช้การสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพ เนื่องจากการสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพช่วยลดจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบจุดภาพ และลดจำนวนการค้นหาลง ความเร็วในการทำงานด้วยวิธีนี้ จึงสูงกว่าแบบที่ละจุดภาพ

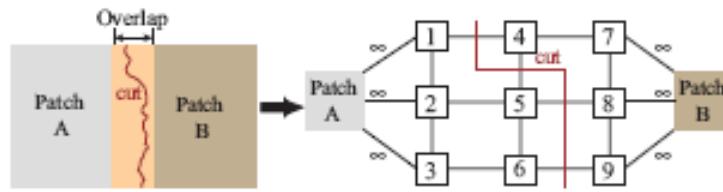
วิธีการทำงานของการสังเคราะห์แบบนี้ จะทำการเลือกแผ่นภาพจากภาพต้นฉบับ มาที่ละแผ่นภาพ แล้วนำมาวางเรียงต่อให้เชื่อมกับแผ่นเดิม การเลือกแผ่นภาพที่เหมาะสมจะทำการพิจารณาบริเวณแผ่นภาพที่เชื่อมกันเพื่อหาแผ่นที่เชื่อมกับแผ่นที่ได้สังเคราะห์ไปแล้วได้ดีที่สุด แล้วจึงทำการซ่อมแซมขอบในส่วนที่ซ้อนทับกัน (boundary zone) ซึ่งในงานนี้ เลือกใช้การเฉลี่ยค่าสี (blending) การสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพนี้ มีข้อดีค่อนข้างมาก เนื่องจากช่วงเวลาที่ใช้คัดเลือกจุดภาพลงได้มาก นอกจากนี้ การสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพยังช่วยลดขนาดของเพื่อนบ้านที่ต้องเปรียบเทียบด้วย เนื่องจากขนาดของแผ่นจะช่วยคงลักษณะของลายได้อยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบค่าสีในพื้นที่ซ้อนทับเป็นบริเวณกว้างเหมือนวิธีการสังเคราะห์ที่ละจุดภาพ

### 2.2.4 การสังเคราะห์ลายผิวโดยการตัดกราฟ (Graphcut Texture : Image and Video Synthesis Using Graph Cuts)

การสังเคราะห์ลายผิวโดยการตัดกราฟ [11] มีพื้นฐานอยู่บนการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ งานวิจัยนี้ นำเสนออัลกอริทึมใหม่ที่ใช้ในการซ่อมแซมรอยต่อระหว่างแผ่น จากเดิมที่ใช้การเฉลี่ยค่าสี ซึ่งทำให้ขอบของลวดลายภายในลายผิวมักไม่ต่อเนื่อง หรือเกิดความพร่ามัวขึ้น

วิธีที่ใช้ซ่อมแซมพื้นที่ซ้อนทับคือการตัดกราฟ โดยวิธีนี้ จะใช้จุดภาพแทนโหนด และ กำหนดให้เส้นเชื่อมมีค่าตามสมการ  $M(s, t, A, B) = \|A(s) - B(s)\| + \|A(t) - B(t)\|$  โดย  $s, t$  คือจุดภาพที่อยู่ในบริเวณที่ซ้อนกัน  $A, B$  คือภาพต้นฉบับและภาพผลลัพธ์ตามลำดับ โดยซึ่งการแก้ปัญหาการตัดกราฟก็สามารถใช้อัลกอริทึม mincut or max-flow ในการแก้ปัญหานี้ได้ อัลกอริทึมนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

การใช้วิธีการตัดกราฟช่วยให้เกิดรอยต่อในพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุด นอกจากนี้ ขอบระหว่างลายยังมีความคมชัด และต่อเนื่องกันอีกด้วย วิธีการตัดกราฟจึงช่วยเพิ่มคุณภาพของผลลัพธ์ได้อย่างมาก



รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของอัลกอริทึมตัดกราฟ

นอกจากนำเสนออัลกอริทึมในการประสานรอยต่อแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนออีกว่าในการเลือกแผ่นภาพเพื่อทดสอบกันนั้นสามารถเลือกแบบสุ่มได้ โดยที่คุณภาพของผลลัพธ์ลดลงไม่มากนัก การเลือกแผ่นแบบสุ่มเพียง 500-10,000 ตัวอย่าง ก็เพียงพอที่จะได้กลุ่มตัวอย่างที่ดี การสุ่มเลือกกลุ่มตัวอย่างเพียงบางตัวมาทดสอบทำให้ความเร็วในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ ก็ได้ประยุกต์การสุ่มมาใช้เช่นกัน แต่จะมีการสุ่มแบบที่ทำให้ประชากรมีความใกล้เคียงคำตอบมากขึ้น ซึ่งทำให้สามารถลดจำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบลงได้อย่างมาก

### 2.2.5 การสังเคราะห์ลายผิวโดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูป(Near-regular Texture Synthesis)

การสังเคราะห์แบบนี้ [2] ใช้ได้กับลายผิวแบบเกือบสม่ำเสมอเท่านั้น เนื่องจากลายผิวประเภทนี้มีลักษณะของการซ้ำกันของลายเป็นพื้นฐาน แต่ความแตกต่างระหว่างลายย่อยๆ จะเป็นเพียงส่วนเล็กน้อยเท่านั้น เช่น ขนาด ค่าสี เช่น ลายกระเบื้อง เป็นต้น ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์เพื่อแยกการเปลี่ยนรูปออกจากลายพื้นฐาน แล้วจึงสังเคราะห์ลายพื้นฐานและการเปลี่ยนรูป โดยการปูลายผิว แล้วจึงนำมารวมกัน วิธีนี้มีข้อดีคือไม่เกิดรอยแยกของลาย แต่ข้อจำกัดก็คือสามารถใช้ได้กับลายเพียงไม่กี่แบบเท่านั้น

### 2.2.6 การหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ลายผิวแบบทีละแผ่นภาพ (Optimizing the Parameters for Patch-based Texture Synthesis)

การสังเคราะห์ลายผิวแบบทีละแผ่นภาพยังมีข้อจำกัดอย่างหนึ่งคือผู้ใช้จะต้องระบุค่าขนาดของแผ่นที่เหมาะสม และระยะเวลาการซ้มนับ ด้วยตนเองค่าตัวแปรนี้มีผลอย่างมากต่อเวลาและคุณภาพของผลลัพธ์ เนื่องจากขนาดของลายผิวจะเป็นตัวกำหนดลักษณะการกระจายตัวของลายย่อยภาพในภาพ ถ้ากำหนดเล็กเกินไป ลายที่มีขนาดใหญ่จะสูญเสียรูปทรง แต่ถ้ากำหนดขนาดใหญ่เกินไป ผลลัพธ์อาจเกิดการซ้ำซ้อนกันได้ ตัวแปรตัวนี้ ยังมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์อีกด้วย การใช้ขนาดแผ่นที่เล็กจะทำให้ต้องเพิ่มเวลาที่ใช้ในการค้นหา เนื่องจากจำนวนครั้งที่ต้องค้นหามีมากขึ้น

นอกจากปัญหาของตัวแปรขนาดแผ่นแล้ว อีกตัวแปรหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกันก็คือ ขนาดของพื้นที่ที่ซ้อนทับกัน ซึ่งมีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์ การกำหนดพื้นที่ที่น้อยเกินไป จะทำให้ลายผิวมีความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น หรือเกิดการสูญเสียรูปร่างของลายย่อยๆ ไป เช่นกัน

ในงานวิจัยนี้ [12] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) ของตัวแปรขนาดแผ่น และพื้นที่ที่ซ้อนทับ โดยได้นำเสนอตัวแปรที่ใช้บ่งบอกถึงความเหมาะสมของค่านั้นๆ ที่จะนำมาใช้ โดยในการคำนวณขนาดแผ่นที่เหมาะสมจะใช้ตัวแปร 2 ตัว ดังนี้

### 1. ตัวแปรการมีอยู่ของคุณลักษณะ (feature containment parameter)

คำนวณจากค่าฮิสโทแกรมของแผ่นตัวอย่าง และลายผิวทั้งหมด ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่าตัวอย่างของแผ่นที่เหมาะสมควรมีการกระจายตัวของสีใกล้เคียงกับแผ่นตัวอย่างทั้งหมด วิธีการคำนวณทำโดยสุ่มเลือกแผ่นที่มีขนาดตามที่กำหนด แล้วหาค่าฮิสโทแกรมเพื่อเปรียบเทียบกับลายผิวด้านฉบับ

### 2. ตัวแปรการซ้ำกัน (period parameter) เนื่องจากลายผิวมักมีการซ้ำซ้อน






กัน ขนาดของลายผิวก็ควรจะมีขนาดพอดีกับความซ้ำซ้อนนั้นด้วย วิธีการคำนวณทำโดยสุ่มเลือกแผ่นที่มีขนาดตามที่กำหนด แล้วไปค้นหาแผ่นที่มีลักษณะคล้ายกัน ถ้ามีจำนวนของแผ่นที่คล้ายกันมาก แสดงว่าแผ่นที่เลือกสามารถบรรยายถึงขนาดของลายย่อยๆ ที่ซ้ำกันดีเพียงพอ

สำหรับค่าพื้นที่ที่ซ้อนทับกันในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางโดยพิจารณาซ้ำกับตัวแปรเพิ่มเติมอีก 1 ตัว คือ

### 1. ตัวแปรข้อจำกัด (constraint parameter) คำนวณจากจำนวนแผ่นภาพที่มี

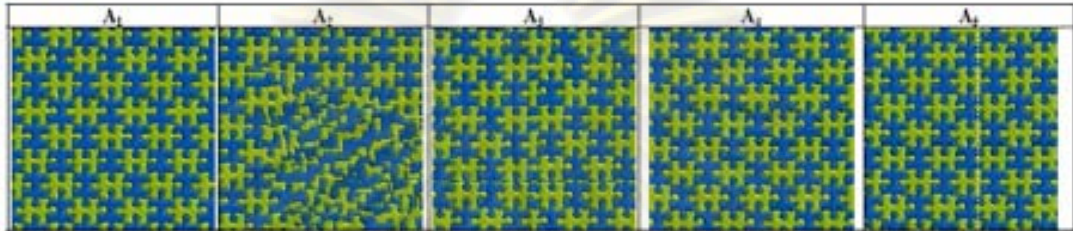
ค่าพลังงานในส่วนที่ซ้อนทับกันหลังจากการค้นหาต่ำกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งค่าที่เหมาะสมควรมีค่าที่ผ่านได้เพียงแผ่นเดียวไม่ว่าจะเลือกแผ่นไหนมาใช้ค้นหาก็ตาม

การทำงานของวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดจะทำการหาค่าตัวแปรทั้งสามแบบเมื่อกำหนดขนาดของแผ่น และขนาดของพื้นที่ที่ซ้อนทับทุกๆ ค่าที่เป็นไปได้ หลังจากนั้นจึงทำการเลือกค่าของขนาดแผ่น และพื้นที่ที่ซ้อนทับที่มีค่าตัวแปรทั้งสามตัวเหมาะสมที่สุด ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงไว้ในรูปที่ 2.12

Sample textures		Optimized parameters			Other parameters	
A		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
Size for a patch		 113*81	 6*6	 102*102	 113*81	 113*81
Widths for zones	left	4	4	4	1	8
	top	4	4	4	1	8
	top-left	4	4	4	1	8
Preprocess (s)		72.0				
Synthesis (s)		0.84	2.3	0.82	0.65	3.8



161\*161 (Sample A)

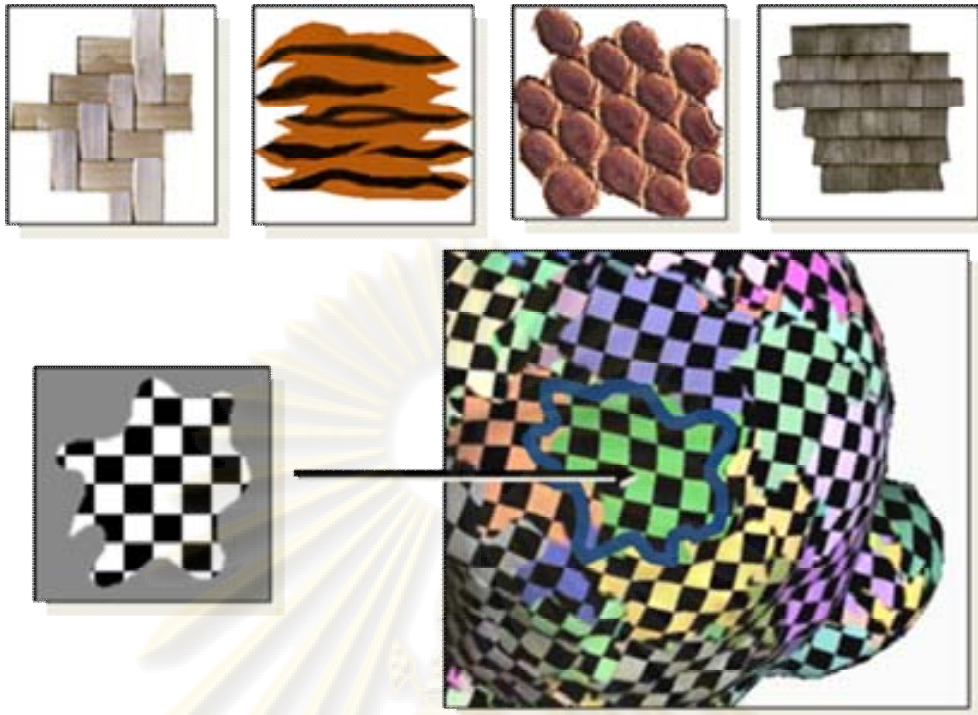


รูปที่ 2.12 แสดงผลจากวิธีการหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่น

ข้อจำกัดของวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ คือความซับซ้อนในการคำนวณ เนื่องจากการที่ต้องทดสอบทุกค่าตัวแปรที่เป็นไปได้ ทำให้การวิเคราะห์ทำได้ช้า โดยใช้เวลาประมาณ 1 นาทีในการวิเคราะห์ลายผิวขนาดไม่เกิน  $100 \times 100$  จุดภาพ ซึ่งถือว่าช้ามาก เนื่องจากอัลกอริทึมที่เสนอในงานวิจัยนี้มีความซับซ้อนถึง  $O(n^3)$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนจุดภาพ นอกจากนี้จากการตั้งสมมุติฐานว่าลายต้องมีการซ้ำกันทั้งด้านลวดลาย และค่าสีสโทแกรม จึงทำวิธีนี้ไม่เหมาะกับลายที่มีลักษณะของของลายย่อยๆ ไม่เหมือนกันหมดทั้งภาพ วิธีนี้จึงเหมาะกับลายที่เป็นโครงสร้าง และโครงสร้างนั้นต้องมีความซ้ำซ้อนกันค่อนข้างสูง เช่น ลายหน้าต่างบนตึก ลายตารางหมากรุก เป็นต้น

### 2.2.7 การหุ้มลายผิว (Lapped Textures)

การสังเคราะห์ลายผิวที่มีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยที่นำเสนอมีอยู่หลายงาน โดยส่วนใหญ่จะเป็นการสังเคราะห์ลายผิวโดยเป็นการตัดเอาส่วนย่อยๆ ของภาพมาประสานกัน ซึ่งมีลักษณะแนวคิดคล้ายกับงานวิจัยที่นำเสนอ งานวิจัยชิ้นนี้ [13] มีเป้าหมายเพื่อแสดงผลลายผิวที่สังเคราะห์แล้วแบบทันกาล โดยมีแนวคิดคือให้แปะแผ่นของลายซ้อนทับกันไปจนเต็มพื้นที่ผิวทั้งหมดของรูปทรง โดยรูปแบบการแปะจะถูกประมวลผลเอาไว้ก่อนแล้วโดยทำการแปะไปบนพื้นผิวที่ละแผ่นภาพและค่อยๆ กระจายตัวออกไปยังผิวที่ยังไม่ได้แปะ ดังรูปที่



รูปที่ 2.13 แสดงภาพต้นฉบับและภาพหลังการสังเคราะห์ด้วยวิธีการหุ้มลายผิว

วิธีการนี้ มีข้อจำกัดคือสามารถใช้ได้กับลายที่มีการซ้ำ ๆ ซาก และต้องสามารถแยกเป็นส่วนๆ ได้ เนื่องจากในกระบวนการแปะจะไม่สนใจลายที่แปะไว้ก่อนแล้ว ลายที่ใช้ได้จึงมีจำกัด เช่น ลายเกล็ดปลา ลายอิฐ ซึ่งก่อนจะนำมาใช้งาน ผู้ใช้ก็ต้องตัดขอบของลายให้ตรงกับส่วนย่อยๆ ในภาพด้วย เพื่อให้การแปะลายสามารถซ้อนทับกันได้โดยไม่มีลายที่ขาดจากกัน

## 2.2.8 อนุภาคลายผิว (Texture Particles)

การสังเคราะห์ลายผิวแบบอนุภาคลายผิว [14] จะมีการแบ่งย่อยภาพลายผิวออกเป็นส่วนๆ ในลักษณะของอนุภาค แล้วจึงทำการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของอนุภาคในภาพต้นฉบับเพื่อนำมาใช้เรียงอนุภาคลงในลายผลลัพธ์ ดังรูปที่ 2.14 อย่างไรก็ตามเนื่องจากลายที่แบ่งได้เมื่อนำไปเรียงลงไปผลลัพธ์จะมีลักษณะต่างกัน จึงต้องมีการแยกประเภท เป็น 3 รูปแบบคือ ลายที่เป็นจุดเด่นขนาดเล็กและมีการกระจายที่แน่นอน ลายที่เป็นจุดเด่นแต่กระจายตัวไม่แน่นอน และลายที่เป็นพื้นหลัง ลายทั้งสามรูปแบบต้องใช้ในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง แม้ว่าการวางลายแบบนี้ น่าจะทำได้รวดเร็ว แต่ปัญหาของวิธีนี้ คือลายพื้นหลังก็ยังจำเป็นต้องอาศัยการสังเคราะห์แบบที่ละเอียดซึ่งทำงานได้ช้า





รูปที่ 2.14 แสดงภาพการทำงานของวิธีอนุภาคลายผิว

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ ยังต้องอาศัยความช่วยเหลือจากมนุษย์ในกระบวนการแยกย่อย และการจัดกลุ่มอีกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ ก็ได้เสนอเครื่องมือที่จะช่วยให้ผู้ใช้ทำการกำหนดค่าต่างๆ ได้ง่าย ส่วนจำกัดของวิธีนี้ คือไม่สามารถสังเคราะห์หลายที่ไม่ได้ประกอบด้วยชิ้นส่วนขนาดเล็กได้ เช่น ลายแตกบนพื้น ผนัง เป็นต้น

### 2.2.9 การสังเคราะห์ลายผิวแบบทันทีด้วยโครงสร้างรูปหลายเหลี่ยม (Real-Time Structured Texture Synthesis and Editing Using Image-Mesh Analogies)

ในงานวิจัยนี้ [15] จะทำวิเคราะห์รายละเอียดในภาพต้นฉบับเพื่อค้นหาข้อมูลของโครงสร้างที่มีอยู่ในรูปของเส้นเชื่อมที่แบ่งแยกระหว่างลายย่อยๆ ภายในภาพ กระบวนการสังเคราะห์ทำโดยการประกอบโครงของเส้นเชื่อมต่อกันจนเต็มภาพ จากนั้นจะทำการสังเคราะห์ลายผิวแต่ละประเภทให้เต็มพื้นที่ แล้วจึงทำการวาดโดยใช้การ์ดจอเพื่อวาดลายที่อยู่ภายในโครงในส่วนต่างๆ จนเต็มภาพ โดยมีการใช้ภาพหน้ากาก (mask) เพื่อเพิ่มความละเอียดของรอยต่อ ดังรูปที่ 2.15

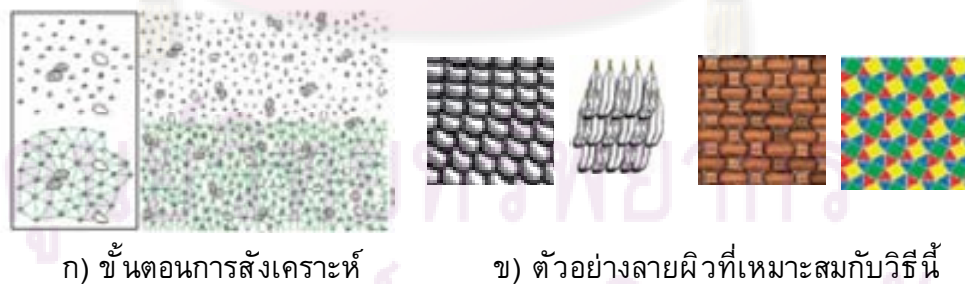
การสังเคราะห์ลายผิวด้วยวิธีนี้ มีข้อดีคือลายผิวย่อยๆ ไม่ซ้ำซ้อนกัน แต่ก็มีข้อจำกัดคือสามารถใช้ได้กับลายผิวที่มีโครงสร้างชัดเจนเท่านั้น และกระบวนการต่างๆ ยังต้องอาศัยมนุษย์เข้าช่วยจึงจะถูกต้อง เช่น การกำหนดส่วนประกอบย่อย การจัดกลุ่ม เป็นต้น



รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของสังเคราะห์ลายผิวด้วยโครงสร้างรูปหลายเหลี่ยม

## 2.2.10 ระบบการจัดการกระจายตัวสำหรับองค์ประกอบ (An Example-based Procedural System for Element Arrangement)

งานวิจัยนี้ [16] ใช้การจัดการกระจายตัวของส่วนประกอบในภาพ เมื่อได้ข้อมูลการกระจายตัวแล้วจึงนำมาใช้สังเคราะห์ภาพขนาดใหญ่โดยการวางส่วนประกอบให้กระจายตัวเหมือนกับต้นฉบับ ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ เพื่อหาลักษณะการกระจายตัวโดยคำนวณจากองค์ประกอบรอบๆ เมื่อครบก็จะนำเอาระยะห่างมาใช้กำหนดระยะขององค์ประกอบเมื่อสังเคราะห์ ดังรูป 2.16

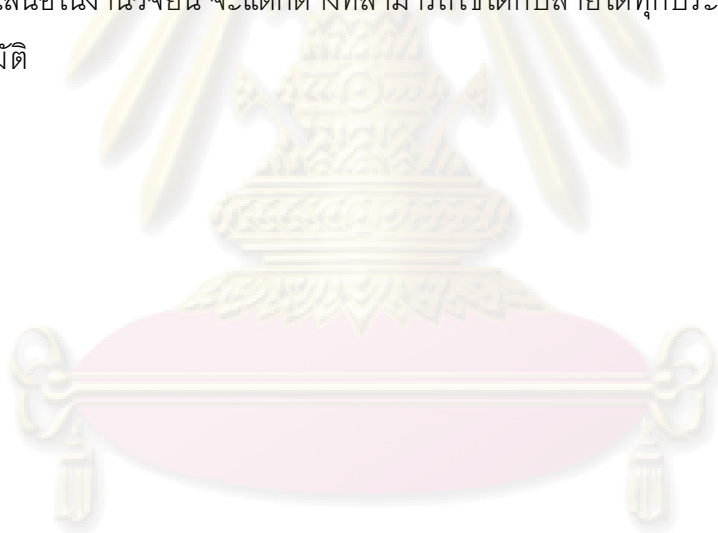


รูปที่ 2.16 แสดงการทำงานของระบบการจัดการกระจายตัวสำหรับองค์ประกอบ

วิธีนี้ มีความเหมาะสมกับลายผิวที่มีองค์ประกอบย่อยๆ จำนวนมาก เนื่องจากสามารถคงลักษณะของการกระจายตัวได้ โดยที่ไม่ดูซ้ำๆ กัน และยังสามารถเพิ่มความแตกต่าง

ระหว่างองค์ประกอบได้ เช่น ขนาดหรือสี เป็นต้น อย่างไรก็ตามการแยกองค์ประกอบก็ต้องใช้ความรู้จากมนุษย์ และสามารถใช้ได้เพียงกับลายที่แต่ละส่วนแยกกันโดยชัดเจนเท่านั้น

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะเห็นได้ว่าวิธีการสังเคราะห์ลายผิวมีมากมาย ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน สำหรับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นวิธีที่พัฒนาจากการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพโดยการนำเอาความรู้ที่ได้จากกระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพมาใช้ ดังที่จะได้นำเสนอในบทต่อไป ถึงแม้ว่าจะมีงานด้านการสังเคราะห์ลายผิวที่นำเอาแนวคิดการแบ่งย่อยรูปมาใช้อยู่แล้ว แต่งานแต่ละงานก็มีข้อจำกัด ซึ่งส่วนใหญ่ก็เนื่องจากกาหาส่วนต่างๆ ของภาพมาใช้โดยตรงนั้น จะเกิดข้อขัดแย้งกันระหว่างความต่อเนื่องของลายในกลุ่มเดียวกัน และระหว่างกลุ่ม ซึ่งหลายวิธีก็ได้ใช้วิธีการกำหนดเส้นขอบเข้ามาช่วย แต่วิธีดังกล่าวก็ต้องอาศัยความรู้ที่ป้อนจากมนุษย์ ซึ่งทำให้ไม่สะดวกกับผู้ใช้ นอกจากนี้ ยังมีข้อกีดในกรณีที่เส้นขอบไม่ชัดเจน หรือมีส่วนประกอบในภาพอยู่หลายกลุ่มทำให้เส้นขอบมีความซับซ้อน สำหรับระเบียบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะแตกต่างที่สามารถใช้ได้กับลายได้ทุกประเภท และสามารถทำได้โดยอัตโนมัติ



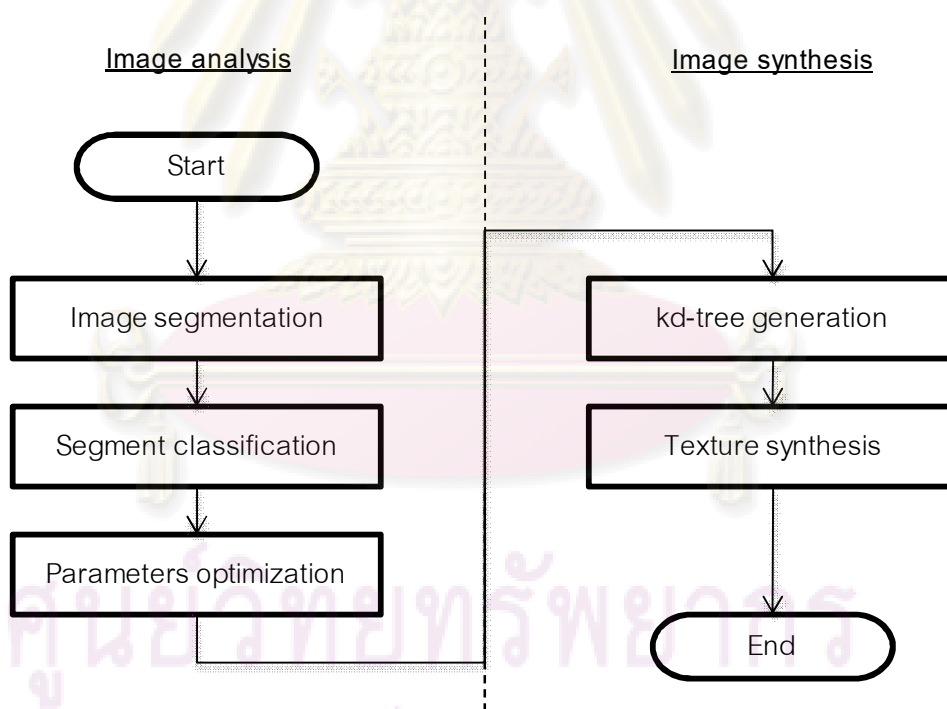
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์หลายผิวโดยการวิเคราะห์เซกเมนต์

การสังเคราะห์หลายผิวโดยทั่วไปสามารถแบ่งกระบวนการทำงานได้เป็นสองส่วนหลัก คือ ส่วนของการวิเคราะห์หลายผิวด้านฉบับเพื่อสกัดเอาข้อมูลที่สำคัญออกมา และส่วนของการสังเคราะห์หลายผิวซึ่งเป็นการนำเอาข้อมูลที่สกัดออกมาได้ทั้งหมดมาใช้สังเคราะห์หลายผิวที่มีขนาดตามที่ต้องการ

รายละเอียดของระเบียบวิธีทั้งหมดรวมทั้งการวิเคราะห์และสังเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ภาพต้นฉบับจะผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อสกัดเอาข้อมูลที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์หลายผิวออกมา ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ก็คือขนาดของแผ่นภาพ ขนาดของพิกเซลที่ซ้อนทับที่เหมาะสมร่วมกับข้อมูลของลวดลายย่อยๆ ในภาพซึ่งได้จากกระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพในรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้ จะไปช่วยในการพัฒนาคุณภาพของผลลัพธ์ และช่วยลดเวลาการทำงานของการสังเคราะห์หลายผิวแบบทีละแผ่นภาพ ซึ่งจะได้แสดงในบทถัดไป



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมด

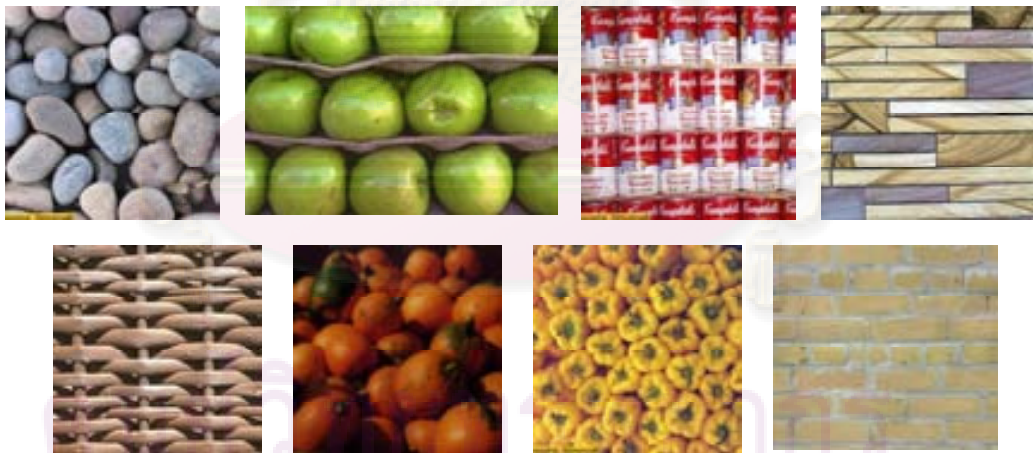
เนื่องจากงานวิจัยที่เสนอสามารถแยกออกเป็นส่วนของกาวิเคราะห์หลายผิว และ ส่วนของการสังเคราะห์หลายผิว ดังนั้นในรายงานฉบับนี้ จะขอแยกนำเสนอเป็น ๒ บท คือบทที่ 3 จะ

นำเสนอเฉพาะระเบียบวิธีการวิเคราะห์ลายผิว แล้วจึงนำเสนอระเบียบวิธีการสังเคราะห์ลายผิวในบทที่ 4

สำหรับบทที่ 3 นี้ จะเริ่มต้นนำเสนอจาก กระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้ายของทั้งหมดและเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ภาพ ต่อด้วยวิธีการการจัดกลุ่มส่วนของภาพซึ่งได้จากการแยกส่วนรูปภาพ และสุดท้ายเป็นการคำนวณหาขนาดของแผ่นภาพ และขนาดของพื้นที่ที่ทับซ้อนที่เหมาะสม

### 3.1 แนวคิด

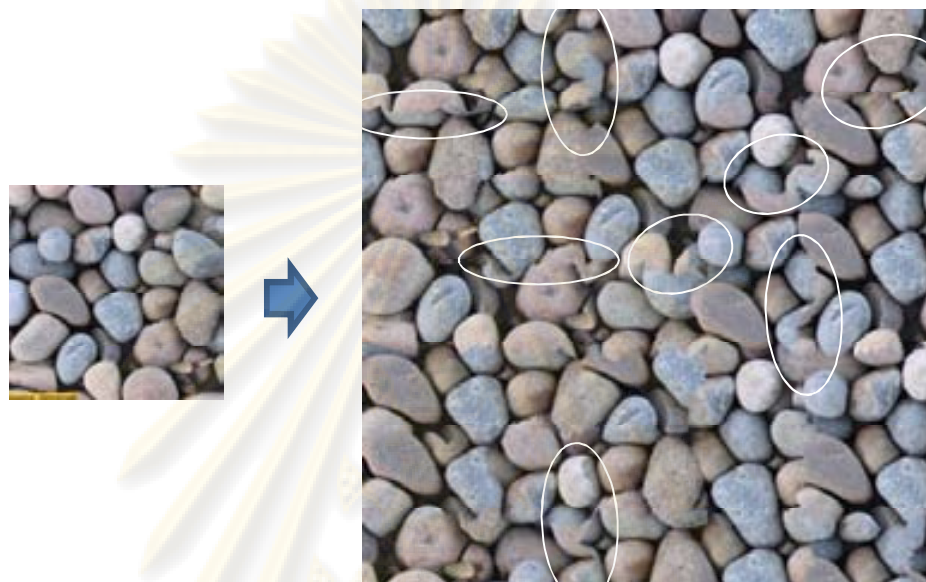
ในกระบวนการวิเคราะห์ภาพเพื่อสกัดเอาคุณลักษณะเด่นมาใช้ในการสังเคราะห์ โดยทั่วไปมักจะคิดว่าลายผิวมีลักษณะที่เป็นลักษณะเดียวกันทั้งภาพ กล่าวคือถึงแม้ลายผิวจะประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยๆ เช่น ลายจุดบนขนมบั้งกรอบ ลายบานหน้าต่างบนผนังตึก ลายดอกไม้บนทุ่งหญ้า ก็จะมีการพิจารณาเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน โดยไม่มีการแยกองค์ประกอบเลย เนื่องจากการสังเคราะห์ลายผิวโดยทั่วไปจะใช้แบบจำลองแบบสนามสุมของมาร์คอฟเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ ซึ่งสนามสุมของมาร์คอฟจะพิจารณาค่าตัวแปรทั้งหมดเป็นสนามเดียวกัน ดังนั้นเมื่อทำการสังเคราะห์ลายละเอียดย่อยๆ เหล่านี้ จึงถูกมองข้ามไป และส่งผลให้ผลลัพธ์มักสูญเสียลักษณะรูปร่างของลายละเอียดย่อยๆ เหล่านี้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างลายผิวที่มีองค์ประกอบภายในที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด

ลายผิวโดยทั่วไปมักมีลักษณะขององค์ประกอบที่แตกต่างกันประกอบอยู่ภายใน เช่นรูปที่ 3.2 ส่วนประกอบที่แตกต่างกันทำให้เกิดขอบภาพย่อยๆ ขึ้นในลายผิวต้นฉบับในการสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพ ยังไม่มีระเบียบวิธีใดที่ให้ความสนใจความแตกต่างขององค์ประกอบเหล่านี้ เนื่องจากคิดว่ารายละเอียดเหล่านี้ ถูกควบคุมโดยการเปรียบเทียบค่าสีอยู่แล้ว แต่การ

เปรียบเทียบเฉพาะค่าสีนั้นอาจไม่เพียงพอถ้าเกิดรายละเอียดค่อยๆ นั้นมีค่าสีใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสีบริเวณอื่นๆ แล้วค่าสีบริเวณอื่นๆ ซึ่งมีจำนวนมากกว่า อาจจะมีอิทธิพลกับการเลือกฉายผิวมากกว่าก็เป็นได้ ส่งผลให้ผลลัพธ์เกิดการสูญเสียความต่อเนื่องของขอบลายค่อยๆ นี้ไป ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพที่มีรอยต่ออย่างชัดเจน

จากปัญหานี้ ทำให้ข้อมูลส่วนประกอบของลายผิวจากการแบ่งย่อยรูปภาพมีบทบาทสำคัญที่จะแก้ไขปัญหานี้ ส่วนประกอบเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัว ความแตกต่างของขนาดของลายเหล่านั้น และสามารถจัดกลุ่มออกเป็นกลุ่มของลายค่อยๆ ได้อีกด้วย ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำมาใช้พัฒนาระเบียบวิธีการสังเคราะห์ลายผิวที่ละแผ่นภาพได้

ในส่วนของการวิเคราะห์ลายผิว ข้อมูลส่วนประกอบที่จัดกลุ่มแล้วมีความสำคัญในการช่วยกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นให้กับกระบวนการสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพ นั่นคือค่าขนาดของแผ่น และพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม เนื่องจากขนาดของแผ่นที่เหมาะสมมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะรูปร่าง และการกระจายตัวของลาย ซึ่งอัลกอริทึมในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมก็ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพต้นฉบับ ภาพลายผิวจะถูกแบ่งย่อยออกเป็น ส่วนประกอบเล็กๆ ตามค่าสี หลังจากนั้นส่วนประกอบเหล่านี้จะถูกจัดกลุ่มโดยแบ่งตามค่าสี และขนาดของลาย การแบ่งกลุ่มนี้จะทำให้ทราบว่าในพื้นที่นั้นๆ นี้มีลวดลายประกอบที่รูปแบบ

เมื่อได้จำนวนทั้งหมดแล้ว จึงทำการค้นหาค่าตัวแปรขนาดของแผ่น และขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้ สามารถทำได้โดยไม่ต้องอาศัยความช่วยเหลือจากมนุษย์เลย

เพื่อความสะดวกในการอธิบายงานที่เสนอ งานวิจัยนี้ได้นิยามการสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้การวิเคราะห์เซกเมนต์ไว้ดังนี้

### บทนิยาม 3.1

“การสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้การวิเคราะห์เซกเมนต์” คือกระบวนการสังเคราะห์ลายผิว  $J$  ซึ่งมีขนาดตามที่กำหนดจากลายผิวดั้งฉบับ  $I$  โดยที่ลายผิว  $J$  จะต้องดูคล้ายกับลายผิวดั้งฉบับ ไม่มีรอยต่อ และไม่เห็นการซ้ำ กันของลายโดยมีการนำข้อมูลเซกเมนต์ในภาพมาช่วยในการสังเคราะห์ลายผิว

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะแยกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ คือ การแบ่งย่อยรูปภาพ การจัดกลุ่มข้อมูล และกศคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม

### 3.2 การแบ่งย่อยรูปภาพ

การแบ่งย่อยของภาพเป็นกระบวนการแรกสุดที่ต้องทำในงานวิจัยนี้ และเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดอีกด้วย สำหรับขั้นตอนการแบ่งย่อยรูปภาพนี้ สามารถใช้ระเบียบวิธีได้หลายวิธีตามที่ได้นำเสนอในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้



ก) ลายผิวดั้งฉบับ



ข) ผลลัพธ์จากการแบ่งย่อย

รูปที่ 3.4 ผลลัพธ์จากกระบวนการแยกย่อยรูปภาพ

ผลลัพธ์จากการแบ่งย่อยภาพจะได้เป็นภาพที่มีค่าสีระบุเป็นป้ายชื่อ ในแต่ละป้ายชื่อจะไม่มีการทำงานกันเลย ผลลัพธ์จากการแบ่งย่อยแสดงไว้ในรูปที่ 3.4

### บทนิยาม 3.2

ภาพที่ได้จากกระบวนการแบ่งย่อยภาพต้นฉบับ  $I$  คือภาพ  $K$  ซึ่งในแต่ละจุดภาพจะเก็บค่าป้ายชื่อบอกว่าอยู่ในกลุ่มใด และแต่ละจุดภาพจะมีป้ายชื่อบอกกลุ่มเพียงค่าเดียวเท่านั้น

### บทนิยาม 3.3

เซกเมนต์ (Segment)  $S_i$  คือเซตของจุดภาพในภาพ  $I$  ที่มีความคล้ายกันตามนิยามที่กำหนดไว้

### บทนิยาม 3.4

กำหนดให้ฟังก์ชัน  $SID(I, x, y)$  แทนค่าป้ายชื่อของเซกเมนต์ของภาพ  $I$  ที่จุดภาพในตำแหน่ง  $x, y$

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการใช้กราฟไม่ระบุทิศทางแบบถ่วงน้ำหนักในงานวิจัยเรื่องการแบ่งย่อยภาพอย่างมีประสิทธิภาพด้วยกราฟ (Efficient Graph-Based Image Segmentation) [17] การแบ่งย่อยภาพด้วยวิธีนี้ กำหนดให้แต่ละกลุ่มประกอบด้วยจุดภาพที่มีค่าสีใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างระหว่างจุดภาพไม่เกินค่าขอบเขตการสังเกต ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ คือ มีความเร็วในการทำงานสูงคือมีความเร็ว  $O(n \log n)$  โดยที่  $n$  เป็นจำนวนจุดภายในภาพ ซึ่งถือเป็นวิธีที่เร็วที่สุดและเหมาะสมกับการแบ่งย่อยโดยที่ไม่ต้องอาศัยความช่วยเหลือจากมนุษย์ อย่างไรก็ตามการแบ่งย่อยภาพด้วยวิธีนี้ ก็ยังต้องป้อนตัวแปรเพิ่มเติมอีก 3 ตัว คือ

1. ตัวแปรเกาส์เซียน ( $s$ ) เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนในภาพ ก่อนทำการแบ่งย่อยจึงต้องผ่านตัวกรองให้ราบเรียบ (smooth filter) เสียก่อนซึ่งค่าตัวแปรตัวนี้ จะกำหนดว่าภาพที่จะมีความราบเรียบเท่าใด สำหรับค่าที่เหมาะสมจากการทดลองกับลายฉิวทั่วไปก็คือ 0.5 เนื่องจากภาพลายฉิวโดยทั่วไปมักมีคุณภาพที่ดีอยู่แล้ว
2. ตัวแปรขอบเขตการสังเกต ( $k$ ) ตัวแปรนี้ มีความสำคัญต่อการแบ่งย่อยมาก เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่ใช้กำหนดว่าจะแบ่งส่วนภาพเมื่อค่าสีต่างกันมากเท่าใด ถ้าขอบเขตของ



การสังเกตมีค่ามาก ขนาดของเซกเมนต์จะใหญ่ขึ้น และประกอบด้วยการกระจายตัวของค่าสีที่มากขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้ากำหนดค่าน้อย ขนาดของเซกเมนต์จะเล็กลง และมีจำนวนมากขึ้น

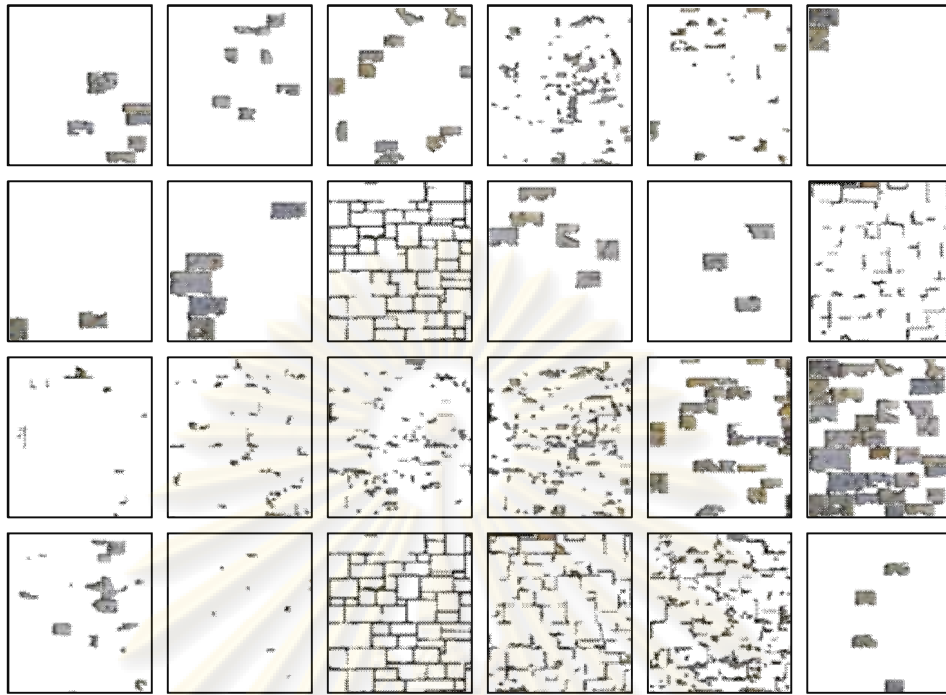
3. ตัวแปรขนาดของเซกเมนต์ที่เล็กที่สุด (*minsize*) เป็นตัวกำหนดข้อจำกัดว่าขนาดของเซกเมนต์จะเล็กที่สุดเท่าใด ทั้งนี้ เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ หรือลายย่อยที่มีขนาดเล็กมากๆ มีผลต่อการแบ่งย่อยรูปภาพ

เมื่อต้องกำหนดค่าตัวแปรทั้งสามตัวเพิ่มเติม เพื่อให้กระบวนการทั้งหมดเป็นไปโดยอัตโนมัติ เราจึงต้องทำการวิเคราะห์เพื่อเลือกค่าตัวแปร  $k$  และ *minsize* จากข้อมูลในภาพจากการสังเกตจะพบว่าค่า  $k$  และ *minsize* จะมีค่าแปรตามลักษณะของลายย่อยๆ ในลายผิว กล่าวคือ ถ้าลายที่วิเคราะห์มีลายย่อยๆ จำนวนมาก ค่า  $k$  และ *minsize* ควรก็ควรมีค่าน้อย เนื่องจากต้องการตัดแบ่งส่วนภาพเป็นส่วนย่อยๆ แต่ถ้าภาพนั้น มีองค์ประกอบเป็นลายเพียงแบบเดียว ค่า  $k$  และ *minsize* ก็สามารถเป็นค่ามากๆ ได้ ทั้งนี้ ถ้าในภาพมีองค์ประกอบเพียงอย่างเดียว ก็สามารถแบ่งย่อยออกมาได้เพียงเซกเมนต์เดียวก็เป็นได้

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้ค่าตัวแปรทั้งสองขึ้นอยู่กับขนาดของลายผิวด้านฉบับ โดยจากการทดลองกับลายผิวหลายชนิด พบว่าการกำหนดให้ค่า  $k = 256$  และค่า 
$$\text{minsize} = \frac{\max(\text{size}(I))}{2}$$
 เป็นค่าที่เหมาะสมกับลายผิวขนาดตั้งแต่  $64 \times 64$  จุด ถึง  $2048 \times 2048$  จุด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากลายผิวด้านฉบับอาจประกอบด้วยเซกเมนต์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งถ้าใช้ค่าที่กำหนดให้นี้ ก็จะทำให้เซกเมนต์เหล่านั้น ถูกมองข้ามไป ดังนั้นค่าตัวแปรนี้ก็สามารถปรับแต่งได้โดยผู้ใช้เพื่อให้เหมาะสมกับรูปต้นฉบับมากที่สุด

### 3.3 การจัดกลุ่มเซกเมนต์ของภาพ

หลังจากที่ได้ข้อมูลเซกเมนต์ของภาพแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการจัดกลุ่มเซกเมนต์เหล่านั้นเข้าด้วยกัน เนื่องจากในกระบวนการแยกย่อยภาพนั้น องค์ประกอบที่ไม่เชื่อมติดกันจะถูกแยกส่วนและให้ป้ายชื่อที่ต่างกันโดยอัตโนมัติ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดกลุ่มเซกเมนต์เหล่านี้ อีกครั้งในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการจัดกลุ่มที่ใกล้เคียงกับวิธีค่าเฉลี่ยเค แต่มีการปรับปรุงให้สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่ไม่รู้จำนวนกลุ่ม จำนวนกลุ่มจะเพิ่มขึ้นทีละกลุ่มในแต่ละรอบตามเงื่อนไขของระยะห่างระหว่างกลุ่มที่กำหนด ถ้าระยะห่างนี้ ยิ่งมากกว่าเงื่อนไขที่กำหนด ระบบจะทำการคำนวณเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มจำนวนกลุ่มให้กับข้อมูลเมื่อผ่านการจัดกลุ่มจากรูปลายอิฐ จะสามารถจัดกลุ่มได้เป็น 24 กลุ่ม ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผลลัพธ์จากการจัดกลุ่มตามค่าสี

### บทนิยาม 3.5

การจัดกลุ่มจะทำการจัดกลุ่มเซกเมนต์  $S_i$  ออกเป็นกลุ่ม  $G_j$  โดยแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยเซกเมนต์  $S_j$  ซึ่งมีค่าสีเฉลี่ยของจุดภาพภายในต่างกันไม่เกินค่า  $m$

### บทนิยาม 3.6

กำหนดให้ฟังก์ชัน  $GID(I, x, y)$  แทนค่าป้ายชื่อของเซกเมนต์ของภาพ  $I$  ที่จุดภาพในตำแหน่ง  $x, y$

อัลกอริทึมการจัดกลุ่มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

สำหรับการคำนวณระยะห่างระหว่างกลุ่มสามารถคำนวณได้โดยสมการ Euclidian distance โดยค่าสีที่นำมาคำนวณระยะห่างระหว่างเซกเมนต์ก็ได้มาจากค่าเฉลี่ยของสีภายในเซกเมนต์นั้นๆ

ในการจัดกลุ่มเราต้องใส่ค่าตัวแปร  $m$  ให้กับอัลกอริทึมด้วย ซึ่งเป็นขนาดของกลุ่มที่ใหญ่ที่สุด ถ้าเรากำหนดค่า  $m$  ให้น้อย ก็จะได้จำนวนกลุ่มที่มาก แต่ถ้ากำหนดไว้มากจำนวนกลุ่มที่ได้ก็จะน้อย จากการทดลองผู้วิจัยพบว่าค่าระยะห่าง 35 หน่วย มีค่าเหมาะสมกับลายผิวโดยทั่วไป และให้ผลที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ต่อไป

### ตารางที่ 3.1 อัลกอริทึมการจัดกลุ่มข้อมูลที่ใช้

---

**Algorithm : Classification(  $S, m$  )  $\rightarrow G$** 


---

```

1:  $G_1 \leftarrow S$ 
2:  $split \leftarrow true$ 
3:  $k \leftarrow 2$ 
4: While  $split$ 
5:    $G_k \leftarrow CreateGroup()$ 
6:    $k \leftarrow k+1$ 
7:    $reCluster(G, S)$ 
8:    $dist \leftarrow distance(S_i, G_j), \forall S_i \in G_j$ 
9:    $split \leftarrow \max(dist) > m$ 
10: EndWhile

```

---

**Algorithm : reCluster( $G, S$ )**


---

```

1:  $C_i \leftarrow mean(G_i), \forall G_i \in G$ 
2: ForEach  $S_i \in S$ 
3:    $G_j \leftarrow minArg(distance(S_i, C_j)), \forall C_j \in C$ 
4: EndFor

```

---

### 3.4 การเลือกขนาดของแผ่นภาพและพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม

แม้ว่าขนาดของแผ่นภาพที่ใช้ในการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่นมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลลัพธ์ แต่ก็มียานวิจัยค่อนข้างน้อยที่กล่าวถึงการเลือกขนาดของแผ่นลายผิว งานวิจัยของลิน [18] ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ของขนาดของแผ่นกับความเร็วในการสังเคราะห์ ส่วนงานวิจัยของหวัง [12] ซึ่งเป็นงานวิจัยด้านการหาขนาดของแผ่นภาพโดยตรงนั้นได้เสนอความสัมพันธ์ทั้งด้านคุณภาพและความเร็ว แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดในงานของหวังคือการใช้ค่าฮิสโทแกรมเป็นหลัก และการตั้งสมมติฐานว่าขนาดของแผ่นควรเก็บความถี่ ากันของลายผิว ทำให้วิธีนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับลายผิวที่มีความไม่สม่ำเสมอในตัวลาย

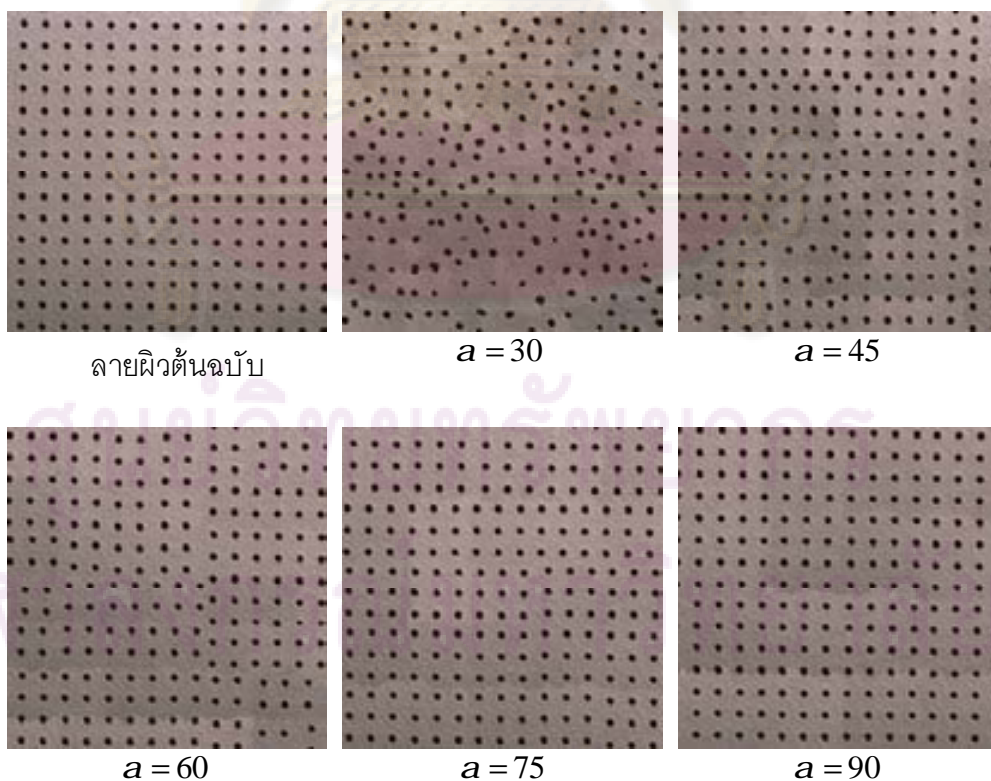
ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้วิธีการค้นหาขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสมที่แตกต่างออกไปจากงานของหวัง จากข้อมูลที่ได้จากการแบ่งย่อยรูปภาพ ทำให้รู้ว่ามียอดประกอบอะไรอยู่บ้าง และเมื่อนำองค์ประกอบเหล่านั้นไปจัดกลุ่ม ทำให้เรารู้ว่าในภาพลายผิวหนึ่งๆ มีรายละเอียดอะไรบ้าง ข้อมูลเหล่านี้ เป็นข้อมูลที่น่าจะนำไปใช้หาขนาดของแผ่นภาพได้ดี จากที่ดังกล่าวไว้ในแนวคิดว่ายอดประกอบเหล่านี้ ต่างก็มีรูปร่าง ค่าสี และการกระจายตัวที่ต่างกันไป จากรายละเอียดเหล่านี้ เราสามารถนำมาหาค่าขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสมได้

### 3.4.1 ขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่าขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสมนั้นควรจะใหญ่เพียงพอที่จะเก็บลักษณะของการกระจายตัว และรูปร่างขององค์ประกอบที่สนใจได้ ซึ่งในกรณีของภาพลายผิวที่มีองค์ประกอบเดียว และมีขนาดขององค์ประกอบเด่นที่เล็ก ขนาดของแผ่นภาพควรใหญ่มากกว่าช่องว่างระหว่างเซกเมนต์ เพื่อให้ข้อมูลนี้เป็นตัวควบคุมแผ่นภาพถัดไป ไม่ให้องค์ประกอบเหล่านี้ อยู่ห่าง หรือชิดกันมากเกินไป ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าใช้ขนาดของแผ่นภาพที่เล็กเกินไป การกระจายตัวจะแตกต่างจากเดิม แต่ในกรณีที่องค์ประกอบที่เด่นมีขนาดใหญ่ ค่าของตัวแปรนี้ ก็ควรพิจารณาจากขนาดของลายนั้น เนื่องจาก ถ้าแผ่นมีขนาดเล็กเกินไปรูปทรงของลายนั้นก็จะสูญเสียไป ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้แผ่นภาพขนาดเล็กจะทำให้รูปลักษณะของลายผิดไปจากเดิม

#### บทนิยาม 3.7

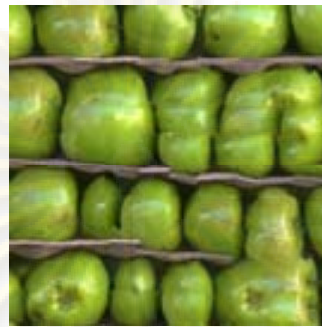
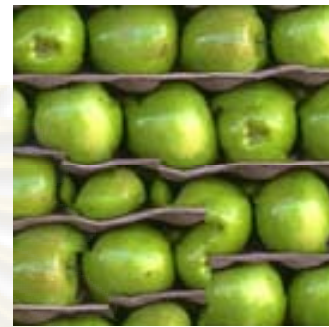
ขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสม  $a$  คือ ขนาดของแผ่นภาพที่ทำให้ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์แบบทีละแผ่นภาพถูกต้อง



รูปที่ 3.6 ขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของลายองค์ประกอบ

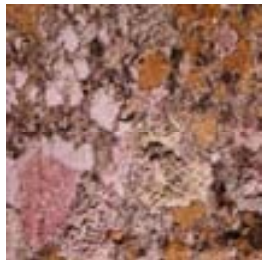


ลายฉิวต้นฉบับ

 $a = 15$  $a = 30$  $a = 45$  $a = 60$  $a = 75$  $a = 90$ 

รูปที่ 3.7 ขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดของลายองค์ประกอบ

แม้ว่าการใช้แผ่นที่ใหญ่กว่าค่าระยะห่าง และขนาดของลายองค์ประกอบจะทำให้ผลลัพธ์ออกมาดี แต่การใช้แผ่นที่มีขนาดใหญ่จนเกินไปก็มีข้อเสียเช่นกัน กล่าวคือเมื่อใช้แผ่นภาพที่มีขนาดใหญ่มาก จะทำให้การค้นหาแผ่นลายฉิวที่มีส่วนซ้อนทับใกล้เคียงกับลายเดิมทำได้ยากขึ้น หรืออาจจะไม่มีคำตอบที่ดีเพียงพอเลยก็ได้ เนื่องจากข้อจำกัดที่มากจนเกินไปจนไม่สามารถหาคำตอบได้ สิ่งนี้ทำให้เกิดรอยต่อที่ไม่สนิทขึ้นบนส่วนเชื่อมกันของแผ่น นอกจากนี้ การกำหนดขนาดของแผ่นที่ใหญ่จนเกือบเต็มพื้นที่ภาพก็ยังมีผลทำให้เกิดการซ้ำกันของลาย หรือเกิดขอบระหว่างแผ่นจนสามารถมองเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 3.8



ลายผิวต้นฉบับ  
256×256



ผลลัพธ์ เมื่อใช้  
 $a = 150, b = 15$

รูปที่ 3.8 ขนาดของแผ่นภาพที่ใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการซ้ำ ๆ กันของลาย

### 3.4.2 ขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม

พื้นที่ซ้อนทับมีผลต่อกระบวนการเลือกแผ่นที่เหมาะสมมาปะปะเพิ่ม การกำหนดค่าพื้นที่ซ้อนทับที่เล็กจนเกินไป ทำให้มีแผ่นที่ไม่เหมาะสมผ่านการเลือกมาได้ และทำให้ภาพผลลัพธ์เกิดความไม่ต่อเนื่องของลาย หรืออาจสูญเสียลักษณะของลายไปได้ แม้จะอัลกอริทึมการตัดกราฟจะสามารถช่วยลดรอยต่อของลายได้อย่างมาก แต่ในเรื่องลักษณะของลายนั้นเป็นอีกส่วนที่ต้องพิจารณาด้วย ดังรูปที่ 3.9 แม้ว่าผลลัพธ์จะมองไม่เห็นรอยต่อเนื่องจากความสามารถของวิธีการตัดกราฟ แต่ลักษณะของลายที่มีขนาดใหญ่ก็สูญหายไปอยู่ดี

#### บทนิยาม 3.8

ขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม  $b$  คือ ขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่ทำให้ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์แบบทีละแผ่นภาพถูกต้อง

เช่นเดียวกับขนาดของแผ่นภาพ การกำหนดค่าที่ใหญ่เกินไปนั้นก็ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลลัพธ์เช่นกัน ขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่ใหญ่จนเกินไปจะทำให้มีแผ่นภาพที่ผ่านกระบวนการเลือกน้อยลง หรืออาจทำให้คำตอบไม่มีเลยก็ได้ ทั้งนี้ เนื่องจากในกระบวนการเลือกแผ่นที่เหมาะสม จะกำหนดให้ค่าสี่มีความสำคัญเท่ากันทั้งหมดไม่ว่าจะอยู่บริเวณใด ถ้าพื้นที่ใหญ่

เกินไปจะทำให้พลังงานในบริเวณพื้นที่ที่ซ้อนทับมากขึ้น ด้วย เนื่องจากหาบริเวณที่มีค่าใกล้เคียงได้ยากนั่นเอง สิ่งนี้ ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างแผ่นซี นด้วยเช่นกัน



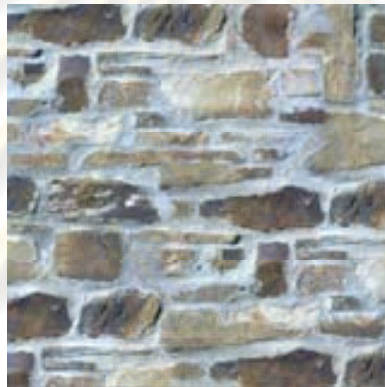
ลายผิวต้นฉบับ  
256×256



$a = 120, b = 5$



$a = 120, b = 10$



$a = 120, b = 20$



$a = 120, b = 30$

รูปที่ 3.9 ขนาดของพื้นที่ที่ซ้อนทับที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดคุณภาพของผลลัพธ์ลดลง

### 3.4.3 อัลกอริทึมในการเลือกขนาดของแผ่นภาพและพื้นที่ซ้อนทับ

การเลือกขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ที่ซ้อนทับเป็นกระบวนการที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่ง เนื่องจากค่าตัวแปรทั้งสองตัวส่งผลกับคุณภาพของผลลัพธ์เป็นอย่างมาก ในขั้นตอนนี้ จะเริ่มจากการคัดเลือกกลุ่มของเซกเมนต์ที่มีผลต่อคุณภาพของผลลัพธ์มากที่สุด แล้วจึงนำเอากลุ่มของเซกเมนต์นี้ ไปคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมตามสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้น

เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่น ทำให้เราสามารถกำหนดขนาดของแผ่นภาพและพื้นที่ที่ซ้อนทับได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น แม้ว่ากรวิเคราะห์ขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ที่ซ้อนทับนี้ นี้น อยู่กับรายละเอียดการกระจายตัว ซึ่งหลังจากการจัดกลุ่มแล้ว ก็ทำให้เราได้กลุ่มของเซกเมนต์มากมาย แต่ละกลุ่มก็จะมีค่าขนาดของแผ่นภาพที่เหมาะสม

แตกต่างกันไป ทางที่ดีที่สุดคือระเบียบวิธีการสังเคราะห์ควรจรรองรับขนาดของแผ่นภาพที่แตกต่างกันได้ตามลักษณะของลายที่สังเคราะห์ แต่จากการทดลองผู้วิจัยก็ยังไม่สามารถพัฒนาระเบียบวิธีที่ใช้กับขนาดของแผ่นภาพที่ไม่คงที่แล้วได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีกว่าระเบียบวิธีเดิมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงต้องทำการเลือกกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุดเพียงกลุ่มเดียว เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ลายผิวต่อไป

อัลกอริทึมการเลือกขนาดของแผ่นภาพและพื้นที่ที่ซ้อนทับแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัลกอริทึมในการเลือกขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ที่ซ้อนทับ

<b>Algorithm : SelectParameters(<math>I, G</math>) <math>\rightarrow</math> (<math>a, b</math>)</b>	
1:	$G_f \leftarrow \text{SelectFeature}(G)$
2:	$D \leftarrow \text{ComputeDistanceList}(G)$
3:	$W \leftarrow \text{ComputeSizeList}(G)$
4:	$a \leftarrow \frac{2 \times \overline{D} + \overline{W}}{2}$
5:	$b \leftarrow \overline{W} / 2$

ค่า  $\overline{D}$  และ  $\overline{W}$  เป็นตัวแทนของขนาดของเซกเมนต์ในกลุ่มที่สนใจ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ที่ 80 เป็นตัวแทนกลุ่มข้อมูล เพื่อให้ยืนยันว่าค่าตัวแปรที่ใช้จะครอบคลุมประชากรอย่างน้อย 80 เปอร์เซ็นต์

สิ่งแรกของการเลือกค่าตัวแปรคือการเลือกกลุ่มของเซกเมนต์ที่เหมาะสม ซึ่งสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจนี้ขึ้นอยู่กับการสังเกตของมนุษย์ เนื่องจากลายผิวมีความหลากหลายค่อนข้างมาก ลายที่มีความสำคัญมากที่สุดมักจะเป็นเซกเมนต์ที่มีจุดเด่นกว่าเซกเมนต์อื่นๆ เช่น ค่าสีแตกต่างจากสีอื่นๆ ขนาดของลายเล็ก การกระจายตัวโดดเด่นกว่ากลุ่มอื่นๆ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ค่อนข้างยากที่จะประเมินโดยใช้ลกอริทึมที่แน่นอน แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ระเบียบวิธีที่นำเสนอสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยความช่วยเหลือจากมนุษย์ วิธีการเลือกกลุ่มจะพิจารณาหากลุ่มที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์ดังนี้

1. ต้องมีจำนวนของเซกเมนต์ภายในกลุ่มมากกว่า 5 ขึ้น
2. การกระจายตัวต้องครอบคลุมพื้นที่มากกว่า ครึ่งหนึ่งของลายผิวด้านฉบับ
3. ถ้าเซกเมนต์ภายในกลุ่มมีเส้นขอบที่มาก ความน่าจะเป็นที่จะเป็นกลุ่มที่เหมาะสมจะมีน้อย
4. ถ้าเซกเมนต์ภายในมีการจัดเรียงตัว และขนาดของเซกเมนต์ที่เป็นระเบียบ ความน่าจะเป็นที่จะเป็นกลุ่มที่เหมาะสมจะมีค่ามาก



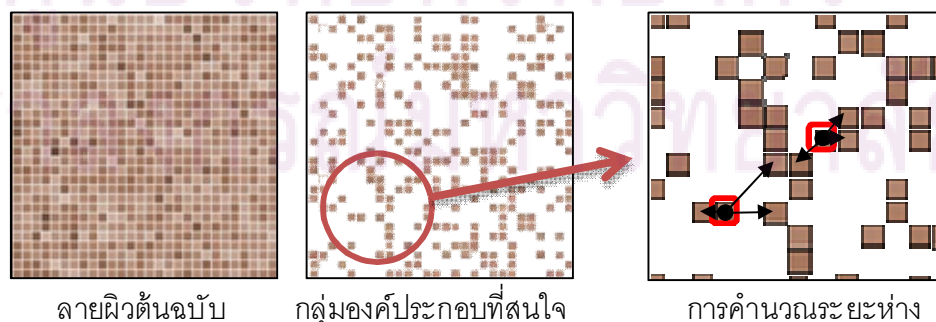
จากกฎที่กำหนดทำให้สามารถเขียนเป็นอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัลกอริทึมในการเลือกกลุ่มที่เหมาะสม

<b>Algorithm : SelectFeature(<math>G</math>) <math>\rightarrow G_f</math></b>	
1:	$G_f \leftarrow 0$
2:	$minEg \leftarrow MAX\_FLOAT$
3:	<b>ForEach</b> $g \in G$ <b>do</b>
4:	<b>If</b> $size(g) < 5$ <b>then</b>
5:	Continue
6:	<b>EndIf</b>
7:	$r \leftarrow FindBound(g)$
8:	<b>If</b> $r.width \times r.height \leq 0.5 \times I_w \times I_h$ <b>then</b>
9:	Continue
10:	<b>EndIf</b>
11:	$D \leftarrow DistanceList(g)$
12:	$W \leftarrow SizeList(g)$
13:	$Q \leftarrow EdgeScore(g)$
14:	$E_g \leftarrow j_1 \times \frac{Var(D)}{Max(D) - Min(D)} + j_2 \times \frac{Var(W)}{Max(W) - Min(W)} + j_3 \times Q$
15:	<b>If</b> $minEg > E_g$ <b>then</b>
16:	$G_f \leftarrow g$
17:	$minEg \leftarrow E_g$
18:	<b>EndIf</b>
19:	<b>EndFor</b>

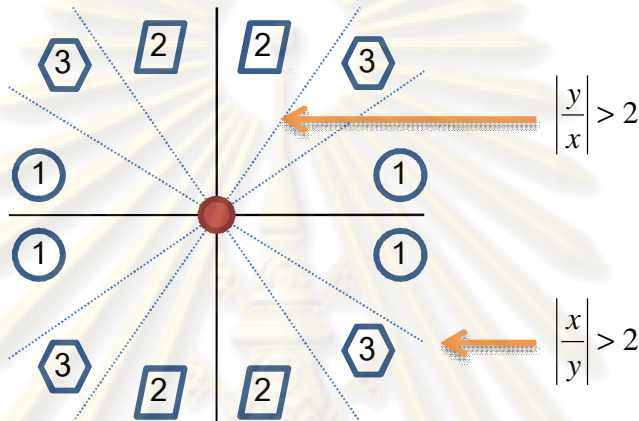
ในการเลือกกลุ่มโดดเด่นหลังจากผ่านกฎเบื้องต้น คือ จำนวนของเซกเมนต์ และการกระจายตัวแล้ว จะทำการคำนวณพลังงานของกลุ่ม ซึ่งหาค่าระยะห่างระหว่างเซกเมนต์ ขนาดของเซกเมนต์ และพลังงานของขอบภาพ โดยเมื่อนำมาคำนวณคะแนนรวมจะต้องมีการ กำหนดค่าความสำคัญของแต่ละพลังงาน ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสมคือ  $j_1 = 1, j_2 = 1, j_3 = 1$

การคำนวณหาระยะห่างระหว่างเซกเมนต์ของภาพ จะทำการค้นหาระยะห่าง เซกเมนต์ที่สนใจถึงเซกเมนต์ที่อยู่ใกล้ที่สุด ดังรูป 3.10 จากภาพต้นฉบับที่ทำการแยกย่อยแล้ว จะทำการหาระยะห่างระหว่างเซกเมนต์ในกลุ่มที่สนใจ ระบบจะค้นหาระยะที่น้อยที่สุดระหว่าง เซกเมนต์ แล้วเลือกระยะที่น้อยที่สุด



รูปที่ 3.10 การคำนวณระยะห่างระหว่างเซกเมนต์

ในการหาระยะห่างระหว่างเซกเมนต์จะแบ่งพื้นที่รอบๆ เซกเมนต์แต่ละตัว ออกเป็นสามส่วน เนื่องจากการวางตัวของเซกเมนต์รอบๆ เป็นไปได้ทั้งด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย ด้านขวา หรือทางเฉียงกับเซกเมนต์ที่สนใจ ถ้าเซกเมนต์ที่สนใจมีทั้งด้านบนและด้านซ้าย ค่าระยะ ในแกน  $x$  ก็ควรจะเป็นระยะห่างของเซกเมนต์ด้านซ้าย และระยะในแกน  $y$  ก็ควรจะเป็นระยะห่าง ของเซกเมนต์ด้านบน เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงแบ่งแยกพื้นที่รอบๆ เซกเมนต์ออกเป็น 3 ส่วน ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 การแบ่งพื้นที่รอบๆ เซกเมนต์

การคำนวณหาระยะที่เหมาะสมในแกน  $x$  และ  $y$  จะให้ความสำคัญของจุดใน บริเวณที่ 3 ถ้าจุดที่ใกล้ที่สุดอยู่ในบริเวณที่ 3 จะคิดค่าระยะห่างจากจุดนั้นเท่านั้น แต่ถ้าจุดที่อยู่ ใกล้ที่สุดอยู่ในบริเวณ 1 และ 2 จะคำนวณค่าระยะห่างแยกระหว่าง  $x$  และ  $y$  โดยใช้จุดสองจุด

สำหรับพลังงานของขอบภาพ จะหาจากฟังก์ชัน  $\text{EdgeScore}(g)$  ซึ่งคือฟังก์ชัน จำนวนขอบภาพเปรียบเทียบกับพื้นที่ของเซกเมนต์ ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัลกอริทึมในการคำนวณค่าพลังงานของขอบภาพ

---

**Algorithm :  $\text{EdgeScore}(g) \rightarrow Q$**

---

```

1:  $nPixels \leftarrow 0$ 
2:  $nEdge \leftarrow 0$ 
3: ForEach  $c_{rgb} \in g$  do
4:   If  $\text{IsEdge}(c_{rgb})$  then
5:      $nEdge ++$ 
6:   EndIf
7: EndFor
8:  $Q \leftarrow nEdge \times nEdge / nPixels$ 

```

---

หลังจากที่ได้กลุ่มที่เหมาะสมที่สุดแล้วจึงทำการคำนวณค่าขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม ซึ่งได้คำนวณตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ ค่าตัวแปรที่ได้จะถูกเก็บไว้ เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์หลายผิวต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การสังเคราะห์ลายผิวโดยการวิเคราะห์เซกเมนต์

ในบทที่ 4 จะเป็นการอธิบายถึงระเบียบวิธีในการสังเคราะห์ลายผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ การสังเคราะห์ลายผิวที่นำเสนอเป็นการประยุกต์การสังเคราะห์ลายผิวบนพื้นฐานของแผ่นภาพ ซึ่งจะเป็นการสังเคราะห์ภาพทีละส่วน เรียงกันไปจนเต็มภาพผลลัพธ์ อย่างไรก็ตามวิธีที่นำเสนอมีข้อดีเหนือกว่าวิธีการสังเคราะห์ลายผิวแบบเดิมหลายด้าน นั่นคือการรักษาลักษณะโดยรวมของภาพ และความเร็วในการค้นหาแผ่นภาพจากภาพต้นฉบับ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการใช้เซกเมนต์ที่ได้จากกระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพมาใช้ในการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่น ซึ่งผู้วิจัยได้ทดลองการนำข้อมูลเซกเมนต์มาใช้หลากหลายวิธี ซึ่งสุดท้ายก็ได้วิธีที่เหมาะสมที่สุดดังที่จะได้กล่าวต่อไป

ในบทที่นี้ จะแยกออกเป็นหัวข้อย่อยๆ คือ แนวคิด ลักษณะของการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่น การสร้างโครงสร้างต้นไม้ของแผ่นภาพ การคัดเลือกแผ่นภาพและการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแผ่นภาพ และการแปะแผ่นลายผิวด้วยวิธีการตัดกราฟ

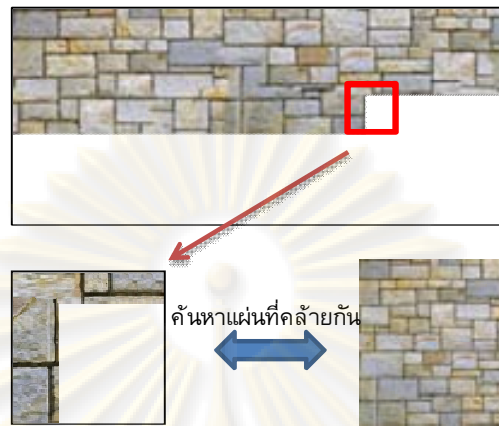
#### 4.1 แนวคิด

ในส่วนนี้ จะเป็นการสังเคราะห์ลายผิวโดยใช้ข้อมูลจากภาพต้นฉบับ และข้อมูลลักษณะของลายผิวที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ซึ่งได้นำเสนอไปในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยภาพเซกเมนต์ที่ผ่านการแยกย่อยภาพแล้ว กลุ่มของเซกเมนต์ที่มีลักษณะเหมือนกัน และค่าขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้ นำข้อมูลจากการแบ่งย่อยลายผิวต้นฉบับมาใช้ในการสังเคราะห์ลายผิวในสองส่วน คือ ในด้านการคัดเลือกแผ่นภาพ และการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแผ่นภาพ ซึ่งทำให้กระบวนการสังเคราะห์มีความเร็ว และมีคุณภาพมากขึ้น

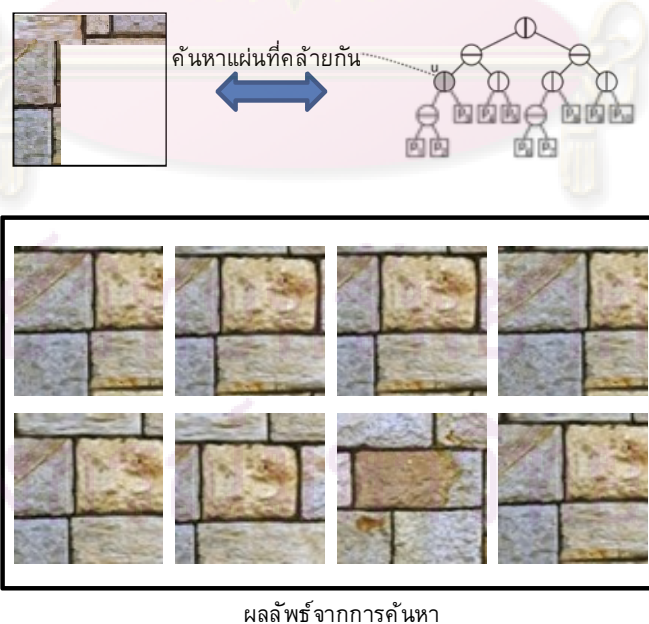
ในขั้นตอนการคัดเลือกแผ่นภาพ ในกระบวนการขงการสังเคราะห์ลายผิวแบบแผ่นด้วยวิธีของเฟรอส จะใช้วิธีการคำนวณหาค่าพลังงานจากค่าสีที่แตกต่างกันภายในบริเวณของพื้นที่ซ้อนทับ โดยจะทำการทดสอบกับทุกแผ่นภาพที่เป็นไปได้ นั่นคือจำนวนของแผ่นภาพที่ต้องทดสอบจะเท่ากับ  $(I_w - a_x) \times (I_h - a_y)$  หรือประมาณเท่ากับขนาดของภาพต้นฉบับ ซึ่งแต่ละแผ่นภาพจะต้องทำการคำนวณค่าความแตกต่างของค่าสีกับทุกจุดภาพภายในบริเวณพื้นที่

ซ้อนทับ ซึ่งทำให้ปริมาณการคำนวณสูงมาก ลักษณะการทำงานของระเบียบวิธีการสังเคราะห์ของเอพอรอส แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการทำงานของวิธีการสังเคราะห์ลายผิวแบบทีละแผ่นภาพในงานของเอพอรอส

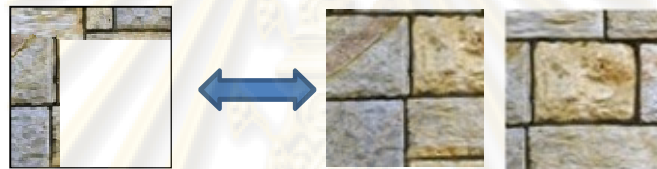
ในงานวิจัยนี้ จะปรับเปลี่ยนกระบวนการคัดเลือกแผ่นภาพ โดยใช้การสร้างต้นไม้หลายมิติ (kd-tree) มาช่วยในการค้นหาแผ่นภาพที่เหมาะสม ข้อมูลที่นำมาสร้างโครงสร้างต้นไม้ก็นำมาจากข้อมูลของกลุ่มของซกเมนต์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ภาพนั่นเอง เราสามารถใช้ค่าสีในการสร้างโครงสร้างต้นไม้ได้เช่นกัน แต่การใช้ข้อมูลจากกลุ่มของซกเมนต์มีข้อดีคือ ช่วยลดมิติของข้อมูลที่ใช้ค้นหาในโครงสร้างต้นไม้ และช่วยให้ผลลัพธ์ตรงกับความต้องการมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการทำงานจึงถูกปรับเปลี่ยนเป็นดังรูปที่ 4.2



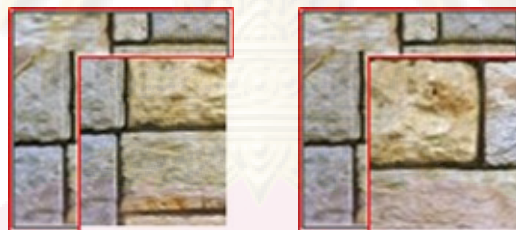
รูปที่ 4.2 แสดงวิธีการการคัดเลือกแผ่นที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้จะทำเพียงครั้งเดียวก่อนการสังเคราะห์ หลังจากนั้นก็จะใช้โครงสร้างต้นไม้ในการค้นหาแผ่นที่เหมาะสม โดยใช้หลักการที่เป็นการค้นหาเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุดแบบประมาณ (approximate nearest neighbour) ทำการค้นหาเพื่อนบ้านที่มีการกระจายตัวของกลุ่มภาพในบริเวณพื้นที่ที่ซ้อนทับใกล้เคียงที่สุดมา 30 แผ่น หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบทีละแผ่นเช่นเดียวกับวิธีเดิม เพื่อหาแผ่นที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปแปะลงในผลลัพธ์ต่อไป

ในกระบวนการทดสอบความเหมาะสมของแผ่นจากกลุ่มตัวอย่าง มีการใช้ข้อมูลจากการแบ่งย่อยรูปภาพเช่นกัน โดยการทดสอบความเหมาะสมจะคำนวณค่าพลังงานของแต่ละจุดภาพ แต่จะมีการกำหนดค่าความสำคัญโดยพิจารณาตามกลุ่มด้วย เพื่อให้แผ่นที่เลือกมีความแตกต่างของกลุ่มน้อยที่สุด เมื่อได้แผ่นที่เหมาะสมที่สุดแล้วจึงนำแผ่นนั้นไปแปะลงในผลลัพธ์ โดยทำการซ่อมแซมขอบให้เรียบร้อย ขั้นตอนนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



ก) เลือกทดสอบกับแผ่นลายผิวที่น่าจะใช้



ข) คำนวณค่าพลังงานในพื้นที่ที่ซ้อนทับ



ค) เลือกแผ่นที่มีพลังงานน้อยที่สุดมาแปะและแก้ไขพื้นที่ทับซ้อน

รูปที่ 4.3 แสดงการทำงานของการทำงานหาแผ่นที่เหมาะสม และการแก้ไขพื้นที่ทับซ้อน

การนำข้อมูลจากการแบ่งย่อยรูปภาพมาใช้ในการสังเคราะห์สามารถทำได้หลายวิธี ดังจะได้นำเสนอต่อไป

## 4.2 ลักษณะของการสังเคราะห์หลายผิวแบบแผ่น

ในการสังเคราะห์หลายผิวโดยใช้การวิเคราะห์เซกเมนต์นี้ มีพื้นฐานการทำงาน คล้ายกับการสังเคราะห์หลายผิวแบบแผ่น ซึ่งกระบวนการการสังเคราะห์ทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระเบียบวิธีการสังเคราะห์หลายผิว

---

**Algorithm : SegmentBased( $I, G, a, b$ )  $\rightarrow J$**

---

```

1:  Ann  $\leftarrow$  ConstructAnnTree( $I, G, a, b$ )
2:  For  $x \leftarrow 0$  to  $J_w$  ;  $x += a - b$ 
3:    For  $y \leftarrow 0$  to  $J_h$  ;  $y += a - b$ 
4:      ans  $\leftarrow$  list()
5:      minE  $\leftarrow$  MAX_FLOAT
6:      ans2  $\leftarrow$  0
7:       $g \leftarrow$  ComputeHistogram( $I, G, a, b$ )
8:       $c \leftarrow$  AnnSearch( $g, Ann$ )
9:      For  $j \leftarrow 0$  to candidate
10:        $r \leftarrow$  RandomPoint( $c$ )
11:        $e \leftarrow$  ComputeEnergy( $I, J, r$ )
12:       If  $e < threshold$  then
13:         append( $ans, r$ )
14:       EndIf
15:       If  $e < minE$  then
16:         minE  $\leftarrow$   $e$ 
17:         ans2  $\leftarrow$   $r$ 
18:       EndIf
19:     EndFor
20:     ans2  $\leftarrow$  (size( $ans$ ) > 0) ? Random( $ans$ ) : ans2
21:     GraphCutPaste( $I, x, y, ans2$ )
22:   EndFor
23: EndFor

```

---

การสังเคราะห์จะเริ่มจากการสร้างโครงสร้างต้นไม่จากหลายผิวด้านฉบับ จากนั้นจะไล่สังเคราะห์ทีละแผ่นภาพ แต่ละแผ่นภาพมีขนาดเท่ากับ  $a$  แต่เนื่องจากการปะแต่ละแผ่นจะต้องซ้อนทับกันเป็นพื้นที่ที่เท่ากับพื้นที่ซ้อนทับ ดังนั้นแต่ละแผ่นภาพจึงห่างกันเท่ากับ  $a - b$

ในการสังเคราะห์แต่ละแผ่นภาพ จะเริ่มจากการคำนวณการกระจายตัวของป้ายชื่อกลุ่มในแต่ละจุดภาพภายในพื้นที่ซ้อนทับ ในบรรทัดที่ หลังจากได้การกระจายตัวแล้วจึงนำเวกเตอร์ของค่าความหนาแน่นนี้ไปค้นหาแผ่นภาพที่ใกล้เคียงที่สุดจำนวน 30 แผ่น หรือตามจำนวนที่กำหนด ในบรรทัดที่ 8 เมื่อได้กลุ่มตัวอย่างแล้วจึงนำแผ่นภาพแต่ละแผ่นมาคำนวณพลังงาน ในบรรทัดที่ 11 จากนั้นจึงทำการสุ่มเลือกแผ่นที่มีค่าพลังงานน้อยกว่าค่าที่กำหนด หรือในกรณีที่ไม่มีแผ่นตัวอย่างใดที่มีค่าพลังงานน้อยกว่าค่าที่กำหนดก็จะเลือกแผ่นที่มีพลังงานน้อยที่สุด ในบรรทัดที่ 20 จากนั้นจึงทำการปะแผ่นนี้ บนผลลัพธ์ ในบรรทัดที่ 21

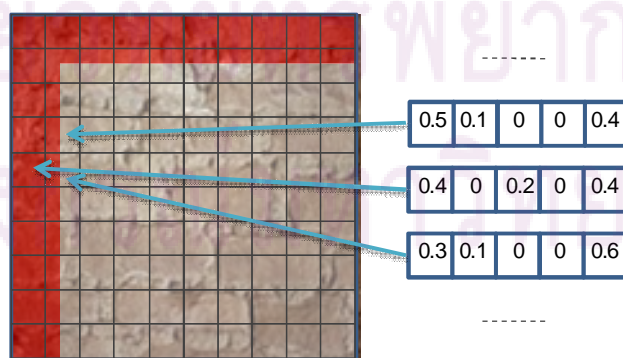
### 4.3 การสร้างโครงสร้างต้นไม้ของแผนภาพ

การสร้างโครงสร้างต้นไม้ของแผนภาพที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะอาศัยโครงสร้างแบบ kd-tree ซึ่งได้กล่าวถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในหัวข้อที่ 2.16

ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแผนภาพต้นไม้เป็นข้อมูลชนิดเวกเตอร์ขนาดซึ่งสร้างขึ้นจากการคำนวณการกระจายตัวของค่าป้ายชื่อกลุ่มในจุดภาพ โดยจะทำการแบ่งพื้นที่ที่แผนภาพเป็นด้านละ 10 ส่วน แล้วทำการคำนวณการกระจายตัวในแต่ละส่วนที่มีพื้นที่ที่ซ้อนทับอยู่ กำหนดให้  $p$  แทนข้อมูลของแผนที่สนใจ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลความหนาแน่นของช่องจำนวน  $(10 \times C_y) + (10 - C_y) \times C_x$  ช่อง โดยที่  $C_x = \text{ceil}\left(\frac{b_x}{a_x/10}\right)$  และ  $C_y = \text{ceil}\left(\frac{b_y}{a_y/10}\right)$  แต่ละช่องจะมีข้อมูลความหนาแน่นของกลุ่มภายในช่องนี้ เป็นจำนวนเท่ากับ  $|G|$

การที่ต้องคำนวณหาความหนาแน่นโดยการย่อยแผนภาพออกเป็นส่วนๆ ก็เนื่องจาก ความหนาแน่นของภาพต้นฉบับจะไม่เท่ากันในแต่ละส่วน ดังนั้นการแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ แล้วคำนวณหาความหนาแน่นเฉพาะส่วนย่อยๆ นั้นจึงให้ผลการค้นหาที่ใกล้เคียงกับคำตอบมากกว่า การแบ่งเป็นพื้นที่ใหญ่ ซึ่งจากการทดลอง ผู้วิจัยได้แบ่งส่วนแผนภาพเป็นสามส่วน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากมีแผนภาพที่ไม่ถูกต้องผ่านการค้นหาจนทำให้ผลลัพธ์ผิดพลาดไป

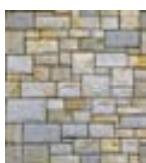
จากตัวอย่างดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเมื่อแบ่งพื้นที่ที่แผนภาพออกเป็นด้านละ 10 ส่วน ก็จะมีส่วนที่มีพื้นที่ที่ซ้อนทับอยู่ภายในจำนวน 36 ช่อง และจากการจัดกลุ่มของเซกเมนต์ภาพในภาพนี้สามารถจัดกลุ่มได้ 5 กลุ่ม ดังนั้นแต่ละช่องจะมีข้อมูลตัวเลขแทนความหนาแน่นของกลุ่มภายในช่องนั้น จำนวน 5 ตัว รวมแล้วข้อมูลที่ใช้สร้างโครงสร้างต้นไม้จะมีจำนวนมิติเท่ากับ  $5 \times 36 = 180$  มิติ



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการคำนวณข้อมูลการกระจายตัวของแผนภาพ



ในการสร้างแผนภาพต้นไม้ ข้อมูลที่ใช้สร้างจะเป็นข้อมูลของแผนภาพที่เป็นไปได้ทั้งหมดแต่เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลความหนาแน่น ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าเฉลี่ยของพื้นที่ได้ ดังนั้นข้อมูลของแผนภาพที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้จะเป็นแผนภาพที่เลือกให้กระจายกันโดยเว้นระยะห่างแต่ละแผ่น 5 จุดภาพ โดยจากการทดลองค่านี้ ไม่มีผลต่อคุณภาพของผลลัพธ์ จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์มีคุณภาพใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่เพียงช่วยลดขนาดข้อมูลลงถึง 25 เท่า แต่ช่วยให้กระบวนการสร้างโครงสร้างต้นไม้เร็วขึ้น ถึง 25 เท่า และยังช่วยเพิ่มความเร็วในการค้นหาอีกด้วย



ลายผิวตัวฉบับ ขนาด 256x256

ผลลัพธ์ขนาด 512x512



เมื่อใช้ต้นไม้ที่สร้างจากแผนภาพทุกแผ่น  
ใช้เวลาสังเคราะห์ 32.32 วินาที



เมื่อใช้ต้นไม้ที่สร้างจากแผ่นที่ห่างกัน 5 จุดภาพ  
ใช้เวลาสังเคราะห์ 6.54 วินาที

รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์เปรียบเทียบระหว่างต้นไม้ที่ใช้ทุกแผ่นกับต้นไม้ที่เลือกใช้เพียงบางแผ่น

ในการคำนวณระยะนาบที่ใช้ในการแบ่งปริมาตรในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการแบ่งครึ่งตามค่ามัธยฐาน ซึ่งแม้ว่าจะเสียเวลาคำนวณตอนสร้างโครงสร้างต้นไม้ค่อนข้างมาก แต่ก็ได้โครงสร้างต้นไม้ที่มีจำนวนชั้นน้อยที่สุด ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการค้นหาลดลงด้วย ทั้งนี้ เนื่องจากลักษณะของข้อมูลจะมีค่าแต่ละมิติค่อนข้างกระจายกันไปทุกมิติเนื่องจากเป็นค่าของความหนาแน่น ซึ่งจะมีข้อมูลอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความหนาแน่นมากกว่า 0 ในมิติที่กำหนดให้ การแบ่งปริมาตรแบบนี้ จึงเหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ข้อมูลแผนภาพต้นไม้จะถูกเก็บไว้เพื่อใช้ในกระบวนการคัดเลือกแผนภาพในขั้นตอนต่อไป

#### 4.4 การคัดเลือกแผนภาพจากลายนิ้วต้นฉบับ

ในแต่ละรอบของกระบวนการสังเคราะห์แผ่นลายนิ้วใหม่จะถูกเลือกเพื่อที่จะแปะเพิ่มลงไปบนผลลัพธ์ กระบวนการเลือกแผ่นลายนิ้วที่เหมาะสมจัดเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในกระบวนการสังเคราะห์ลายนิ้ว ลายนิ้วที่เหมาะสมจะต้องกลมกลืนกับลายนิ้วเดิมที่ได้สังเคราะห์ไปแล้ว ค่าสีในพื้นที่ที่ซ้อนทับต้องแตกต่างกันน้อยที่สุด เพื่อให้แผ่นที่แปะลงไปใหม่ไม่สร้างรอยต่อที่มองเห็นได้ การเลือกแผนภาพที่เหมาะสมสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็สามารถนำข้อมูลจากการแบ่งย่อยรูปภาพมาช่วยพัฒนาให้ประสิทธิภาพดีขึ้นได้ ดังนี้

##### 4.4.1 การทดสอบกับลายนิ้วต้นฉบับทุกแผ่นที่เป็นไปได้

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและตรงไปตรงมาที่สุด ปริมาณแผ่นลายนิ้วที่ต้องทดสอบในลายนิ้วต้นฉบับคือ  $(I_w - a_x) \times (I_h - a_y)$  ซึ่งก็คือแผ่นลายนิ้วทั้งหมดที่เป็นไปได้ การทดสอบกับลายนิ้วทุกแผ่นมีข้อดีคือจะได้แผ่นลายนิ้วที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ ทำให้ผลลัพธ์มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบกับแผ่นลายนิ้วทุกแผ่นทำให้ความเร็วในการสังเคราะห์ขึ้นกับขนาดของลายนิ้วต้นฉบับ จากการทดลองการสังเคราะห์ลายนิ้วในแต่ละแผ่นจากต้นฉบับขนาด 500x500 จุดภาพ ต้องใช้เวลาถึง 5 วินาทีต่อแผ่น

##### 4.4.2 การสุ่มเลือกแผ่นลายนิ้วจากต้นฉบับมาทดสอบ

การสุ่มเลือกมาทดสอบเพียงจำนวนหนึ่งนั้นทำให้กระบวนการสังเคราะห์มีความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยทำให้ความเร็วในการสังเคราะห์ขึ้นกับขนาดของลายนิ้วต้นฉบับอีกต่อไป แต่จะเพิ่มขึ้นกับจำนวนประชากรที่สุ่มขึ้นมาทดสอบแทน อย่างไรก็ตามจำนวนที่สุ่มขึ้นมาทดสอบนั้น มีผลกับคุณภาพของผลลัพธ์อย่างมาก ในลายที่มีความซับซ้อน อาจต้องใช้ปริมาณการสุ่มถึง 10,000 ตัวอย่าง จึงจะได้ลายนิ้วผลลัพธ์ที่ดี ซึ่งการทดสอบจำนวนขนาดนี้ ก็ใช้เวลามากพอสมควร

##### 4.4.3 การเลือกแผ่นลายนิ้วจากต้นฉบับโดยดูจากแผนภาพการกระโดด

วิธีนี้อาศัยแผนภาพการกระโดด (jump map) ซึ่งได้นำเสนอในงานของ [9] การใช้แผนภาพนี้ ทำให้สามารถจำกัดปริมาณการค้นหาได้โดยอาจเหลือเพียงหนึ่งในสิบของปริมาณแผ่นที่เป็นไปได้ ซึ่งก็แล้วแต่ลักษณะของลายนิ้วต้นฉบับ วิธีการของแผนภาพการกระโดดคือการเก็บ

แผ่นที่เป็นไปได้ทั้งหมดเมื่อกำหนดค่าสีของจุดแต่ละจุดในพื้นที่ที่ซ้อนทับ เมื่อต้องการค้นหาที่เอาแผ่นทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่มีค่าสีตรงกับแผ่นที่กำหนดมาทดสอบ

เราสามารถประยุกต์ใช้วิธีนี้ โดยใช้ค่าของซกเมนต์มาเป็นป้ายชื่อแทนค่าสีได้ ซึ่งจะทำให้ปริมาณการทดสอบน้อยลงกว่าการใช้ค่าสีเท่านั้น วิธีแผนภาพกระโดดสีจำกัดคือปริมาณการทดสอบยังขึ้นอยู่กับขนาดของลายผิวด้านฉบับอยู่ อย่างไรก็ตามข้อดีของวิธีนี้ก็คือผลลัพธ์ที่ได้มีคุณภาพเทียบเท่าแบบทดสอบทุกแผ่น

#### 4.4.4 การเลือกแผ่นลายผิวจากต้นฉบับโดยการสร้างโครงสร้างต้นไม้จากค่าสี

วิธีการสร้างต้นไม้จากค่าสีโดยตรงมีผู้เสนอไว้ในงาน[7] ซึ่งเป็นการใช้วิธี TSVQ มาช่วยในการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละจุด เราสามารถประยุกต์ใช้วิธีนี้ได้กับการสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพเช่นกัน แต่ข้อจำกัดคือถ้าพื้นที่ที่ซ้อนทับมีขนาดใหญ่มาก แผ่นลายผิวผลลัพธ์จากวิธีนี้ จะมีความผิดพลาดสูงมากจนไม่สามารถใช้งานได้

#### 4.4.5 การใช้โครงสร้างต้นไม้ของความหนาแน่นของกลุ่มภาพ รวมกับการวิเคราะห์ความเหมาะสมโดยพิจารณาถึงป้ายชื่อกลุ่ม

วิธีนี้ เป็นวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งวิธีที่นำข้อมูลจากการแบ่งย่อยรูปภาพมาใช้โดยตรง วิธีที่นำเสนอมีข้อดีกว่าวิธีอื่นๆ คือ สามารถค้นหาลายผิวที่เหมาะสมได้รวดเร็ว สามารถใช้ได้กับลายผิวขนาดใหญ่โดยที่ความเร็วไม่ลดลงมากนัก และยังสามารถค้นหาลายผิวที่เหมาะสมกับลายผิวที่มีโครงสร้างได้ดี โดยที่ไม่ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของลาย

วิธีนี้ เริ่มจากการคำนวณความหนาแน่นของพื้นที่ที่ซ้อนทับของภาพผลลัพธ์ ในบริเวณที่จะแปะแผ่นภาพใหม่ลงไป ตามขั้นตอนการคำนวณที่ได้อธิบายในส่วนการสร้างโครงสร้างต้นไม้ หลังจากนั้นจะนำเอาข้อมูลนี้ ไปค้นหาแผ่นที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงตามวิธีการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด โดยทำการค้นหาจำนวน 30 แผ่นภาพ

เนื่องจากแผ่นภาพแต่ละแผ่นที่ใช้สร้างโครงสร้างต้นไม้ห่างกัน 5 จุดภาพ แต่ละแผ่นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นแผ่นใดๆ ภายในบริเวณ 5x5 จุดภาพนี้ จากตรงนี้จะทำการสุ่มแผ่นภาพภายในบริเวณที่กำหนดมา 10 แผ่นภาพเพื่อทำการทดสอบหาแผ่นที่เหมาะสมต่อไป

#### 4.5 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแผ่นภาพ

หลังจากได้กลุ่มตัวอย่างที่คาดว่าน่าจะเป็นแผ่นภาพที่เหมาะสม ขั้นตอนถัดไปก็คือการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแผ่นภาพแต่ละแผ่นแล้วทำการเลือกแผ่นที่เหมาะสม ไปปะลงไปภาพผลลัพธ์ต่อไป

ในขั้นตอนนี้ จะใช้สมการค่าพลังงานเป็นตัวเปรียบเทียบความเหมาะสมของแผ่นภาพ ตามวิธีของการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ สมการค่าพลังงานที่กำหนดคือ  $d(I_{bk}, J_{bk}) = \sum_{p \in Y} \|I_{bk}^p - J_{bk}^p\|$  แต่เนื่องจากการกำหนดค่าพลังงานด้วยวิธีนี้ ทำให้ลายแต่ละลายมีความสำคัญเท่าเทียมกัน จึงเกิดความไม่ต่อเนื่องกันของลายขึ้น

ในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอสมการพลังงานระหว่างแผ่นภาพใหม่โดยการสร้างตัวแปรเพื่อเพิ่มความสำคัญให้กับจุดภาพที่มีค่าป้ายชื่อกลุ่มเดียวกันให้มากขึ้น ลายผิวที่มีค่าป้ายชื่อกลุ่มใกล้เคียงกันมากก็จะมีคะแนนน้อยลง ส่งผลให้มีสิทธิ์ได้รับเลือกให้นำไปใช้มากยิ่งขึ้น สมการสำหรับพลังงานระหว่างแผ่นในงานวิจัยนี้ เป็นดังนี้

$$d(I_{bk}, J_{bk}) = \sum_{p \in Y} g \|I_{bk}^p - J_{bk}^p\| \quad \text{โดยที่ } g = \begin{cases} 0.1 & ; \text{GID}(I_{bk}^p) = \text{GID}(J_{bk}^p) \\ 1 & ; \text{otherwise} \end{cases}$$

สำหรับค่า  $g$  ที่กำหนดเป็นค่าที่ได้จากการทดลองกับลายผิวส่วนใหญ่ ว่าเป็นค่าที่ทำให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องมากที่สุด

#### 4.6 การปะแผ่นลายผิวด้วยวิธีการตัดกราฟ

หลังจากได้แผ่นภาพลายผิวต้นฉบับแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการปะภาพลายผิวต้นฉบับลงบนผลลัพธ์ ซึ่งการปะลงบนผลลัพธ์ก็มีหลายวิธี การปะภาพลายผิวลงไปทับลายผิวเดิมจะทำให้เกิดขอบของแผ่นลายผิวที่สังเกตเห็นได้ง่าย วิธีการที่ดีขึ้นคือการกำหนดบริเวณที่จะทำการเกลี่ยค่าสีระหว่างลายผิวที่สังเคราะห์ไปแล้วและลายผิวใหม่ทำการปะ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ สามารถแก้ไขปัญหาในเรื่องของขอบในสีที่เหมือนกันเท่านั้น ถ้าลายผิวที่ปะมีขอบสีที่มองเห็นได้ชัดเจนระหว่างแผ่น การเกลี่ยสีด้วยวิธีธรรมดาจะทำให้ลายผิวบริเวณขอบเหลื่อมกัน และมองเห็นได้ว่าลายไม่ต่อเนื่องกันตามขอบ ซึ่งมักจะเป็นกับลายผิวแบบที่มีโครงสร้าง

วิธีการที่นิยมใช้กันในปัจจุบันก็คือการประยุกต์วิธีการตัดกราฟเข้ามาช่วยค้นหารอยตัดที่ทำให้เกิดรอยต่อน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ ก็ใช้วิธีการตัดกราฟมาช่วยในการประสานรอยต่อระหว่างแผ่นเช่นโดยไม่ได้ตัดแปลงวิธีเดิมแต่อย่างใด

## บทที่ 5

### การทดลองและวิเคราะห์ผล

วิธีการสังเคราะห์หลายผิวที่นำเสนอเป็นวิธีใหม่ ซึ่งเป็นการนำเสนอวิธีประยุกต์เอาความรู้ที่ได้จากการแบ่งย่อยรูปภาพมาใช้ ในบทนี้ จะกล่าวถึงกระทดลองเพื่อประเมินผลระเบียบวิธีที่นำเสนอ และวิเคราะห์ผลของการทดลอง สำหรับการทดสอบจะแยกออกเป็นสี่ส่วนคือ การทดสอบเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของผลลัพท์ การทดสอบประสิทธิภาพเชิงเวลา และการวิเคราะห์ความเหมาะสมของระเบียบวิธีที่ใช้ และการเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์หลายผิวแบบต่างๆ

ในงานวิจัยที่นำเสนอจะทำการทดลองโดยใช้วิธีการอิมพลีเมนต์ระเบียบวิธีที่ใช้ด้วยการเขียนโปรแกรมภาษา C/C++ และทำการทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ AMD Athlon X2 Dual Core 2.60 GHz หน่วยความจำหลัก 2 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows Vista

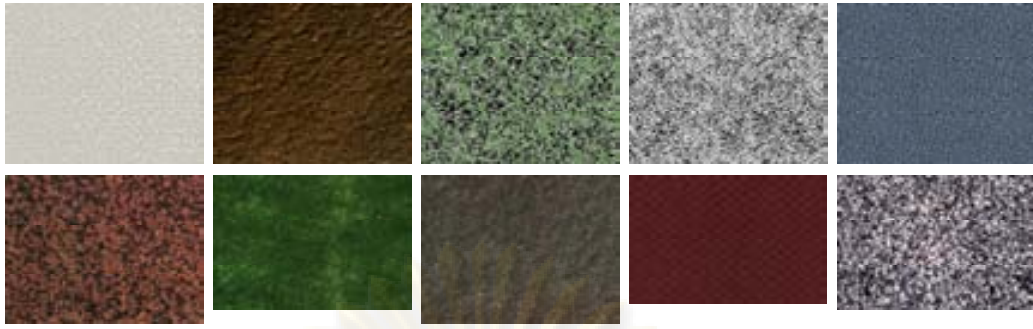
#### 5.1 การทดลองเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของผลลัพท์

การวิเคราะห์คุณภาพของผลลัพท์จะทำการวิเคราะห์กับลายผิวที่ใช้ทั่วไปจำนวน 45 ลายผิว ครอบคลุมลายผิวทุกชนิด และมีทั้งลายผิวที่สร้างเอง และลายผิวตามธรรมชาติ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1 ลายผิวที่ใช้ทดสอบได้เลือกมากจากฐานข้อมูล VISTEX [19] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลของลายผิวที่มักใช้ในงานวิจัย เป็นจำนวนประมาณ 70 % ส่วนที่เหลือเป็นลายผิวที่ผู้วิจัยเลือกจากลายผิวทั่วไป เพื่อให้ครอบคลุมลายผิวที่ใช้งานจริงทั้งหมด ลายผิวที่ใช้ทดสอบประกอบลายผิวเป็นชุดต่างๆ ดังนี้

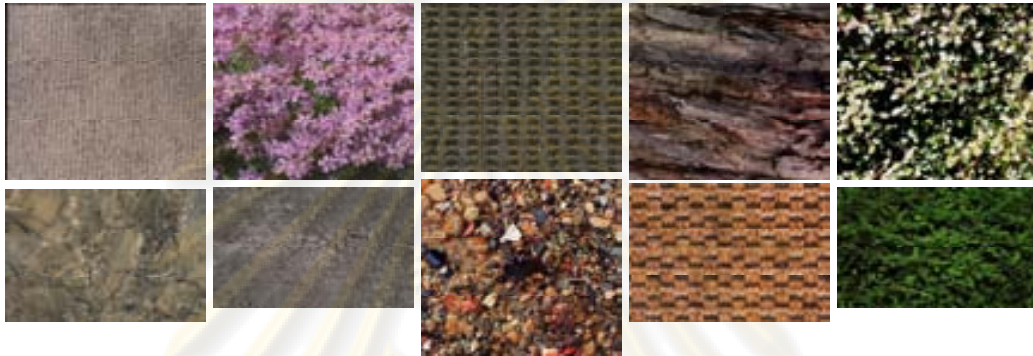
1. ลายผิวแบบสโทแคสติก จำนวน 10 ลาย
2. ลายผิวแบบเนียร์สโทแคสติก จำนวน 10 ลาย
3. ลายผิวแบบมีโครงสร้างสม่ำเสมอ จำนวน 10 ลาย
4. ลายผิวแบบมีโครงสร้างแต่ไม่สม่ำเสมอ 15 ลาย

ในการทดสอบคุณภาพของการสังเคราะห์นั้น มีวิธีการทดสอบไม่มากนัก เนื่องจากเป้าหมายของการสังเคราะห์หลายผิวคือผลลัพท์มีลักษณะของลายคล้ายกับลายต้นฉบับ ดังนั้นการทดสอบโดยการเปรียบเทียบค่าสีโดยตรงจึงเป็นไปได้ เนื่องจากค่าสีของจุดภาพในบริเวณใดๆ อาจจะไม่สามารถค้นหาจุดภาพที่เหมือนกันกับต้นฉบับได้เลย

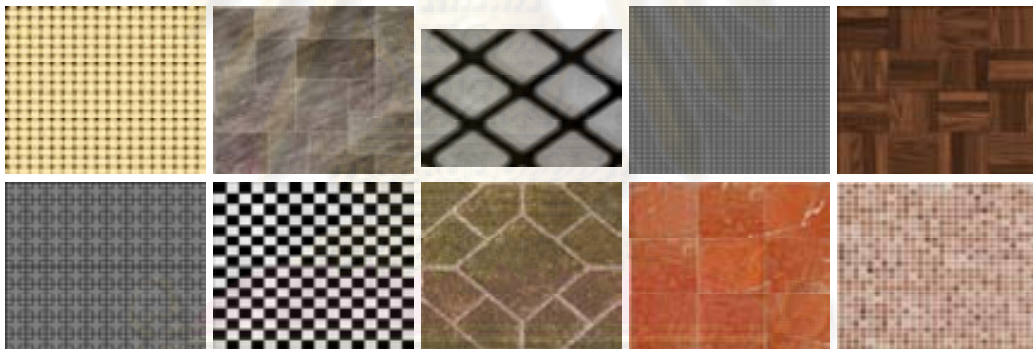
ลายผิวแบบสโทแคสติก



ลายผิวแบบเนียร์สโทแคสติก



ลายผิวแบบมีโครงสร้างสม่ำเสมอ



ลายผิวแบบมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 5.1 ภาพลายผิวที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ผล

วิธีการทดสอบอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ก็คือการทดสอบด้วยค่าพลังงานของเพื่อนบ้าน โดยการคำนวณพลังงานของความแตกต่างระหว่างเพื่อนบ้านของจุดภาพในผลลัพธ์ กับจุดภาพต้นฉบับที่มีเพื่อนบ้านใกล้เคียงกันมากที่สุด ค่าพลังงานนี้ชี้วัดว่ารายละเอียดปลีกย่อยมีความสมบูรณ์หรือไม่ แต่อย่างไรก็ตามการวัดด้วยสมการนี้ ไม่ครอบคลุมรายละเอียดที่ใหญ่กว่าค่าขนาดของเพื่อนบ้าน และเนื่องจากการทดสอบนี้ ต้องอาศัยการคำนวณปริมาณมาก จึงทำให้ไม่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้

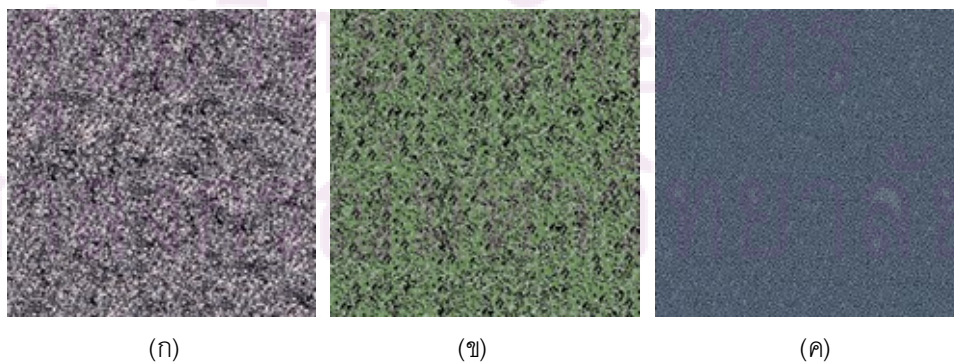
การทดสอบอีกรูปแบบหนึ่งที่ได้คือการทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันทางสถิติ เช่น การวัดการกระจายตัวของค่าสีในรูปต้นฉบับ และรูปผลลัพธ์ ซึ่งโดยรวมแล้วควรไม่แตกต่างกันมากจนเกินไป หรือการวัดความเหมือนกันในโดเมนความถี่เป็นต้น

สำหรับการทดสอบเชิงคุณภาพในงานวิจัยนี้จะเน้นการทดสอบในเชิงปฏิบัติมากกว่าการทดสอบด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากยังไม่มีฟังก์ชันตัวใดที่ประเมินคุณภาพของผลลัพธ์ได้ทุกมุมมอง ฉะนั้นการประเมินผลการสังเคราะห์นั้น ควรให้มนุษย์เป็นผู้ตัดสินใจจากคุณภาพของผลลัพธ์มากกว่า

ผลของการทดสอบจะแบ่งตามลักษณะของลายผิวที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีดังนี้

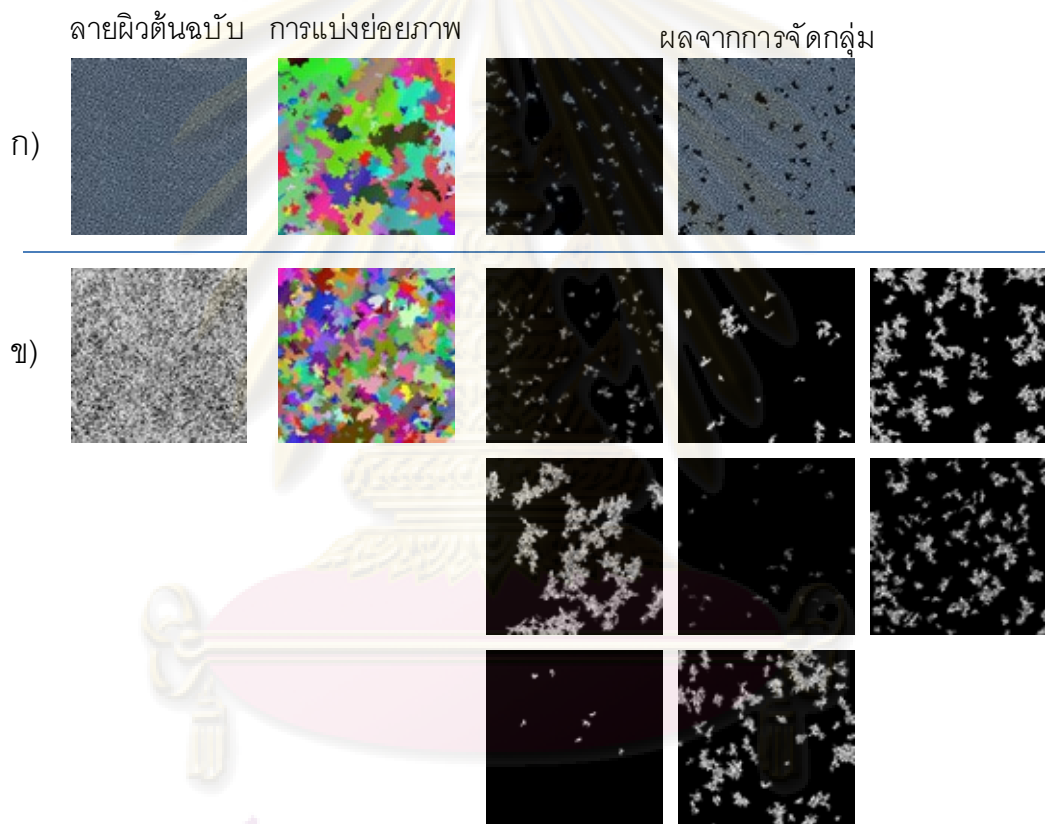
### 5.1.1 ลายผิวแบบสโทแคสติก

ลายผิวแบบสโทแคสติกเป็นลายผิวที่มีลายแบบสุ่ม และไม่มีระเบียบที่แน่ชัด แม้ว่าจะทำการแปะแผ่นลายผิวซ้อนลงไปบนผลลัพธ์โดยไม่ได้ซ่อมขอบเลย ผลลัพธ์ก็ยังไม่เกิดขอบที่ชัดเจนจนสังเกตเห็นได้ในระยะไกล ฉะนั้นลายผิวแบบนี้ จึงไม่พบปัญหาใดๆ ในการทดสอบตัวอย่างผลลัพธ์แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.2 ซึ่งจะเห็นว่าผลลัพธ์มีการสุ่มพอสมควร และไม่ปรากฏขอบของแผ่น หรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสังเคราะห์ลายผิวแบบสโทแคสติก

อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะใช้ได้ แต่อยู่ในกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งต้องผ่านการแบ่งย่อยรูปภาพ ลายผิวแบบสโตแคสติกน่าจะพบปัญหาเนื่องจากไม่สามารถแบ่งภาพออกเป็นส่วนๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลักษณะของลายผิวที่มีค่าสีแตกต่างกันอยู่ ผลจากการแบ่งย่อยจึงจัดกลุ่มค่าสีที่แตกต่างเหล่านี้ เข้าด้วยกันเป็นกลุ่ม จากรูปต้นฉบับทั้งสี่รูป พบว่า ผลจากการแบ่งย่อยมีความเหมาะสมกับกระบวนการวิเคราะห์ เมื่อผ่านการจัดกลุ่มจะได้ลายผิวที่จัดกลุ่มได้น้อยที่สุดคือสองกลุ่มในรูปที่ 5.3 ก. จนถึงแปดกลุ่มดังรูปที่ 5.3 ข. เมื่อนำมาวิเคราะห์หาขนาดแผ่นที่เหมาะสม โปรแกรมก็เลือกกลุ่มแรกในรูป 5.3 ก. และเลือกกลุ่มที่สามในรูป 5.3 ข ซึ่งถือว่าเป็นกลุ่มที่มีการกระจายตัวเป็นระเบียบที่สุด



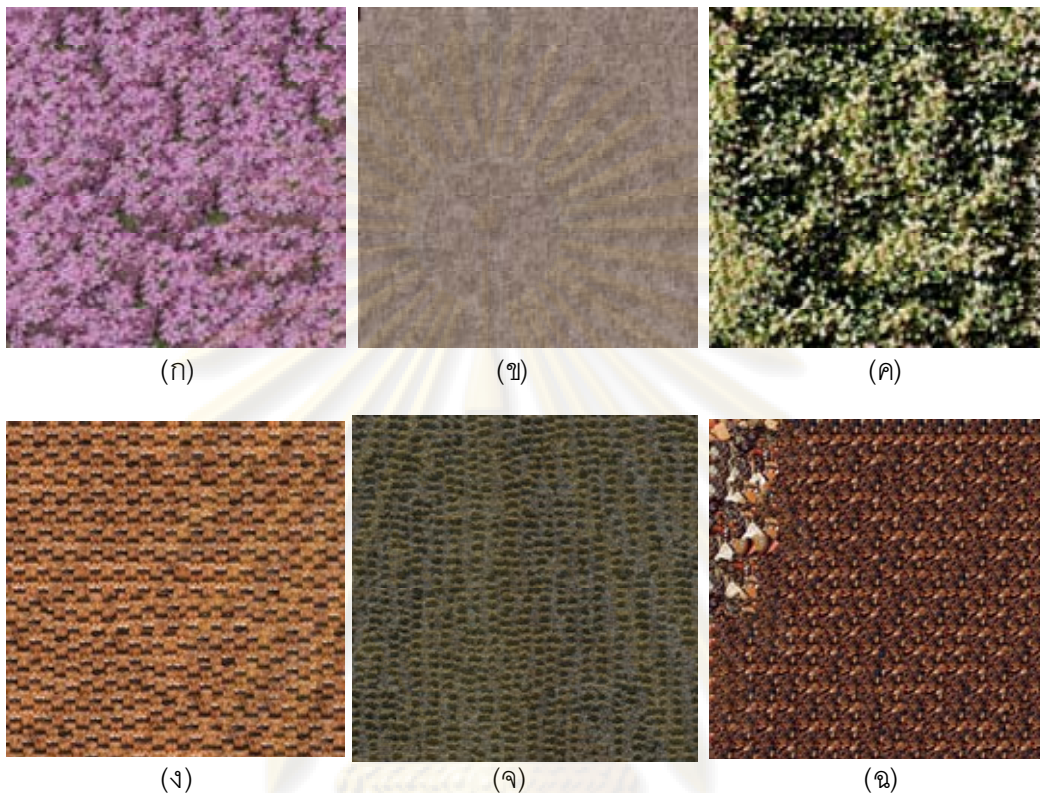
รูปที่ 5.3 ผลจากการแบ่งย่อยภาพ และการจัดกลุ่มของลายผิวสโตแคสติก

### 5.1.2 ลายผิวแบบเนียร์สโตแคสติก

ลายผิวแบบเนียร์สโตแคสติกมีลักษณะค่อนข้างสุ่ม แต่ก็มีความแตกต่างกันระหว่างพื้นที่ผิวบางส่วนของภาพบ้าง ความแตกต่างนี้ ทำให้ในการสังเคราะห์ต้องระวังในเรื่องของการไม่ต่อเนื่องของลายในส่วนนี้ ด้วย



สำหรับการสังเคราะห์ผิวด้วยวิธีที่นำเสนอ ส่วนของความแตกต่างนี้ น่าจะถูกจัดการด้วยขนาดแผ่น และกระบวนการเลือกแผ่นที่เหมาะสม ซึ่งถ้าขนาดแผ่นถูกเลือกอย่างถูกต้องแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้ก็ควรจะถูกต้องเช่นกันซึ่งผลลัพธ์จากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์หลายผิวแบบเนียร์สโทแคสติก

อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองนั้นพบว่ามัลติสกายหนึ่งสกายที่แสดงความผิดพลาดออกมาชัดเจน ในรูป 5.4 ฉ. ซึ่งจะสังเกตเห็นการซ้ำกันของสกายเกิดขึ้น ปัญหานี้ เกิดขึ้นเนื่องจากสกายต้นฉบับมีความแตกต่างกันของสกายสูง จากรูป 5.5 จะเห็นว่าที่ด้านบนซ้ายขนาดของสกายจะใหญ่กว่ามุมล่างขวานอกจากนี้ สกายด้านมุมขวาล่างมีลักษณะเป็นแท่งไม้ ซึ่งไม่มีในจุดอื่นๆ ของภาพ ดังนั้นเมื่อทำการสังเคราะห์มาถึงสกายด้านล่างขวาแล้ว ต้องหาสกายมาปะต่อไป โปรแกรมก็จะโดนจำกัดให้เลือกเฉพาะสกายด้านล่างขวามาเท่านั้น เนื่องจากเป็นแผ่นที่เหมาะสมที่สุด จึงทำให้เกิดการซ้ำกันของสกายจนเต็มภาพ

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้เป็นข้อจำกัดของระเบียบวิธีที่นำเสนอ เนื่องจากการกรองภาพโดยใช้โครงสร้างต้นไม้จะคืนผลลัพธ์แต่ภาพโครงสร้างตรงกับบริเวณพื้นที่ซ้อนทับเท่านั้น ดังนั้นสกายในจุดอื่นๆ จึงไม่มีโอกาสได้รับการทดสอบ ส่งผลให้พื้นที่ของสกายต้นฉบับที่ได้รับการ

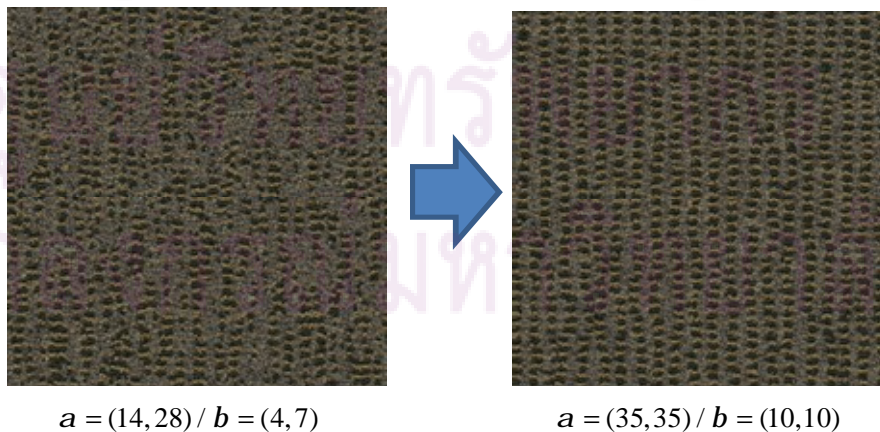
ทดสอบมีเฉพาะในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งเท่านั้น และถ้าไม่มีบริเวณอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับบริเวณนั้น ภาพจากบริเวณนั้นก็จะถูกเลือกซ้ำๆ กัน และไม่มีทางเลือกแผ่นในบริเวณอื่นได้อีกเลย



รูปที่ 5.5 ภาพลายผิวต้นฉบับที่มีความแตกต่างกันของลาย ทำให้ผลลัพธ์ผิดพลาด

ความผิดพลาดอีกจุดหนึ่งคือการเรียงตัวของลาย ในรูปที่ 5.4 จ. จะเห็นว่าเมื่อดูภาพรวมแล้ว การเรียงตัวของลายสูญเสียไปจากลายผิวต้นฉบับ ทั้งนี้ เนื่องจากการพิจารณาเชกเมนต์จะพิจารณาจากส่วนย่อยที่สุดของภาพ ทำให้ขนาดของแผ่นภาพที่ได้จะมีขนาดเพียงพอที่จะทำให้เชกเมนต์เรียงตัวกันได้ แต่เนื่องจากเชกเมนต์เหล่านี้ มีจำนวนมาก และแต่ละส่วนก็มีความแตกต่างกันอยู่ เมื่อนำมาประกอบกันด้วยจำนวนมาก ความแตกต่างที่เล็กน้อยก็รวมตัวกัน ทำให้ลายเกิดการเบี่ยงไปจากที่ควรจะเป็น ซึ่งปัญหานี้ สามารถแก้ไขโดยการใช้ค่าขนาดแผ่นที่เหมาะสมจากกลุ่มที่มีคะแนนเป็นอันดับถัดไป และมีขนาดของแผ่นมากกว่าปัจจุบัน

เมื่อทำการแก้ไขโดยปรับขนาดแผ่นลายผิวให้มีขนาดใหญ่ขึ้น นเล็กน้อย ในรูปที่ 5.6 ก็พบว่าปัญหาทั้งหมดก็หายไป



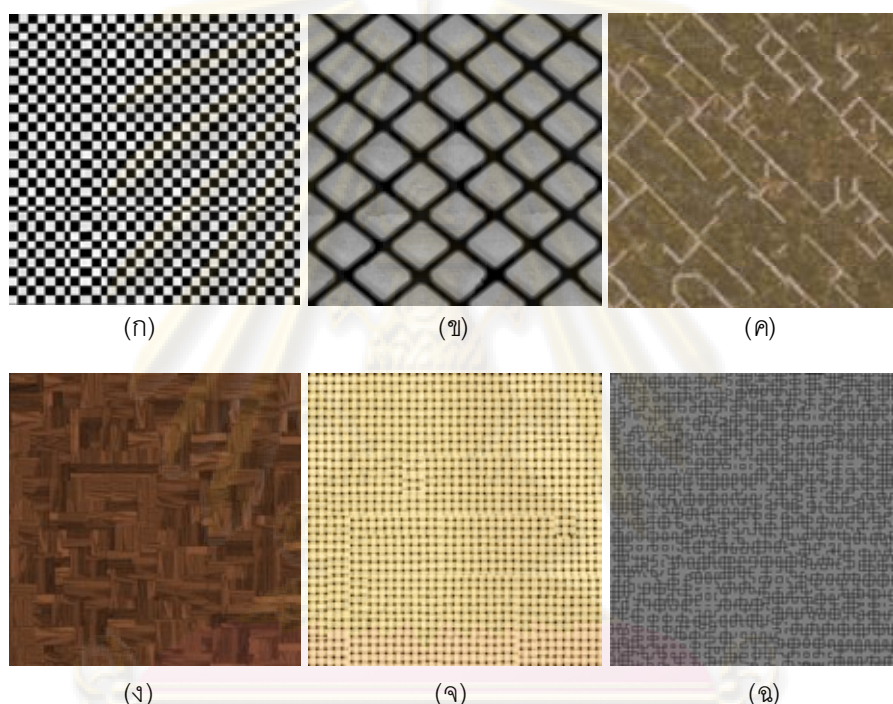
$$a = (14, 28) / b = (4, 7)$$

$$a = (35, 35) / b = (10, 10)$$

รูปที่ 5.6 ผลจากผลลัพธ์จากการสังเคราะห์เมื่อทำการแก้ไขขนาดของแผ่นให้ใหญ่ขึ้น นเล็กน้อย

### 5.1.3 ลายผิวแบบมีโครงสร้างสม่ำเสมอ

ลายผิวแบบมีโครงสร้างสม่ำเสมอ แม้ว่าจะสามารถวางเรียงกันได้โดยไม่เห็นรอยต่อ แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ลายผิวซึ่งใช้กระบวนการต่างๆ เข้ามาช่วยค่อนข้างมาก และตัวระเบียบวิธีไม่มีความรู้ว่ลายผิวแต่ละชนิดมีลักษณะเป็นอย่างไร ในกระบวนการจึงทำงานตามปกติ จึงทำให้ผลที่ได้อาจเกิดจุดผิดพลาดขึ้นได้ เช่น เกิดความไม่ต่อเนื่องของลาย เนื่องจากแผ่นที่เลือกมาเติมไม่สามารถประสานรอยต่อบริเวณพื้นที่ที่ซ้อนทับได้ เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีที่น่าเสนอ แสดงไว้ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์ลายผิวแบบสม่ำเสมอ

ในวิธีการที่น่าเสนอก็ค้ประสบปัญหาเกี่ยวกับลายผิวสม่ำเสมอเช่นกัน สาเหตุของข้อผิดพลาดเกิดจากการประมาณขนาดของแผ่น และขนาดของพื้นที่ซ้อนทับที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากลักษณะของลายผิวแบบสม่ำเสมอมีหลายรูปแบบ เช่น มีลักษณะของการซ้ำกันของลายเล็กๆ เช่นรูป 5.7ก,จ,ฉ. ลายผิวลักษณะนี้ มักจะเกิดปัญหาเนื่องจากประมาณค่าขนาดของแผ่นน้อยเกินไป ทำให้เกิดความผิดพลาดสะสมขึ้น และเมื่อสังเคราะห์ไปหลายแผ่น ความผิดพลาดที่สะสมไว้ก็สูงขึ้นจนสามารถสังเกตเห็นได้ ค่าของขนาดแผ่นที่ถูกต้องควรจะประมาณให้มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับขนาดของแผ่นต้นฉบับ แล้วกำหนดพื้นที่ซ้อนทับให้เท่ากับขนาดของลายย่อยๆ ภายใน จึงจะได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

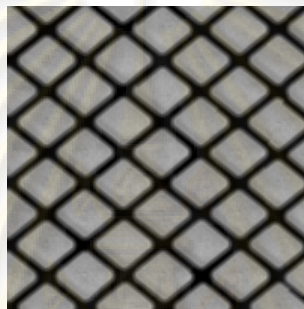
สำหรับรูป 5.7ข,ค,ง. เป็นลายที่ประกอบด้วยลายขนาดใหญ่ เช่นเดียวกัน เนื่องจากขนาดของแผ่นที่คิดได้มีขนาดเล็กเกินไป จึงเกิดข้อบกพร่องขึ้นในบางแผ่น ซึ่งขนาดของแผ่นที่ดีที่สุดควรจะใกล้เคียงกับขนาดของลายผิวต้นฉบับ เช่นเดียวกัน

สำหรับลายผิวประเภทนี้ กระบวนการคัดเลือกแผ่น และการแปะนี้ สามารถทำได้อย่างถูกต้อง ถ้าเลือกค่าขนาดของแผ่นที่เหมาะสม ผลลัพธ์ภายหลังจากการแก้ไขขนาดของแผ่นและพื้นที่ซ้อนทับแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ขนาดลายแผ่นที่เหมาะสม ลายผิวผลลัพธ์ก็จะถูกต้องทั้งหมด



$$a = (150, 150), b = (30, 30)$$

(ก)



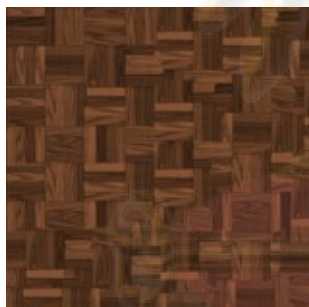
$$a = (150, 150), b = (50, 40)$$

(ข)



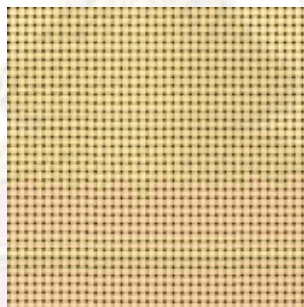
$$a = (200, 200), b = (100, 100)$$

(ค)



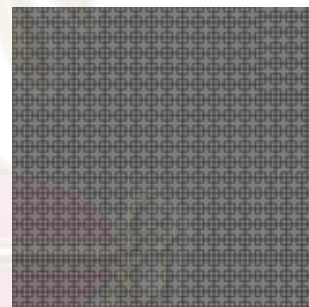
$$a = (150, 150), b = (40, 40)$$

(ง)



$$a = (150, 150), b = (30, 30)$$

(จ)



$$a = (150, 150), b = (18, 18)$$

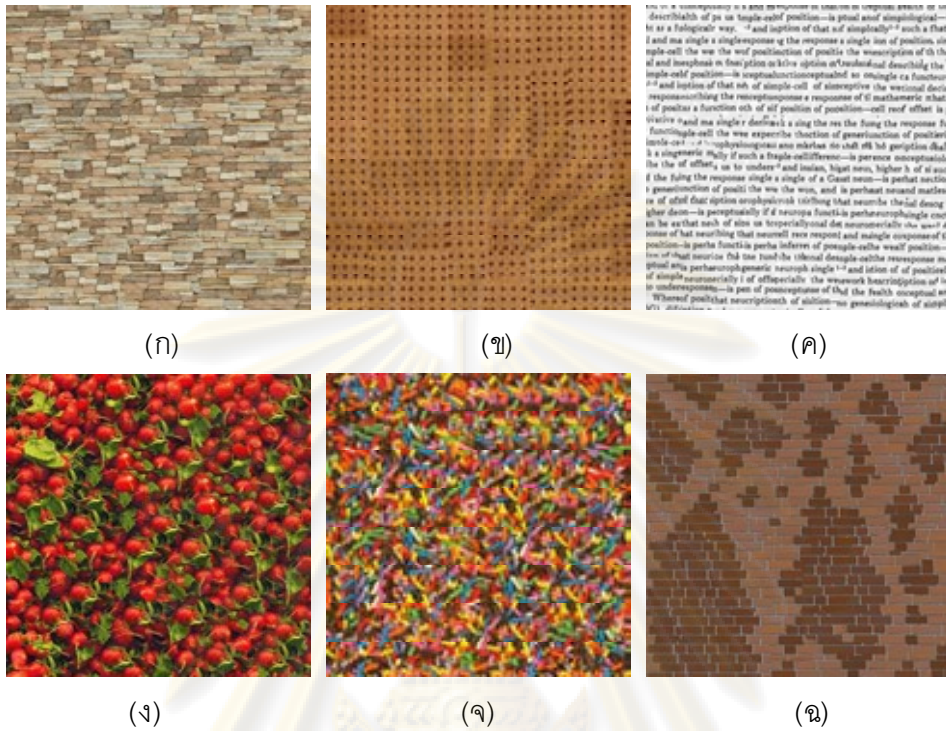
(ฉ)

รูปที่ 5.8 ผลจากผลลัพธ์จากการสังเคราะห์ลายผิวแบบสม่ำเสมอที่ใช้ค่าขนาดของแผ่นถูกต้อง

#### 5.1.4 ลายผิวแบบมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ

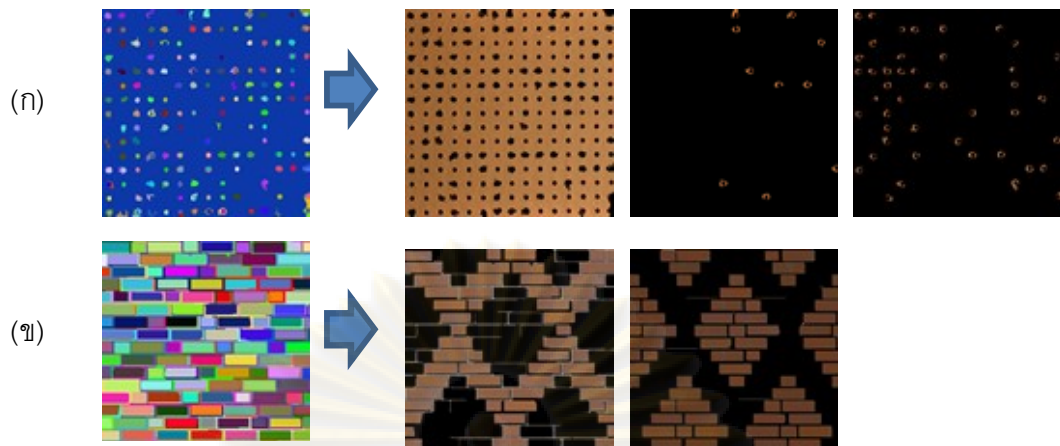
ลายผิวที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอเป็นลายผิวที่พบได้มากที่สุด ลักษณะของลายผิวแบบมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ จะมีลักษณะที่ตัวลายมีความแตกต่างของพื้นผิว แต่ไม่มีการซ้ำกันที่แน่นอนเหมือนแบบที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอ การสังเคราะห์ลายผิวแบบนี้ ไม่สามารถนำมาเรียงต่อกันได้โดยตรง ดังนั้น ขนาดของลายแผ่นที่ถูกต้อง การเลือกลายแผ่นที่มาแปะ และการซ้อนแซมพื้นที่ทับซ้อนจึงมีความสำคัญกับลายผิวประเภทนี้

จากผลการทดลองพบว่าระเบียบวิธีที่นำเสนอสามารถใช้งานกับลายผิวประเภทนี้  
ได้เพียงบางรูปเท่านั้น ดังตัวอย่างผลลัพธ์ในรูปที่ 5.9



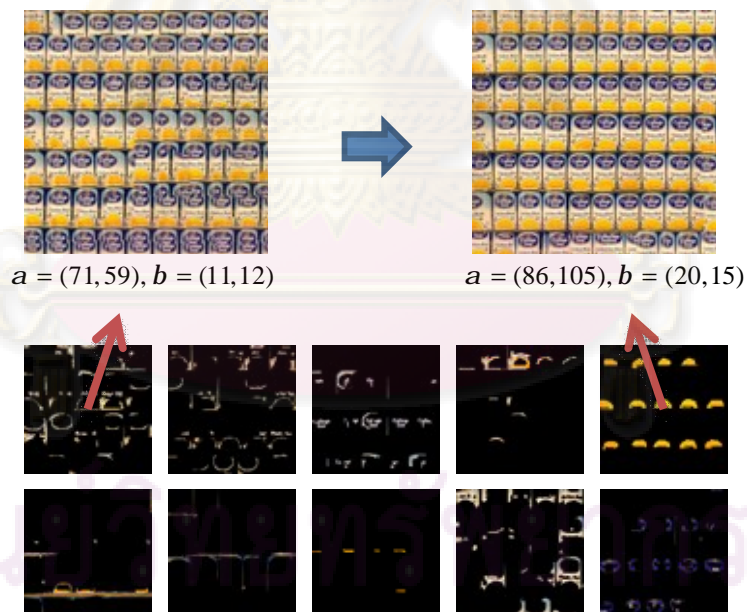
รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์ลายผิวแบบไม่สม่ำเสมอ

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 5.9 ลายผิว ก,ค,จ. มีคุณภาพที่ยอมรับได้ สำหรับรูปอื่นๆ ก็มีข้อบกพร่องแตกต่างกันไป ในรูป 5.9 ข. เกิดความผิดพลาดเนื่องจากลายผิวมีผลกระทบของแสงและเงาทำให้บริเวณพื้น หลังมีสีแตกต่างกัน แต่เมื่อทำการจัดกลุ่มแล้วลายผิวพื้น หลังกลับอยู่กลุ่มเดียวกันทั้งหมด ดังรูป 5.10 ก. ดังนั้น เมื่อทำการค้นหาแผนที่ที่เหมาะสม จึงเกิดรอยต่อระหว่างพื้น หลังที่เป็นคนลงสี ซึ่งปัญหาเรื่องของแสงและเงายังเป็นข้อจำกัดของวิธีที่นำเสนอ สำหรับรูป 5.9 ฉ. จะเห็นได้ว่าลายผลลัพธ์มีการสูญเสียลักษณะของการจัดเรียงตัวไป สาเหตุนี้ เกิดจากการเลือกขนาดของแผนที่ที่ไม่เหมาะสม เมื่อพิจารณาผลจากการจัดกลุ่มแล้วจะพบว่าการจัดกลุ่มทำได้ถูกต้อง ดังรูป 5.10 ข. แต่การแบ่งรายละเอียดที่ย่อยจนเกินไปคือแบ่งเป็นอิฐแต่ละก้อน ทำให้ขนาดของแผนที่เล็กเพียงแค่อิฐเท่านั้น เมื่อเจอลายประเภทนี้ ผู้ใช้จะต้องปรับแต่งค่าขนาดของแผนที่เอง ให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะครอบคลุมลักษณะของการเรียงตัวของอิฐได้



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการจับกลุ่มของลายผิวต้นฉบับบางลาย

เมื่อทำการสังเคราะห์โดยให้โปรแกรมค้นหาขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสมด้วยตนเองก็พบว่าในบางลายโปรแกรมเลือกลายผิวโดดเด่นผิดพลาด ทำให้ลายผิวผลลัพธ์มีคุณภาพที่ไม่ดีเท่าที่ควร แต่เมื่อทำการเลือกกลุ่มโดดเด่นด้วยตนเอง พบว่าคุณภาพของผลลัพธ์มีมากขึ้น จนมีความถูกต้องในจุดที่ยอมรับได้ ดังรูปที่ 5.11 รูปทางด้านซ้ายใช้กลุ่มโดดเด่นที่เลือกจากฟังก์ชันพลังงานที่เสนอ รูปทางด้านขวาใช้กลุ่มโดดเด่นที่ผู้ใช้กำหนดด้วยตนเอง



รูปที่ 5.11 การสังเคราะห์ลายผิว โดยการเลือกกลุ่มโดดเด่นด้วยตนเอง  
เปรียบเทียบกับทางเลือกโดยอัตโนมัติ

ฟังก์ชันพลังงานที่เสนอ รูปทางด้านขวาใช้กลุ่มโดดเด่นที่ผู้ใช้กำหนดด้วยตนเอง

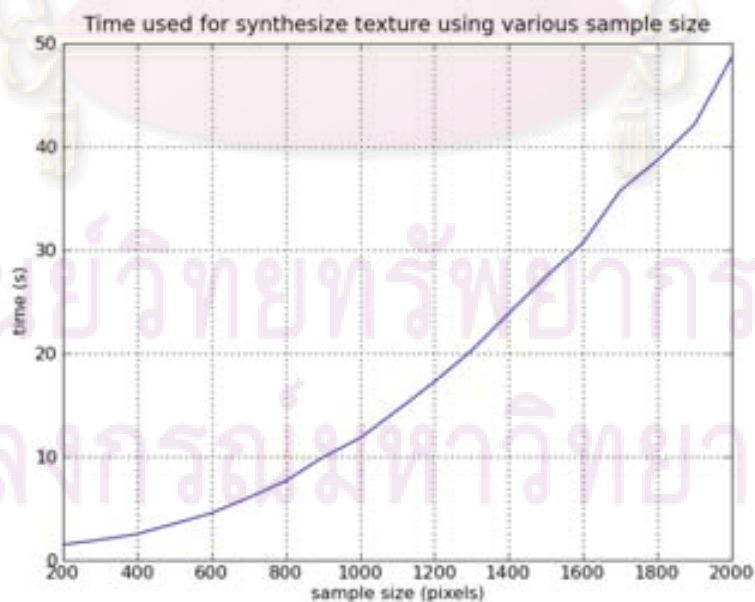
## 5.2 การทดลองเกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาของวิธีที่นำเสนอ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่เสนอจะแบ่งการทดสอบออกเป็น ส่วนๆ โดยจะเริ่มจากการทดสอบประสิทธิภาพโดยการทดสอบกับโปรแกรมจริง โดยใช้ลายผิว ขนาดต่างๆ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาโดยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีที่ใช้

### 5.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพโดยการทดสอบกับโปรแกรมจริง

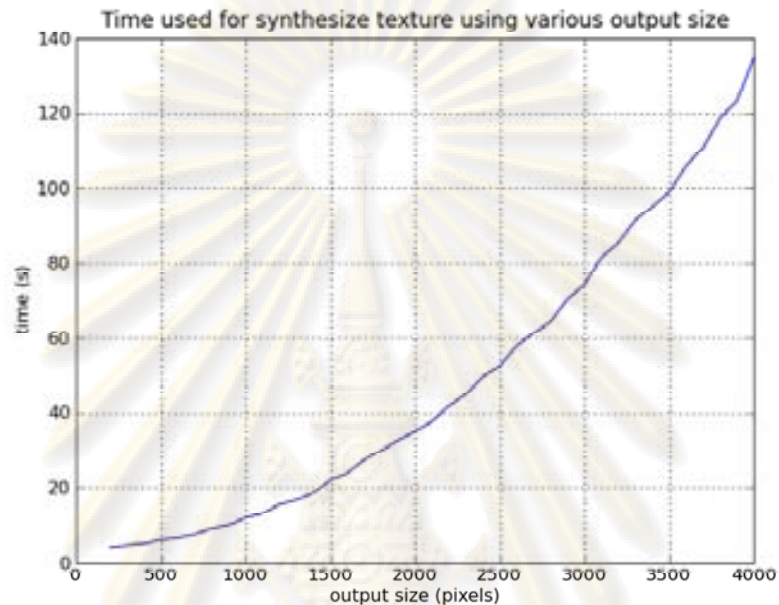
จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอ จำทำการวิเคราะห์ความเร็วในการสังเคราะห์โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวแปร 3 ตัว คือ ขนาดของลายต้นแบบ ขนาดของผลลัพธ์ และจำนวนกลุ่ม ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อความเร็วในการสังเคราะห์ลายผิว

ถ้ากำหนดขนาดของแผ่น และขนาดของผลลัพธ์ที่คงที่ กำหนดขนาดของแผ่นที่ 80 จุดภาพ และขนาดของพื้นที่ซ้อนทับ 10 จุดภาพ แล้วเปลี่ยนเพียงขนาดของลายผิวด้านฉบับ จะได้เวลาในการทำงานเป็นดังรูปที่ 5.12 เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดสอบแผ่นคงที่ ฉะนั้น เวลาที่ใช้ จึงขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ค้นหาแผ่นที่เหมาะสมในโครงสร้างต้นไม้เท่านั้น ซึ่งความเร็วในการสังเคราะห์ก็จะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้สร้างต้นไม้ และเวลาที่ใช้ค้นหาข้อมูลในโครงสร้างต้นไม้เท่านั้น ซึ่งจากกราฟก็แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับจำนวนจุดภาพต้นฉบับในสเกลลอการิทึม(ในกราฟเส้นแกนนอนแสดงขนาดของลายผิวซึ่งเป็นความยาวเพียงด้านเดียว จำนวนจุดภาพที่แท้จริง ต้องคำนวณโดยการนำค่านี้ ยกกำลังสอง)



รูปที่ 5.12 เวลาที่ใช้สังเคราะห์ลายผิวเมื่อใช้ลายผิวด้านฉบับขนาดต่างๆ

ถ้ากำหนดขนาดของลายผิวต้นฉบับคงที่คือ 512x512 จุดภาพ แล้วเปลี่ยนแปลงขนาดของผลลัพธ์ โดยใช้การกำหนดค่าต่างๆ ที่คงที่เหมือนกับการทดลองที่แล้ว จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ประมวลผลขึ้นอยู่กับจำนวนจุดภาพในภาพผลลัพธ์ในสเกลลอการิทึม

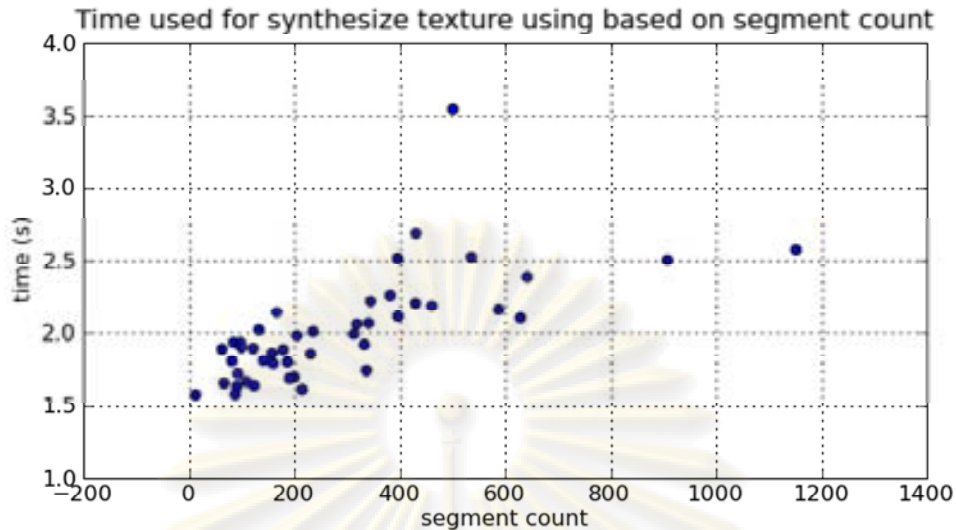


รูปที่ 5.13 เวลาที่ใช้สังเคราะห์ลายผิวกำหนดขนาดของผลลัพธ์เป็นขนาดต่างๆ

ถ้ากำหนดขนาดของลายผิวต้นฉบับคงที่ที่ 256x256 จุดภาพ และขนาดของลายผิวผลลัพธ์ที่ 512x512 จุดภาพ และกำหนดค่าขนาดของขนาดแผ่นภาพและพื้นที่ซ้อนทับเป็นค่าคงที่ที่ 80 และ 10 จุดภาพ ตามลำดับ เนื่องจากต้องทำการวิเคราะห์ภาพก่อนว่าจะมีจำนวนเซกเมนต์เป็นเท่าใด ในการทดลองนี้ จึงใช้ลายผิวต้นแบบเป็นลายผิวที่กำหนดไว้จำนวน 45 ลายผิว เมื่อทำการทดสอบจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นดังรูปที่ 5.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 5.14 เวลาที่ใช้สังเคราะห์หลายผิวเมื่อหลายผิวด้านฉบับมีเซกเมนต์เป็นจำนวนต่างๆ

## 5.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาโดยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีที่ใช้

ในด้านประสิทธิภาพการทำงานของระเบียบวิธีที่น่าเสนอ ถ้าทำการวิเคราะห์อย่างละเอียด จะสามารถแยกออกเป็นประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการแบ่งย่อยรูปภาพด้วยวิธีการตัดกราฟ มีประสิทธิภาพเชิงเวลาเท่ากับ  $O(n \log n)$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพต้นฉบับ
2. ขั้นตอนการจัดกลุ่มเซกเมนต์ของภาพ มีประสิทธิภาพเชิงเวลาเท่ากับ  $O(k^2)$  เมื่อ  $k$  เป็นจำนวนเซกเมนต์ที่มีในภาพ ซึ่งคำนวณจากการไล่จัดเซกเมนต์จำนวน  $k$  ชั้นเข้าไปในกลุ่ม แต่การจัดนั้นอาจต้องจัดหลายรอบจนกว่าจะได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งสามารถวนรอบได้มากที่สุด  $(k-1)$  ครั้ง
3. ขั้นตอนการวิเคราะห์หาขนาดของแผ่น และพื้นที่ชั้นที่ชั้นทับที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพเชิงเวลาเท่ากับ  $O(k^2)$  ซึ่งมาจากการที่ระบบต้องหาระยะห่างระหว่างเซกเมนต์ภาพทุกคู่เพื่อนำมาใช้ในการจัดกลุ่ม
4. ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างต้นไม้ มีประสิทธิภาพเชิงเวลาเท่ากับ  $O(n \log n)$  ซึ่งเกิดจากการจัดกลุ่มจำนวน  $n$  จุดภาพ เข้าไปในโครงสร้างต้นไม้ซึ่งมีความลึกทั้งหมด  $\log_2 n$
5. ขั้นตอนการเลือกแผ่นที่เหมาะสมจากโครงสร้างต้นไม้ และการทดสอบเพื่อเลือกแผ่นที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพเชิงเวลารวมการทดสอบทุกแผ่นเท่ากับ  $O(m \log n)$  เมื่อ  $m$  คือ

จำนวนจุดภาพในภาพผลลัพธ์ซึ่งเกิดจากการที่ต้องค้นหาแผ่นที่ถูกต้องจำนวน  $m$  ครั้งและในแต่ละครั้งก็ทำการค้นหาในโครงสร้างต้นไม้ซึ่งมีความลึก  $\log_2 n$

เมื่อรวมระเบียบวิธีทุกขั้นตอนนี้ตอนเข้าด้วยกันแล้ว จะได้ว่าระเบียบวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพเชิงเวลาเท่ากับ  $O(2n \log n + 2k^2 + m \log n) = O((n+m) \log n + k^2)$  เมื่อกำหนดให้  $n$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพต้นฉบับ  $m$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพผลลัพธ์ และ  $k$  เป็นจำนวนเซกเมนต์ของภาพจากกระบวนการแบ่งย่อยภาพ

### 5.3 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของระเบียบวิธีที่ใช้

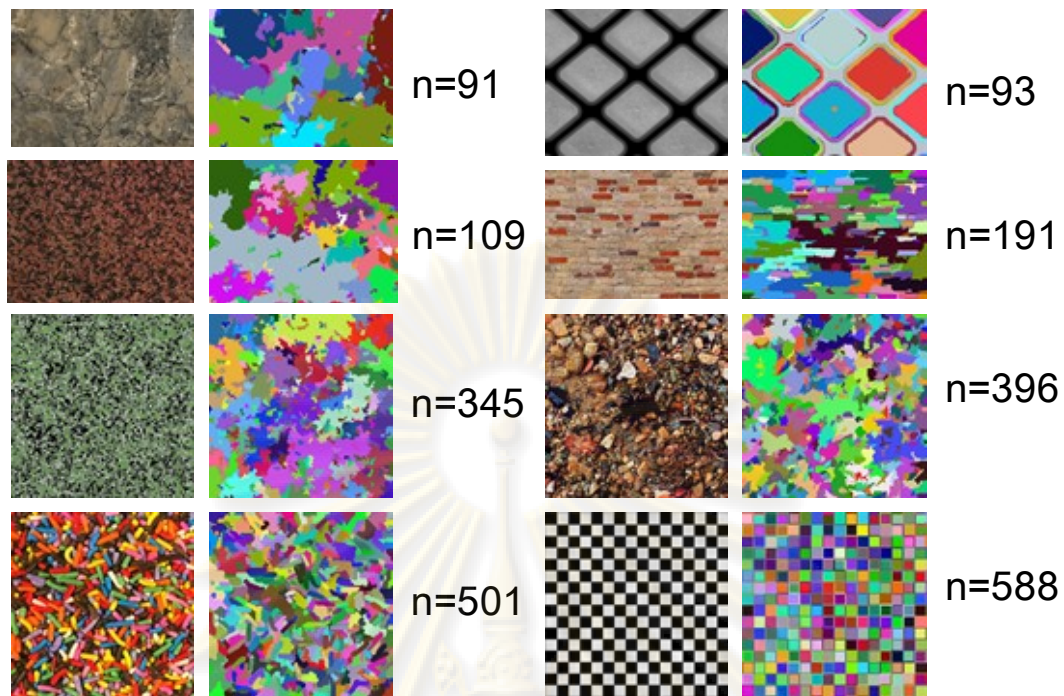
ในหัวข้อนี้ จะทำการทดสอบกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ลายผิวว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นส่วนๆ คือ การทดสอบระเบียบวิธีการแบ่งย่อยภาพ การทดสอบโครงสร้างต้นไม้และการค้นหาตัวอย่างลายผิว และการทดสอบวิธีการทดสอบความเหมาะสมของลายผิว

#### 5.3.1 การทดสอบระเบียบวิธีการแบ่งย่อยภาพ

ขั้นตอนการแบ่งย่อยภาพมีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ทำการสกัดเอาลักษณะของภาพมาใช้เป็นข้อมูลในกระบวนการถัดไปทั้งหมด การแบ่งย่อยภาพจะต้องสามารถแยกแยะรายละเอียดภายในภาพออกมาให้ได้ และต้องสามารถแบ่งประเภทของลายย่อยๆ ภาพในภาพได้ นอกจากนี้ ยังต้องมีความเร็วในการทำงานสูง เนื่องจากขนาดของลายผิวมีขนาดใหญ่

จากการทดลองพบว่าการแบ่งย่อยรูปภาพโดยใช้การตัดแบ่งกราฟมีความเหมาะสม แม้ว่าการแบ่งย่อยด้วยวิธีนี้ จะพิจารณาเพียงค่าสีเท่านั้น ซึ่งต่างจากรูปที่มีความซับซ้อนมากกว่าซึ่งเอาลักษณะของลายผิวมาใช้ เนื่องจากความต้องการของงานนี้ คือต้องการแยกรายละเอียดย่อยๆ ภายในลายผิวออกมา ดังนั้นการใช้เพียงค่าสีอย่างเดียวก็น่าจะเพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งจากรูปที่ 5.15 ก็ได้แสดงให้เห็นว่าถ้ารายละเอียดของลายผิวมาก จำนวนของเซกเมนต์ก็มากขึ้นด้วย

ข้อเด่นอีกข้อของกระบวนการนี้ ก็คือความสามารถในการกำหนดความละเอียดในการแบ่งย่อยได้ โดยไม่ขึ้นกับค่าสี แม้ว่าค่าสีจะแตกต่างกันน้อยมากในรูป แต่ระเบียบวิธีนี้ก็สามารถแบ่งย่อยรูปภาพออกมาได้ ซึ่งทำให้การแบ่งย่อยทำงานได้ถูกต้องแม้ว่าจะใช้งานกับลายผิวแบบสโทแคสติก



รูปที่ 5.15 ตัวอย่างลายผิว และจำนวนเซกเมนต์ที่ได้จากการแบ่งย่อยภาพ

### 5.3.2 การทดสอบโครงสร้างต้นไม้และการค้นหาตัวอย่างลายผิว

การทดสอบโครงสร้างต้นไม้จะทำการเลือกลายผิวด้านฉบับชี้ นมาแล้วจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างของต้นไม้ที่สร้าง โดยการสร้างโครงสร้างต้นไม้ตามระเบียบวิธีที่เสนอ โดยใช้ลายผิวที่สอง ของตัวอย่างลายผิวแบบเนียร์สโทแคสติก ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างต้นไม้ได้ผลดังนี้

มิติของข้อมูล = 528

ใบไม้ที่ไม่มีข้อมูล = 0

จำนวนข้อมูล = 1560

โหนดที่ไม่ใช่ใบไม้ = 535

ขนาดของถัง = 3

ความลึกของต้นไม้ = 10

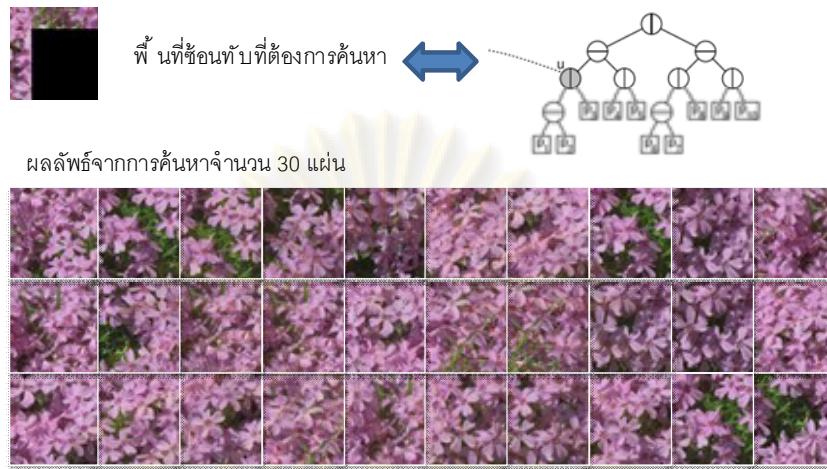
จำนวนใบไม้ = 536

อัตราส่วน = 887.747925

เนื่องจากการแบ่งต้นไม้เป็นแบบการแบ่งที่มีมาตรฐาน ความลึกของต้นไม้จะเท่ากับทุกลายผิวด้านฉบับที่มีความละเอียดเท่ากัน ดังนั้นสิ่งที่แตกต่างกันระหว่างต้นไม้ของแต่ละลายผิวก็คือมิติของข้อมูล ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่น จำนวนกลุ่ม และพื้นที่ซ้อนทับ

การค้นหาลายผิวที่เหมาะสมจะใช้การค้นหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด จากตัวอย่างผลของการค้นหาในรูปที่ 5.16 ซึ่งจะเห็นว่าตรงบริเวณขอบของผลลัพธ์มีความคล้ายกับต้นฉบับ

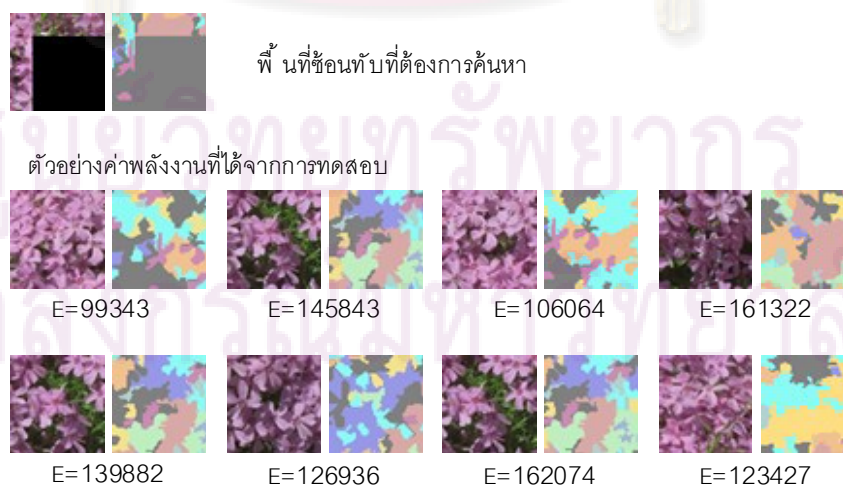
นอกจากนี้ ผลลัพธ์ที่ได้ก็มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นสิ่งที่ดี เนื่องจากทำให้หลายผลลัพธ์ไม่เกิดการซ้ำซ้อนกันของลาย



รูปที่ 5.16 ผลลัพธ์จากการค้นหาแผ่นภาพที่เหมาะสมจากโครงสร้างต้นไม้

### 5.3.3 การทดสอบวิธีการทดสอบความเหมาะสมของลายผิว

เมื่อได้ตัวอย่างแผ่นภาพที่เหมาะสมมากกลุ่มหนึ่งแล้ว ตัวอย่างแผ่นลายผิวจะถูกตรวจสอบทีละแผ่นเพื่อหาตัวอย่างแผ่นที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้ การตรวจสอบจะทำการคำนวณค่าพลังงานความแตกต่างในส่วนซ้อนทับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มตัวแปรที่จะควบคุมพลังงาน นั่นคือตัวแปรค่าหมายเลขกลุ่มด้วย ดังได้แสดงในรูปที่ 5.17 แผ่นที่มีหมายเลขกลุ่มใกล้เคียงกับแผ่นต้นฉบับจะมีโอกาสได้รับเลือก เนื่องจากพลังงานรวมในบริเวณที่มีหมายเลขกลุ่มคล้ายกันจะมีน้อยกว่า ซึ่งในตัวอย่างจะพบว่าแผ่นแรกจะเป็นแผ่นที่ได้รับเลือกไปปะลงในแผ่นผลลัพธ์ต่อไป


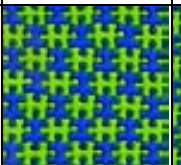
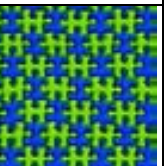
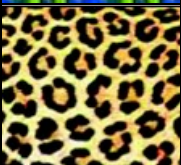


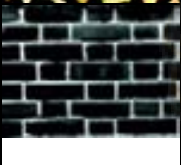
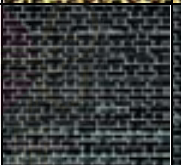
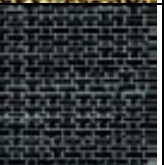


รูปที่ 5.17 ตัวอย่างค่าพลังงานของพื้นที่ซ้อนทับจากการตรวจสอบหาแผ่นที่เหมาะสม

## 5.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับระเบียบการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีอื่น

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ ใช้แนวคิดที่แตกต่างจากวิธีการหาค่าที่ดีที่สุด แนวคิดของงานที่นำเสนอใช้การหาค่าตัวแปรโดยตรงจากข้อมูลเซกเมนต์ของภาพ ดังนั้นถ้าวัดทางด้านประสิทธิภาพทางเวลาแล้ว ระเบียบวิธีที่นำเสนอจะมีความเร็วสูงกว่ามาก เนื่องจากใช้เวลาในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดเพียง  $O(n \log n + k^2)$  เมื่อ  $k$  เป็นจำนวนเซกเมนต์ของภาพ สำหรับระเบียบวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดนี้ มีประสิทธิภาพทางเวลาคือ  $O(n^3)$  ความเร็วในการทำงานจึงแตกต่างกันอย่างมาก ดังตารางที่ 5.1 แม้จะพบว่าคำตอบที่ได้จากวิธีทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้ ก็มีคุณภาพใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.1 ผลลัพธ์จากขั้นตอนการหาขนาดแผ่นและพื้นที่ซ้อนทับที่เหมาะสม

ลายผิว	ขนาด	วิธีที่เสนอ		วิธีของหวัง		ผลของวิธีที่เสนอ	ผลของวิธีของหวัง
		ผลลัพธ์	เวลา	ผลลัพธ์	เวลา		
	161x161	$a = (98, 78)$ $b = (18, 22)$	0.39s	$a = (113, 81)$ $b = (4, 4)$	72s		
	152x136	$a = (37, 35)$ $b = (7, 7)$	0.26s	$a = (48, 42)$ $b = (4, 4)$	61s		
	106x83	$a = (56, 44)$ $b = (12, 4)$	0.17s	$a = (66, 48)$ $b = (20, 8)$	116.5s		

## 5.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ลายผิวด้วยวิธีอื่น

### 5.5.1 การเปรียบเทียบด้านคุณภาพของผลลัพธ์

คุณภาพของผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ มีคุณภาพในระดับเดียวกับงานสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละแผ่นภาพ เนื่องจากมีพื้นฐานการสังเคราะห์คล้ายกัน แตกต่างกันเพียงกระบวนการคัดเลือกแผ่นภาพเพื่อนำไปใช้ปะลงบนลายผลลัพธ์

การเปรียบเทียบผลลัพธ์จะคัดเลือกแสดงลายผิวจากลายผิวทดสอบกลุ่มละ 2 ลาย โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบวิธีที่เสนอกับวิธีการสังเคราะห์ที่ละจุดภาพ และวิธีการ

สังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพ โดยผลการเปรียบเทียบคุณภาพของผลลัพธ์ แสดงได้ในรูปที่ 5.18 และ 5.19 ในการทดลองเพื่อหาความยุติธรรม จะทำการกำหนดค่าขนาดของแผ่นภาพ และพื้นที่ซ้อนทับของวิธีที่เสนอกับวิธีสังเคราะห์ที่ละแผ่นภาพให้เท่ากัน เพื่อใช้เปรียบเทียบเฉพาะกระบวนการสังเคราะห์ลายผิวเท่านั้น (เนื่องจากวิธีที่นำเสนอรวมไปถึงการหาขนาดของแผ่นที่เหมาะสมด้วย ซึ่งอาจมีความผิดพลาดทำให้ผลลัพธ์ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้) ส่วนวิธีการสังเคราะห์ที่ละจุดภาพจะกำหนดค่าขนาดของเพื่อนบ้านที่ 7 จุดภาพ

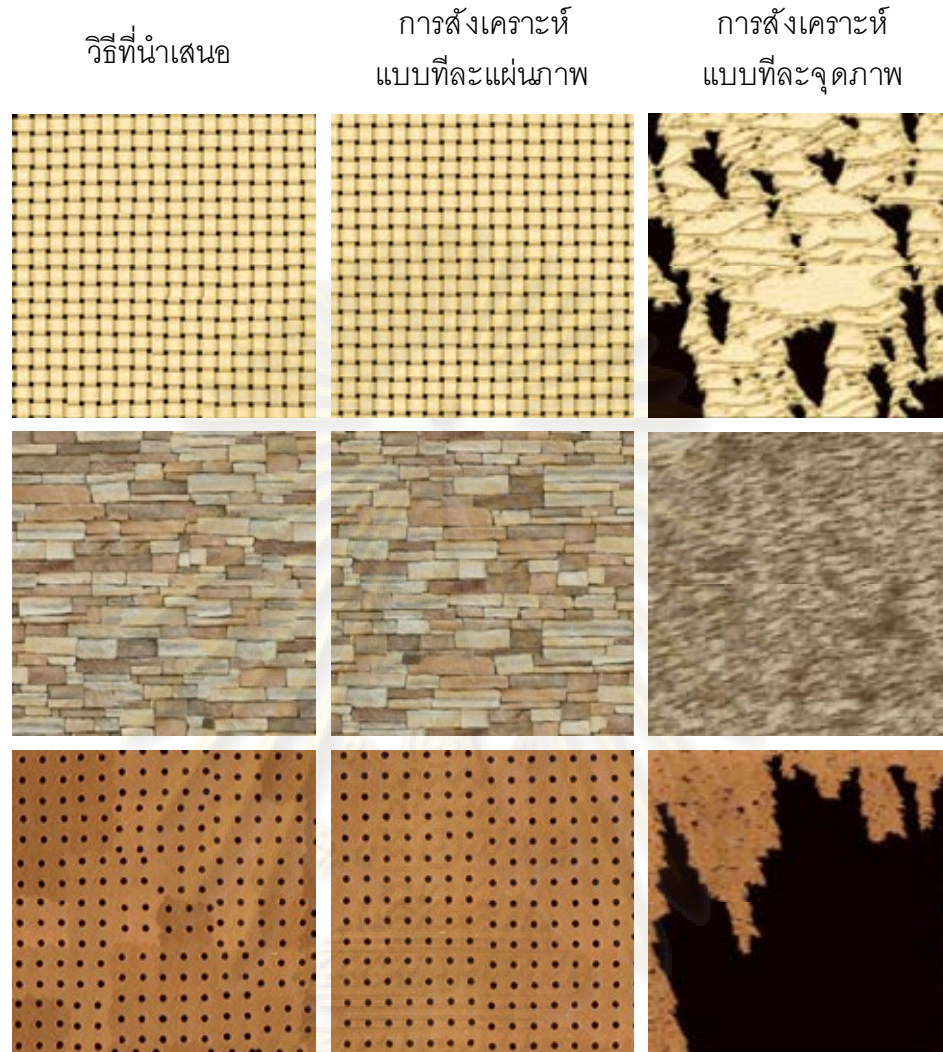
จากรูปที่ 5.18 และ 5.19 การสังเคราะห์ที่ละจุดภาพนั้นสามารถทำงานได้ดีกับลายผิวแบบสโทแคสติกเท่านั้น เมื่อใช้กับลายผิวประเภทอื่นพบว่าผลลัพธ์สูญเสียโครงสร้างไปสาเหตุที่สูญเสียโครงสร้างไปเนื่องจากในการทดลองนี้ เลือกใช้ขนาดของเพื่อนบ้านเพียง 7 จุดภาพเท่านั้น อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถเพิ่มให้ขนาดของเพื่อนบ้านใหญ่กว่านี้ ได้ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการประมวลผลนานมาก ดังได้แสดงในหัวข้อถัดไป

ผลลัพธ์จากระเบียบวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีคุณภาพใกล้เคียงผลลัพธ์จากวิธีการสังเคราะห์แบบทีละแผ่น แม้ว่าในบางตัวอย่างจะมีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากข้อจำกัดของวิธีที่นำเสนอ ซึ่งเกิดจากการเลือกแผ่นโดยดูจากกลุ่มของจุดภาพแทนที่จะวัดจากค่าสีเพียงอย่างเดียว แต่โดยรวมแล้ว วิธีที่เสนอสามารถใช้ทดแทนระเบียบวิธีแบบเดิมได้ โดยที่คุณภาพไม่เปลี่ยนแปลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.18 แสดงผลลัพธ์ของการสังเคราะห์หลายวิวแบบต่างๆ(1)

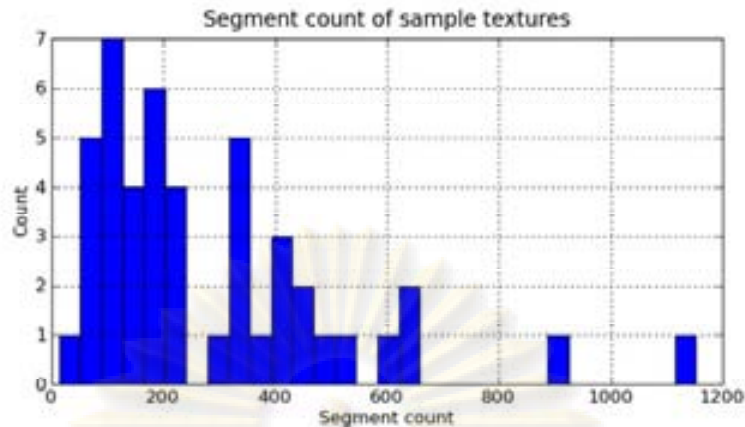


รูปที่ 5.19 แสดงผลลัพธ์ของการสังเคราะห์ลายผิวแบบต่างๆ(2)

### 5.5.2 การเปรียบเทียบด้านเวลาการทำงาน

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาจะพบว่า ระเบียบวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพเชิงเวลาที่ดีกว่านั้นคือ  $O((n+m)\log n + k^2)$  ซึ่งถ้าคิดว่าคุณค่า  $k$  ซึ่งเป็นจำนวนเซกเมนต์มีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนของจุดภาพ (ในการทดลองพบว่าจำนวนของเซกเมนต์มีจำนวนตั้งแต่ 1 จนถึง 1200 เท่านั้น ดังรูปที่ 5.20 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของต้นฉบับ ซึ่งมีขนาด  $256 \times 256 = 65,536$  จุดภาพ และขนาดของผลลัพธ์ซึ่งมีขนาด  $512 \times 512 = 262,144$  จุดภาพ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบจึงขอลดรูปลงให้เป็น  $O((n+m)\log n)$





รูปที่ 5.20 การกระจายตัวของจำนวนเซกเมนต์ของลายผิวที่ใช้ทดสอบ

ถ้าเปรียบเทียบจากการวิเคราะห์ระเบียบวิธีแล้ว จะได้ว่าการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละจุด และการสังเคราะห์แบบที่ละแผ่นภาพมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเทียบเท่ากัน ซึ่งมีค่า  $O(nmk)$  เมื่อ  $k$  เป็นค่าขนาดของเพื่อนบ้านสำหรับการสังเคราะห์ลายผิวแบบที่ละจุดภาพ และมีค่าเป็นขนาดของพื้นที่ซ้อนทับเมื่อทำการสังเคราะห์แบบที่ละแผ่นภาพ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเวลาแล้วพบว่าวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้ มีข้อดีคือ มีความเร็วมากกว่าระเบียบวิธีแบบเดิมเมื่อต้องใช้สังเคราะห์ลายผิวขนาดใหญ่ เนื่องจากความเร็วในการสังเคราะห์เติบโตตามขนาดของผลลัพธ์เป็นเส้นตรงกับค่าลอการิทึมของขนาดภาพต้นฉบับเท่านั้น ซึ่งต่างจากระเบียบวิธีเดิมที่ความเร็วขึ้นอยู่กับขนาดของผลลัพธ์คูณกับขนาดของต้นฉบับ

เมื่อเปรียบเทียบโดยการทดสอบด้วยตัวอย่างลายผิวจริง ซึ่งใช้ลายผิวจากกลุ่มลายผิวที่ใช้ทดสอบ กลุ่มละ 2 ลายผิว จะสามารถแสดงความเร็วในการทำงานได้ดังตารางที่

จากผลการทดลองจะพบว่าความเร็วในการทำงานของวิธีที่นำเสนอมีความเร็วกว่าระเบียบวิธีเดิมอยู่มาก แม้ว่าจะต้องเสียเวลาทำกระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพ และการสร้างโครงสร้างต้นไม้เพิ่มเติม แต่กระบวนการนี้ทำให้กระบวนการเลือกแผ่นลายผิวมาใช้มีความเร็วคงที่ไม่ขึ้นกับขนาดของรูปต้นฉบับอีกต่อไป ทำให้ความเร็วโดยรวมเร็วขึ้นกว่าระเบียบวิธีเดิมมาก โดยเฉพาะเมื่อใช้ในการสังเคราะห์ลายผิวขนาดใหญ่

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความเร็วในการสังเคราะห์ลายผิวแบบต่างๆ

ลายผิว	ค่าตัวแปรที่ใช้	เวลาที่ใช้ในกาสังเคราะห์ลายผิว (s)		
		วิธีที่เสนอ	แบบที่ละแผ่นภาพ	แบบที่ละจุดภาพ
	$a = (50, 44)$ $b = (7, 6)$	0.68	82.12	7449
	$a = (55, 51)$ $b = (14, 13)$	1.34	182.31	7403
	$a = (39, 34)$ $b = (9, 7)$	0.93	181.78	7727
	$a = (59, 62)$ $b = (14, 14)$	1.26	148.24	7399
	$a = (32, 21)$ $b = (8, 6)$	1.53	273.10	7490
	$a = (26, 35)$ $b = (7, 7)$	1.26	222.62	7434
	$a = (103, 72)$ $b = (30, 10)$	1.16	1383.89	7392
	$a = (50, 57)$ $b = (4, 4)$	0.55	37.81	7727

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการวิจัยซึ่งได้นำเสนอระเบียบวิธีในบทที่ 3 และ 4 และได้เสนอการทดลองและวิเคราะห์ผลไว้อย่างละเอียดดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 โดยผลจากการวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอไปนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์หลายผิวที่มีการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หลายผิวด้านฉบับด้วยการแยกส่วนภาพ มาช่วยในการประมาณค่าตัวแปรเริ่มต้นในการสังเคราะห์ และช่วยในการสร้างโครงสร้างข้อมูลเพื่อให้กระบวนการสังเคราะห์ทำงานได้เร็วขึ้น ซึ่งวิธีการที่นำเสนอให้คุณภาพของผลลัพธ์ที่ดีเทียบเท่ากับการสังเคราะห์หลายผิวแบบที่ละเอียด ภาพ แต่ด้วยความเร็วในการทำงานที่เร็วกว่าเดิมถึง 150 – 200 เท่า เมื่อใช้กับลายผิวด้านฉบับขนาด 256x256 จุดภาพ ความเร็วนี้ จะต่างกันมากขึ้นเมื่อใช้กับภาพขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากวิธีการที่นำเสนอมีความเร็วในการทำงาน  $O((n+m)\log n)$  เมื่อกำหนดให้  $n$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพต้นฉบับ และ  $m$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพผลลัพธ์ วิธีที่นำเสนอมีความเหมาะสมกับลายผิวหลายรูปแบบทั้งแบบสโทแคสติก และแบบที่มีโครงสร้าง นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยมนุษย์ช่วย ซึ่งเหมาะสมกับการสังเคราะห์หลายผิวขนาดใหญ่ และมีจำนวนมาก ใช้ในโปรแกรมแสดงผลสามมิติ หรืออาจใช้ในโปรแกรมที่ต้องแสดงผลแบบทันกาล เป็นต้น

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่นำเสนอแม้ว่าจะทำงานได้อย่างถูกต้องกับลายผิวหลายรูปแบบ แต่ก็ยังมีข้อผิดพลาดอยู่บ้างในกระบวนการต่างๆ ในกระบวนการแบ่งย่อยรูปภาพซึ่งในปัจจุบันใช้ค่าระดับการสังเกตที่คงที่ อาจทำให้การแบ่งย่อยรูปภาพทำได้หยาบหรือละเอียดไม่เท่ากันในแต่ละภาพ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มการวิเคราะห์ภาพ เช่น การวิเคราะห์เวฟเล็ตเพิ่มเติม ในขั้นตอนการหาค่าตัวแปรขนาดของแผ่นก็สามารถเพิ่มกระบวนการเรียนรู้เพื่อให้สามารถเลือกกลุ่มเซกเมนต์ที่โดดเด่นได้ถูกต้องมากขึ้น หรืออาจจะใช้การวิเคราะห์จากเซกเมนต์ที่โดดเด่นมากกว่าหนึ่งกลุ่ม เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้การประมาณค่าขนาดของแผ่น และพื้นที่ซ้อนทับทำได้แม่นยำมากขึ้น ในกระบวนการสังเคราะห์หลายผิวก็สามารถปรับปรุงระเบียบวิธีโดยให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของแผ่นได้ ซึ่งน่าจะทำให้รอยต่อระหว่างลายน้อยลงกว่าการใช้ขนาดของแผ่นเพียงค่าเดียว

นอกจากนี้ ยังสามารถเพิ่มเติมให้ผู้ใช้สามารถปรับแต่งลายได้เพิ่มเติม เช่น การปรับแต่งสีของเชกเมนต์ให้มีการกระจายตัวมากขึ้น ในการปรับแต่งขนาดของเชกเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ อาจรวมเอากระบวนการส่งผ่านลายผิวเข้าไว้ในการสังเคราะห์เพื่อให้สามารถทำการสังเคราะห์ลงไปบนพื้นผิวของวัตถุได้โดยตรง ไม่ต้องผ่านการสังเคราะห์บนพื้นผิวสองมิติก่อนอีก

งานวิจัยที่น่าเสนอสามารถประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ได้ ทั้งทางตรงและทางอ้อม ในทางตรง เช่น นำไปใช้ในการแก้ไขภาพโดยการสังเคราะห์ภาพในส่วนที่ขาดหายไป นำไปใช้สังเคราะห์ลายผิวเพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ต้องจัดเก็บ เป็นต้น ส่วนทางอ้อม เช่น สามารถนำวิธีที่เสนอไปใช้ในการบีบอัดภาพ หรือพัฒนาต่อยอดให้สามารถสังเคราะห์ข้อมูลรูปหลายเหลี่ยมได้ เป็นต้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] David, J.H., and James, R.B. (1995). Pyramid-based texture analysis/synthesis. Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 229-238. ACM.
- [2] Yanxi, L., Wen-Chieh, L., and James, H. (2004). Near-regular texture analysis and manipulation. ACM Trans. Graph. 23: pp. 368-376.
- [3] Li, S.Z. (1994). Markov random field models in computer vision. Proceedings of the third European Conference on Computer Vision (Vol. II), pp. 361-370. Stockholm, Sweden: Springer-Verlag New York, Inc.
- [4] Bentley, J.L. (1990). K-d trees for semidynamic point sets. Proceedings of the sixth annual symposium on Computational geometry, pp. 187-197. Berkley, California, United States: ACM.
- [5] Jeremy, S.D.B. (1997). Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images. Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 361-368. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [6] Alexei, A.E., and Thomas, K.L. (1999). Texture synthesis by non-parametric sampling. Proceedings of the International Conference on Computer Vision- Volume 2 - Volume 2, pp. 1033-1038. IEEE Computer Society.
- [7] Li-Yi, W., and Marc, L. (2000). Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 479-488. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [8] Sunil, A., David, M.M., Nathan, S.N., Ruth, S., and Angela, Y.W. (1998). An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching fixed dimensions. J. ACM 45: pp. 891-923.
- [9] Steve, Z., and Michael, G. (2003). Interactive texture synthesis on surfaces using jump maps. Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering, pp. 90-96. Leuven, Belgium: Eurographics Association.

- [10] Alexei, A.E., and William, T.F. (2001). Image quilting for texture synthesis and transfer. Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 341-346. ACM.
- [11] Vivek, K., Arno, S., dl, Irfan, E., Greg, T., and Aaron, B. (2003). Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts. ACM Trans. Graph. 22: pp. 277-286.
- [12] Yiping, W., Wencheng, W., and Enhua, W. (2006). Optimizing the parameters for patch-based texture synthesis. Proceedings of the 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications, pp. 75-82. Hong Kong, China: ACM.
- [13] Praun, E., Finkelstein, A., and Hoppe, H. (2000). Lapped textures. Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 465-470. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [14] Dichler, J.-M., Maritaud, K., Levy, B., Chazanfarpour, D., Dichler, J.-M., Maritaud, K., et al. (2002). Texture particles. Eurographics 2002, pp. 401-410. Computer Graphics Forum.
- [15] Dischler, J.-M., and Zara, F. (2006). Real-time structured texture synthesis and editing using image-mesh analogies. Vis. Comput. 22: pp. 926-935.
- [16] Takashi Ijiri, R.M., Takeo Igarashi, Gavin Miller,. (2008). An example-based procedural system for element arrangement. Computer Graphics Forum 27: pp. 429-436.
- [17] Pedro, F.F., and Daniel, P.H. (2004). Efficient graph-based image segmentation. Int. J. Comput. Vision 59: pp. 167-181.
- [18] Lin, L., Ce, L., Ying-Qing, X., Baining, G., and Heung-Yeung, S. (2001). Real-time texture synthesis by patch-based sampling. ACM Trans. Graph. 20: pp. 127-150.
- [19] Adelson, T. (1995). Vision Texture [Online]. Massachusetts Institute of Technology. Available from: <http://vismod.media.mit.edu/vismod/imagery/VisionTexture/vistex.html> [29 April 2009]



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการเรื่อง “Fast and robust parameter estimation method for patch-based texture synthesis” โดย นายจักรพงษ์ นาคเดช และ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “7<sup>th</sup> ACM SIGGRAPH international Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in industry (VRCAI2008)” ซึ่งจัดขึ้น ณ ประเทศสิงคโปร์ ระหว่างวันที่ 8 - 9 ธันวาคม 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# Fast and Robust Parameter Estimation Method for Patch-based Texture Synthesis

Jakrapong Narkdej<sup>\*</sup> Pizzanu Kanongchaiyos<sup>†</sup>  
 Computer Graphics Laboratory, Department of Computer Engineering,  
 Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

## Abstract

Patch-based texture synthesis method uses MRF texture model to synthesize a bigger texture from a smaller patch sample containing two user-defined parameters, patch size and boundary zone. To obtain optimal values for the parameters, the texture has to be analyzed, which costs too expensive for real-time large texture synthesis. This paper introduces a more efficient method for finding the optimal value of the two parameters. Firstly, we use graph-based image segmentation to extract feature segments from the input sample. We then choose a set of major segments preserving the main features to appear in the final result. Finally, we calculate the two parameters based on size and repetition of the segments. The experimental results show that our technique can reduce computational time for determining the parameters compared to previous method and can work with several type of textures.

**CR Categories:** I.3.7 [Computer Graphics]: Three-dimensional Graphics and Realism — color, shading, shadowing, and texture;

**Keywords:** Patch-based Texture Synthesis, Texture model, Image segmentation

## 1 Introduction

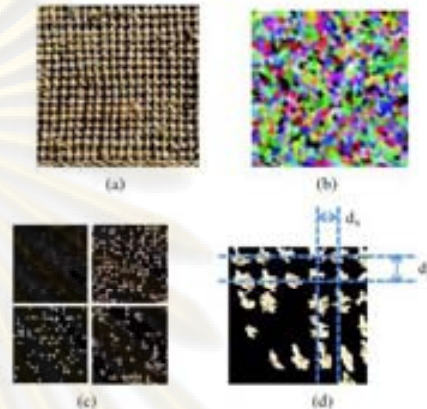
Texture synthesis from an image sample has been actively researched. Several methods has been proposed for producing larger texture resembling an input texture sample. Patch-based techniques [Efros and Freeman 2001] is one of the most effective technique since it can preserve local feature as well as global feature of the input texture. Its advantage is the synthesis time because the method can synthesize several pixels at the same time. However, it is still challenged for finding more techniques to reduce its synthesis time and improve the texture quality.

Patch-based techniques usually depend on two parameters, the patch size and the texture boundary zone. These two parameters correspond to the quality of the result textures. Optimization method can be used to find the optimal values [Wang et al. 2006] but it costs too much for real-time computation.

This paper proposes a method to define the appropriate value for the two parameters efficiently for synthesizing the best result looked natural with no artifacts. Section 2 describes our method while Section 3 shows the experimental results. The discussion and conclusion are stated in Section 4.

<sup>\*</sup>e-mail: 5070235021@student.chula.ac.th

<sup>†</sup>e-mail: pizzanu@cp.eng.chula.ac.th



**Figure 1:** Proposed texture model; (a) Sample texture, (b) Segments, (c) Group of segments, (d) Distance evaluation

## 2 Proposed method

In our method, a texture image  $I$  is a set of segment groups  $G_i$ . Each segment group contains segments  $S_j$  having the same visual similarity (intensity and color).

$$I = \bigcup_{i=1}^n G_i ; G_i = \bigcup_{j=1}^m S_j \quad (1)$$

To extract all segments from the input texture sample, we use the Graph-based image segmentation technique [Felzenszwalb and Huttenlocher 2004] since it works efficiently for large textures. Second, we classify the segments into several groups having similar color intensity using the Clason's adaptive clustering algorithm [Clason 1990]. Next, each segment group is evaluated if it should be included in the feature group  $g_f$ , which is the group preserving main feature of the final result. We define  $D$  as the distance list containing minimum distance between the segments and its neighborhoods as shown in (2), and  $W$  as the size list containing size of every segment in the selected group.

$$D = \{d_i \mid d_i = \min\{s_i, s_j\}; s_i, s_j \in g_f\} \quad (2)$$

We use  $P_{80}$  representing for element of the a list having the value percentile 80. Our optimal patch size  $\alpha$  and boundary size  $\beta$  are computed based on  $P_{80}(D)$  and  $P_{80}(W)$  as follow

$$\alpha = 2 \times P_{80}(D) + P_{80}(W) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{P_{80}(W)}{2} \quad (4)$$







Sample	Size	Our			Wang			Result
		$\alpha$	$\beta$	Time	$\alpha$	$\beta$	Time	
	161x161	98x78	18x22	0.39 s	113x81	4x4	72 s	
	152x136	37x35	7x7	0.26 s	48x42	4x4	61 s	
	106x83	56x44	12x4	0.17 s	66x48	20x8	116.5 s	

Figure 2: Comparison with previous method

### 3 Experimental Results

Our method is evaluated by implementing as an application. The experiment is to use the application for estimating the suitable parameter values from several sample textures having size (256x256), and synthesizing (512x512) textures using patch-based texture synthesis to show quality of the synthesized texture results. The running time, synthesis time and the final texture of the experiment are shown in Figure 3,4. Our algorithm can use less than two seconds to analyze texture on a 1.5 GHz CPU which is faster than using the previous optimization method while the quality of the synthesized textures is the same.

Since we use texture segmentation to extract all of the texture segments from the sample, there are some cases that the bad segmentation due to blur, noisy or small samples can cause to the bad results. Our result quality really depends on the repetition of texture features. The proposed method can give the optimal value for the parameter when the input textures are homogeneous. The main advantage of our method is the robustness of the feature selection to the number and size of main features of the input texture.

### 4 Conclusion

In this paper we introduced a new parameter estimation model for the patch-based texture synthesis which is more faster than Markov Random Field (MRF) [Li 1994]. Our model can compute the main feature using segments in input texture. The relations between each segment are analyzed to find the optimal value for the two parameter values for patch-based texture synthesis using the minimum distance between each neighboring pair of segments and the size of each segment. The advantage of the proposed method is the less analysis time for large input texture. However, improvement of feature selection is still challenged for the complex input texture.

### References

- CLASON, R. 1990. *Finding clusters: an application of the distance concept*. The Mathematic Teacher.
- EPROS, A. A., AND FREEMAN, W. T. 2001. Image quilting for texture synthesis and transfer. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, 341-346.
- FELZENSZWALD, P. F., AND HUTTENLOCHER, D. P. 2004. Efficient graph-based image segmentation. *Int. J. Comput. Vision* 59, 2, 167-181.
- LI, S. Z. 1994. Markov random field models in computer vision. In *ECCV (2)*, 361-370.

WANG, Y., WANG, W., AND WU, E. 2006. Optimizing the parameters for patch-based texture synthesis. In *Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications*, ACM, Hong Kong, China, 75-82.









Sample	Estimated patch size	Estimated bound size	Example patch	Running time (s)	Synthesis time (s)
	56 x 52	10 x 12		0.41	17.4
	51 x 52	19 x 16		1.72	35.1
	46 x 47	14 x 15		0.42	31.8
	43 x 45	13 x 9		0.54	27.6

Figure 3: Results from our method

















Sample	Result	Segmentation	Major group, g <sub>i</sub>
			
			
			
			

Figure 4: Result textures using estimated parameters.

### ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการเรื่อง “An Efficient Parameters Estimation Method for Automatic Patch-based Texture Synthesis” โดย นายจักรพงษ์ นาคเดช และ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “6<sup>th</sup> International conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa (AFRIGRAPH2009)” ซึ่งจัดขึ้น ณ เมืองพิทูเรีย ประเทศสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ ระหว่างวันที่ 4 - 6 กุมภาพันธ์ 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# An Efficient Parameters Estimation Method for Automatic Patch-based Texture Synthesis

Jakrapong Narkdej\*      Pizzanu Kanongchaiyos<sup>†</sup>  
 Computer Graphics Laboratory, Department of Computer Engineering,  
 Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

## Abstract

Patch-based texture synthesis is a method for synthesizing bigger texture from smaller sample patch by patch. This method requires two user defined parameters including patch size and boundary zone which cannot directly evaluated. To obtain optimal parameters, we can analyze texture using Markov Random Field, but it is too expensive to be used with large textures. This paper introduces more efficient method to find optimal parameters. Firstly, we use graph-based image segmentation to extract segments from the sample. Secondly, we choose main feature to be preserved in result. Finally, we calculate optimal parameters based on size and repetition of the segments. Our technique reduces time used to determine the parameters compared to former method and can be used with wide range of textures.

**CR Categories:** I.3.7 [Computer Graphics]: Three-dimensional Graphics and Realism — color, shading, shadowing, and texture;

**Keywords:** Patch-based Texture Synthesis, Texture model, Image segmentation

## 1 Introduction

Much of apparent realism of computer generated image comes from appropriate use of texture. Textures allow us to add more details to the scene without adding geometry. Most texture images can be gathered from real world using camera or special devices. Gathering from real world makes the texture look real, however, the captured sample usually be smaller than required size because of the curvature and size of the captured surfaces.

Texture synthesis from image samples has been an active research topic and several methods were proposed. All methods produce larger textures that appear like the input texture sample. Texture synthesis from examples can be categorized into two groups [Xu et al. 2001] by its underlying sample technique. Global sampling techniques [Heeger and Bergen 1995; Bonet 1997; Zhu et al. 2000; Portilla and Simoncelli 2000] are fast but the results tend to lose local feature, so it is limited to stochastic textures. Local sampling techniques [Efros and Leung 1999; Wei and Levoy 2000; Efros and Freeman 2001] are more interesting since it can capture local feature of sample textures as well as global features.

Local sampling techniques use Markov Random Field Model or MRF [Li 1994] as underlying texture model. MRF defines output color of texture pixels by probability based on neighbor pixels.

\*e-mail:5070235021@student.chula.ac.th

<sup>†</sup>e-mail:pizzanu@cp.eng.chula.ac.th

The ability to cover a wide range of images and capture local feature very well are its strong points. To synthesize, the algorithm will search for an appropriate pixel by evaluating the energy of its neighbor pixels from sample and then paste it into the result texture pixel by pixel [Efros and Leung 1999]. This technique works well for a wide range of texture, however, the time required for evaluating the energy of each pixel is very long. Tree-structured vector quantization can be used to accelerate the searching process [Wei and Levoy 2000] but it requires more memory to store the neighbor tree which can become very large for big texture.

Patch-based techniques [Efros and Freeman 2001] are introduced to reduce synthesis time by synthesizing several pixels at the same time. This technique selects rectangle patch from sample and paste to result texture patch by patch. Patch-based technique depends on two parameters, patch size and boundary zone. These parameters greatly affect result quality and speed of synthesis. Too small patch causes results to lose global feature. In contrast too big patch will cause artifacts in patch boundaries. The boundary zone is involved with the patch selection process. Unsuitable boundary will leads to inconsistency between patch. These parameters can be approximated manually by observing the pattern of feature. Though an optimization method can be used to optimize these parameters [Wang et al. 2006], it is too expensive to be computed in reasonable time. This paper extends our former work [Narkdej and Kanongchaiyos 2008] that propose a novel method to define the appropriate parameters efficiently to bring the best result that looks random and has no artifacts.

The rest of the article is organized as follow. In Section 2, we describe the previous work. In Section 3, we explain the process of patch-based texture synthesis. In Section 4 and 5, we present our texture model and our algorithm. The results of our method are shown in Section 6, followed by discussion and conclusion in Section 7.

## 2 Related works

In patch-based methods, the patch size and boundary zone are two parameters that user must provide. Patch size determines the size of the patch to be copied in each iteration. Boundary zone is the area which the algorithm performs a neighborhood comparison to choose the best patch to be copied. These two parameters influence the synthesis time and quality of results.

Though these parameters are really important for patch-based texture synthesis, there are only two works that study the impact of these parameters. Liang's work [Liang et al. 2001] reports the affects of the parameter with speed and quality of the results but didn't propose any guideline to select the best parameters. The user must manually observe the feature in sample to estimate the parameter to be used. For estimating parameters, an optimization method can be used to optimize parameters [Wang et al. 2006]. In his work, the impact of the parameters is evaluated. If patch size is too big, texture feature transition will be inconsistent. On the contrary, if patch is too small, the global feature will be lost as shown in Figure 2. For boundary zone, if too narrow, inconsistent patch will be selected. On the contrary, if too wide, the results seem to be more










Sample	Size	Our			Wang.			Our Result	Wang's Result
		$\alpha$	$\beta$	Time	$\alpha$	$\beta$	Time		
	161x161	98x78	18x22	0.39 s	113x81	4x4	72 s		
	152x136	37x35	7x7	0.26 s	48x42	4x4	61 s		
	106x83	56x44	12x4	0.17 s	66x48	20x8	116.5 s		

Figure 1: Comparison with previous method

structure and not random. The results seem promising but it takes much time to analyze even when using with small texture.

To optimize the parameters, the feature containment and period parameter is defined to measure the suitable patch using histogram. These parameters reflect the difference of the texture features between patch and periodic variation of each patches. For the boundary zones, constraint and computing constraint parameter is introduced. These parameters reflect the patch that possible to be copied in each iteration and also the period of each possible patch.

The optimization algorithm is just a linear search to every possible parameter and then the optimal patch size is selected manually using on period parameter and boundary zone using based on constraint parameter. User must choose the optimal parameters based on the quality and time used in synthesis process. Since the evaluation method requires a lot of computation. Though the sample is just a small sample in 100x100 pixels, the analysis process takes several seconds that is very big compare to synthesis time that takes only a few seconds.

Our work proposed the automatic method to estimate the best parameters that brings the good results. We propose new texture model that is more suitable than MRF model. Our method takes less than two seconds even when using with large texture in 256x256 pixels and didn't require any user interaction. Using our model, analyze time is greatly reduced compare to the optimization method as shown in Figure 1. Please note that our method give different result than the optimization method, but the synthesize results quality is the same.

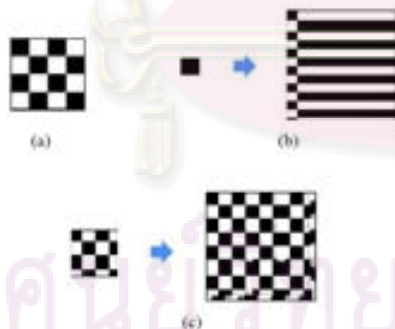


Figure 2: The effects of the patch size to the quality of results; (a) Sample texture, (b) Sample patch that is too small cannot preserve global structure of the texture, (c) Sample patch that is too large causes discontinuous seam (courtesy of Wang, Y)

### 3 Patch-based texture synthesis process

In patch-based synthesis process, there are two parameters that user must provide, the patch size  $\alpha$  and boundary zone  $\beta$ . Synthesize process starts with randomly selecting the first patch having the size determined by patch size parameter. The selected patch will be copied to the top-left corner of the results.

The process of synthesizing new texture is done iteratively. First every patch from the sample will be evaluated by computing the sum of the difference in boundary zone as follow.

$$d(E_a, E_b) = \left[ \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A (p'_a - p'_b)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Where A is the number in boundary zone.  $p'_a, p'_b$  represent the values of  $i^{\text{th}}$  pixels in boundary zone  $E_a$  and  $E_b$ .

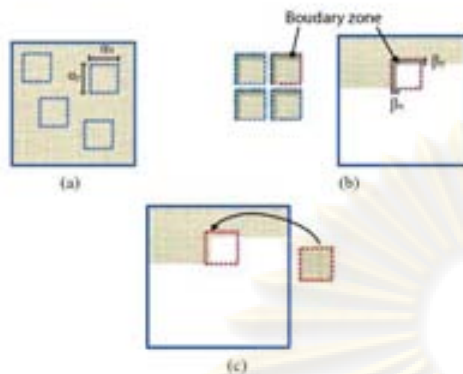
The patches that have energy below given threshold will be put into the list of candidate patches. After every possibility is evaluated, we randomly select the patch in the list to be copied to the result texture. The patch is copied to the position that overlapped with the synthesized pixels that has width equal to the boundary zone parameter. The overall process is shown in Figure 3. When patch is copied, the pixels in the boundary zones are blend with the former patches to eliminate the seams. To heal the seams, color interpolation [Liang et al. 2001] or dynamic programming with the cutting path [Efros and Freeman 2001] or Graph cuts [Kwatra et al. 2003] can also be included.

Selecting the candidate patches is very expensive, but it can be improved by using data structure such as combination of kd-tree, PCA and quad-tree [Liang et al. 2001] and Approximate Nearest Neighbor (ANN) [Arya et al. 1998]. These techniques greatly reduce synthesis time, but it also trade off with memory usages.

### 4 Proposed image model

The optimization technique mainly uses the Markov Random Field (MRF) as the texture model in the analysis phase. Because the MRF model requires processing the neighbor pixels, it is very time consuming when being used it as an analysis model with very large texture. Additionally, evaluating all possible parameters takes time in exponential scale when texture size grows.

To accelerate the image analysis during the evaluation of the parameters, we present a new definition of the sample image and then we use information that is extracted from our image model to directly estimate the optimal parameters.



**Figure 3:** The process of patch-based texture synthesis; (a) Candidate patches in sample texture, (b) We select the suitable patch by evaluate the energy in boundary zone, (c) Result texture is synthesis patch by patch from top to bottom and left to right

#### 4.1 Image model

In our model, we consider that a texture is composed of small segments. Each segment has pixels that are corresponding to the sample image, the pixels having the same visual pattern means they are having the same color intensities and is connected. The segment can be seen as an element in the image as in Figure 4.

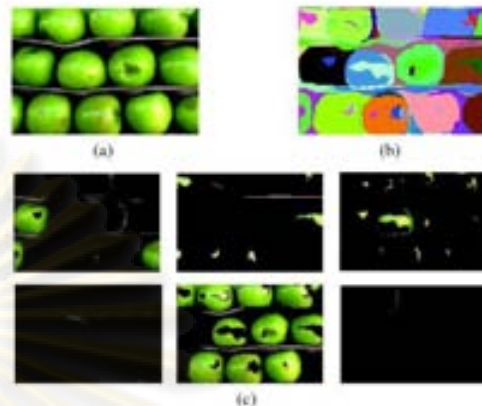
Next, we classify the segments into several groups that having similar color intensity. Each group will contains the segments that represent the same elements in sample texture such as rocks that have the same color, leaves in fruits texture. Please note that the same elements may be separated into many groups due to non-homogeneous shading of the texture. For our method this problem didn't affect our result so we didn't apply any method to fix this problem. The sample of grouping is shown in Figure 4. To sum up, our sample image  $I$  is composed of various groups  $G_i$  and each group contain segments  $S_j$  that have the same color similarity as follow

$$I = \bigcup_{i=0}^n G_i ; G_i = \bigcup_{j=0}^m S_j \quad (2)$$

#### 4.2 The relation between parameters and image segments

Most textures using in computer graphics always have repeating feature properties. When synthesize result texture the repeating properties should be included in synthesis process. If we cannot capture the repeating, the results will not be similar to the sample. We have observed that the most important properties that should be preserved in results are width between each features and shape of the features. We analyze the impact of these parameters to the result quality as follow.

**Patch size** The patch size is the parameter that greatly affects the quality of the results since it will preserve the shape of the texture features. If the patch size is too small, It can't capture the feature and will cause inconsistency feature in results, For example, eggs that do not have sphere shape. Another example is a leaf that seems



**Figure 4:** Proposed texture model; (a) Sample texture, (b) Image from graph-based segmentation, (c) Sample of segments groups, each group has the same visual similarity

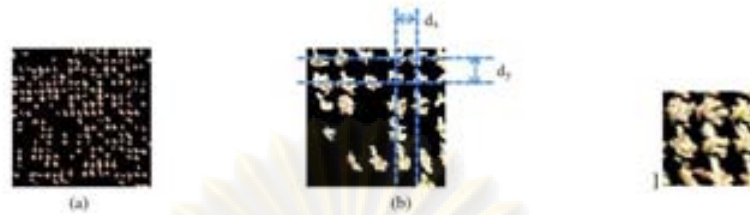
to be merged from two leaves. The distance between features is the properties that will be lost when using too small patch. We can choose bigger patch size to ensure that no features will be lost. But if the patch size is too large, the chance that there is no candidate patch that is suitable with given boundary zone. This will results in discontinuous seams in the boundary zone of that patch. Too big patch will result in less candidate patch and makes output seems repeating.

Appropriate patch size should make all of the candidate patch to cover all of the feature shape to preserve its shape during synthesize process. The candidate patch should also be big enough to include at least two features to retain the distance between each feature. But patch size should be as small as possible to guarantee that there will be no artifacts in results.

**Boundary zone** For boundary zone, it is harder to be evaluated than patch size. Boundary zone is used to evaluate and select the candidate patches to be pasted in results. Each patch in result texture will be merged in this area. So an improper boundary zone will results in discontinuous seams along the boundary. In candidate patch selection, we use boundary zone to compute the energy of each possible patch. So the boundary zone plays the most important element that will effect the continuity of the feature between patches. If the boundary is too narrow, there may be no suitable patches and results in discontinuous edges. In contrast, too wide boundary will results in less random of pattern in texture. For our method we choose to use the width of the feature as boundary zone because we assume that discontinuous edges prevention is more important than randomize pattern.

#### 5 Parameter estimation method

To determine the optimal parameters, we begin with analyzing process to decompose the sample into many segments. After that, we analyze these segments to extract to appropriate patch size and boundary zone. Our method is decomposed into many stages as shown in Algorithm 1



**Figure 5:** The method used to evaluate patch size; (a) The major feature we choose to preserve, (b) We calculate the average distance between each segment, (c) The sample patch that has the size estimated from our method

---

**Algorithm 1** Our algorithm
 

---

```

 $S \leftarrow \text{Segmentation}(I)$ 
 $G \leftarrow \text{ClassifyToGroups}(S)$ 
 $g_j \leftarrow \text{SelectFeature}(G)$ 
 $D \leftarrow \text{ComputeDistanceList}(g_j)$ 
 $W \leftarrow \text{ComputeSizeList}(g_j)$ 
 $\alpha \leftarrow 2 \times d + \tilde{w}$ 
 $\beta \leftarrow \frac{\alpha}{s}$ 

```

---

### 5.1 Image segments decomposition

Image segmentation plays an important step in our method. Several segmentation techniques can be used in this step. But we choose Graph based image segmentation [Felzenszwalb and Huttenlocher 2004] because it can process large textures in real-time. Graph based image segmentation also use graph cut as it underlying technique. Since graph cut is used in our synthesis process to merge patches together too, the segments from segmentation can represent the segment that graph cut will used when merging patch. Graph based image segmentation perform very fast compared to other method with acceptable results. Using this technique, we must provide 3 parameters that determine the segmentation behavior. The first parameter is  $\sigma$  that is the kernel size for smoothing image before segmentation. Second parameter is  $k$  that determine the scale of observation; bigger  $k$  will results in large segments. The last parameter is  $s$  which limit the smallest segment size. From our experiments with textures in various size and types, the optimal parameter is  $\sigma = 0.5$ ,  $k = 250$  and  $s = Wmin^2$  where  $Wmin = \min(I_w, I_h)$  and  $I_w, I_h$  are the width and height of  $I$ .

After segmentation process sample image  $I$  is decomposed into segments  $S_i$ . We then compute the statistics of each segments for later use. We define

$$S_i = (P, \bar{c}, \bar{l}) \quad (3)$$

where  $P$  is the set of the pixels in this segment,  $\bar{c}$  is average color value and  $\bar{l}$  is the average of pixel positions that will be used to represent the segment location.

### 5.2 Segment classification

In this step, we will classify the segments into many groups. There are many classification algorithms available. We can use well-known algorithm such as K-Mean which works very well. In order to use this method, we must use other method to determine number of cluster before, so we choose other clustering algorithm that does not needed to specify cluster count. For this work, we use the clustering algorithm that described in [Clason 1990]. To use

the classification algorithm, we must provide the distance function. Let  $D_i$  is the distance function that resemble the distance between  $S_a$  and  $S_b$ , we get

$$D_i(S_a, S_b) = \sum_{i=1}^3 (\bar{c}_{a,i} - \bar{c}_{b,i})^2 \quad (4)$$

We set the distance threshold to  $8^2 \times 3$ . This means that segments that have the difference in their average color not more than 24 intensity level will be put in the same group.

### 5.3 Feature group selection

In this step, the feature group will be selected to be analyzed in later step. The feature group is the group that contains texture feature that we choose to be preserved in result. We provide the method that can be used to determine feature group automatically as shown in Algorithm 2, but please note that this step should allow the user to change the selection as they need to preserved other feature instead since there can be more than 1 feature that should be preserved in some textures.

---

**Algorithm 2** Find the feature group  $g_j$ 


---

```

 $g_j \leftarrow 0$ 
 $minEg \leftarrow \max(float)$ 
for all  $g \in G$  do
  if  $len(g) < 5$  then
    continue
  end if
   $r \leftarrow \text{FindBound}(g)$ 
  if  $r.width \times r.height \leq 0.5 \times I_w \times I_h$  then
    continue
  end if
   $D \leftarrow \text{GetDistanceList}(g)$ 
   $W \leftarrow \text{GetSizeList}(g)$ 
   $Eg \leftarrow \text{Var}(D) + \text{Var}(W)$ 
  if  $minEg > Eg$  then
     $g_j \leftarrow g$ 
     $minEg \leftarrow Eg$ 
  end if
end for

```

---

For automatic feature group selection, we analyze based on 3 rules. The first rule is feature group must have number of segments not less than 5 segments. This rule prevents some groups that contain too small segments that do not fit to be used for analysis using our model. The second rule is the group should cover the sample area not less than a half of sample area to ensure that the selected feature is distributed among the sample.

If group pass the first two rules, we will compute group energy by compute the distance between segments in group and segment size. Firstly, we calculate the distance to the nearby segments for every segments. Let  $D$  is set of distances for every  $x \in g$ .

$$D = \{d_i | d_i = \min\{s_i, s_j\} | x \in g; 1 \leq i, j \leq |g|; i \neq j\} \quad (5)$$

Secondly, we calculate size list of every  $x \in g$ , as follow

$$W = \{w_i | w_i = |s_i| \mid x \in g\} \quad (6)$$

Then we find the feature group by select the group that has less energy  $E_g$  that is defined as follow

$$E_g = Var(D_x) + Var(D_y) + Var(W_x) + Var(W_y) \quad (7)$$

Where  $Var()$  is function that returns variance of given data.  $E_g$  will be used to resemble the periodic property of feature. If segments size are the same and the position of each segments is uniformly distributed along samples,  $E_g$  will have smaller value. The group that has less  $E_g$  will be better to be selected as feature group.

#### 5.4 Calculate the distance between segments and segment size

After we got the group that is the main feature to be preserved. We will calculate the average distance and size of segments in feature group to be used in next step. From previous step, we got the distance list  $D$  and segment size list  $W$  of selected group  $g$ . In this step, We will choose the value in list as the value to represent all value in lists. We choose percentile 80 to be the value to represent the value. Because we will use this value to calculate optimal parameters, the value to be used should cover the property of features group.

We use  $P_{80}$  representing for element of the list having the value of percentile 80 and then let  $\bar{d}$  be the average of the distance and  $\bar{w}$  be the average width of the segments. Please note that we compute the percentile in the separate list between x and y axis.

$$\bar{d} = (P_{80}(D_x), P_{80}(D_y)) \quad (8)$$

$$\bar{w} = (P_{80}(W_x), P_{80}(W_y)) \quad (9)$$

#### 5.5 Select the value for parameters

To ensure that we always preserve the distance between major features, we then use the average distance between segments of feature group and average size of segments to calculate optimal parameters. Optimal patch size should preserve the feature shape and the distribution of feature. To preserve feature shape, the patch size should be big enough to cover the feature and to preserve the distribution; patch size should be at least twice of distance between feature. We define optimal patch size  $\alpha$  as follow

$$\alpha = 2 \times \bar{d} + \bar{w} \quad (10)$$

For boundary zone, we must choose the value that preserve feature shape. The length equal to a half of feature size is suitable because it should limit the candidate patch to be the patch that match this feature. Let  $\beta$  is the suitable boundary zone. We got

$$\beta = \frac{\bar{w}}{2} \quad (11)$$





Sample	Estimated patch size	Estimated bound size	Example patch	Running time (s)	Synthesis time (s)
(a)	56 x 52	10 x 12		0.41	17.4
(b)	72 x 64	20 x 16		1.72	35.1
(c)	46 x 47	14 x 15		0.42	31.8
(d)	43 x 45	13 x 9		0.54	27.6

Figure 6: Results from our method. All samples are 256x256 pixels

## 6 Experimental Results

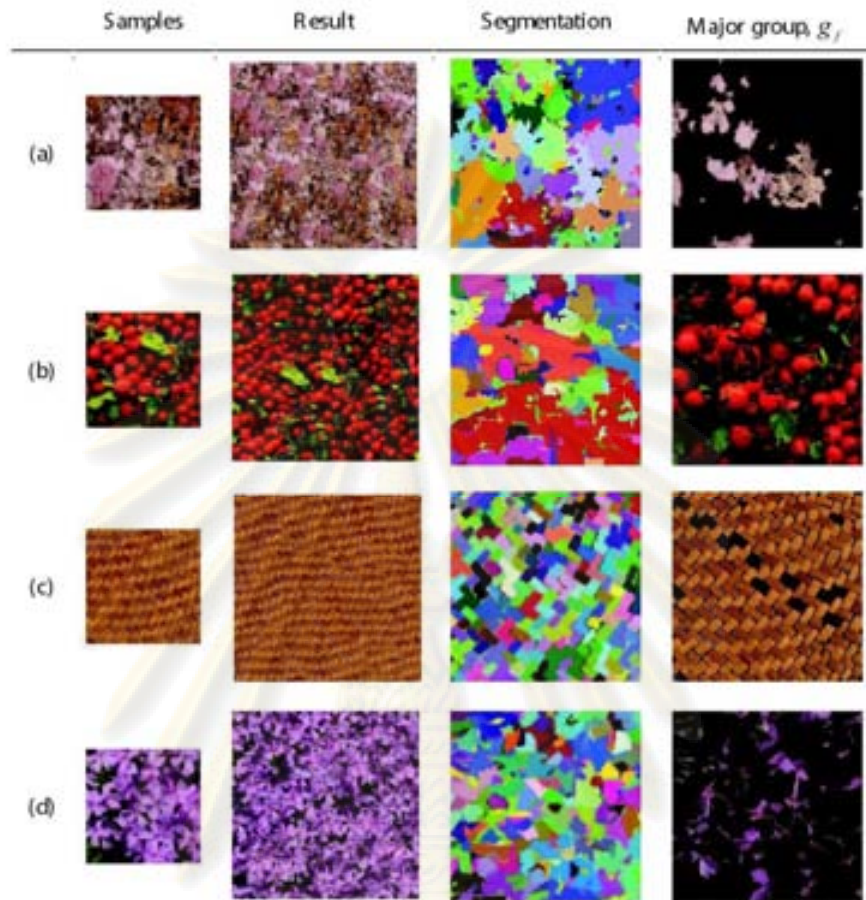
Our method is tested by implementing as an application. The application starts from estimating the suitable parameter values. Then we synthesize the bigger textures using normal patch-based texture synthesis and using graph-cut technique to blend the boundary between patches. Our experiments was to show the results of synthesis (512 x 512) textures from several samples having the same size (256 x 256). Each test case was measured the running time, synthesis time and show the final texture as shown in Figure 6. We also show the segmentation result and segments that is selected to be preserved in Figure 7. The results in Figure 6 show that our algorithm use less than two seconds to analyze a sample on a 1.5 GHz CPU. We also present the results texture using various parameters compared to parameters from our method in Figure 8 to show that parameters greatly affects the result quality. In test 1, we give too small parameters which result in texture that lose global feature. In test 2, we manually assign parameter. The results seem better but still contain some artifacts. In test 3, we give too big parameters which result in texture that have repeating pattern. More results can be accessed via <http://www.cp.eng.chula.ac.th/~g50jnr/>.

## 7 Discussion and Conclusion

As shown in Figure 6, because our method depends on the sample size only in segmentation step which has complexity in  $O(n \log n)$  where  $n$  is texture size and in analyze step, our analysis step has complexity in  $O(m^2)$  where  $m$  is number of segments. Compared to optimization method that uses  $O(n^3)$ , our method uses  $O(n \log n + m^2)$  which requires less computation time when using with larger texture, because the number of segments is very small compared to the number of pixels.

Since we use texture segmentation to extract all of the texture segments from sample. The segmentation step plays the most important part of our method. If segmentation fails to extract the feature, our method also fail to bring good value. There are some cases that the segmentation will fail. Blur samples and noises in texture cause incorrect segment boundaries. Since we use fixed parameters for segmentation, there is some texture that did not suitable with selected parameters such as texture that has too small elements, the segments from segmentation will have more than 1 elements in each





**Figure 7:** Result textures using estimated parameters from our method. All samples are  $256 \times 256$  pixels and the results are  $512 \times 512$  pixels

segment which leads to bigger segments. Our limitations from segmentation are shown in Figure 9.

Our result quality also depends on the feature of textures. If the textures don't contain repeating feature, our method will fail to select the feature. The stochastic textures are very hard to define which is the suitable patch size, but because of the stochastic property, a wide range of parameter can be used without affecting the quality of result. In this case, our segmentation algorithm will try to find the feature that have color intensities different from other part of samples. The segmentation result may seem incorrect, but due to wide range of possible patch size and boundary size value, our method gives acceptable result as shown in Figure 10.

Another case is non-homogeneous texture such as textures that have shading from lighting. The sample is shown in Figure 9 (b). Because of wide range of color intensity, segmentation algorithm could separate the segments in to many groups and leads to inconsistency of the texture feature. Texture that has feature in arbitrary sizes also cause losing feature that is bigger than feature that we

selected such as texture Figure 7 (a). The segment boundary is also affects segmentation too, segmentation result is not valid due to soft boundary between cloud and sky as shown in Figure 9 (c).

Our feature selection algorithm may fail to select the suitable feature in some textures because some texture have very small feature or some textures do not have uniformly distributed feature. Some textures may have many feature that should be preserved in different size but with patch-based technique, we can define only one patch size and boundary zone, so our method may be failed to selected the feature that user need to be preserved. To solve this problem, our method provides the way for user to choose the feature group when selection algorithm failed.

Our method can be improved in several ways. We can adopt other rules to combine small segments with larger segment to improved segmentation quality. Distance function in classification could be improved by including segment size or compute distance based on histogram instead of using average color.

In this paper we introduced a new parameter estimation model for

the patch-based texture synthesis which is more faster than Markov Random Field (MRF) [Li 1994]. Our model can compute the main feature using segments in input texture. The relations between each segment are analyzed to find the optimal value for the two parameter values for patch-based texture synthesis using the minimum distance between each neighboring pair of segments and the size of each segment. The advantage of the proposed method is the reduced analysis time for large input texture.

## References

- ARYA, S., MOUNT, D. M., NETANYAHU, N. S., SILVERMAN, R., AND WU, A. Y. 1998. An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching fixed dimensions. *J. ACM* 45, 6, 891–923.
- BONET, J. S. D. 1997. Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 361–368.
- CLASON, R. 1990. *Finding clusters: an application of the distance concept*. The Mathematic Teacher.
- EROS, A. A., AND FREEMAN, W. T. 2001. Image quilting for texture synthesis and transfer. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, 341–346.
- EROS, A. A., AND LEUNG, T. K. 1999. Texture synthesis by non-parametric sampling. In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision - Volume 2 - Volume 2*, IEEE Computer Society, 1033.
- FELZENSZWALB, P. F., AND HUTTENLOCHER, D. P. 2004. Efficient graph-based image segmentation. *Int. J. Comput. Vision* 59, 2, 167–181.
- HIEGER, D. J., AND BERGEN, J. R. 1995. Pyramid-based texture analysis/synthesis. In *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, 229–238.
- KWATKA, V., SCHULZ, A., ESSA, I., TURK, G., AND BOBICK, A. 2003. Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts. *ACM Trans. Graph.* 22, 3, 277–286.
- LI, S. Z. 1994. Markov random field models in computer vision. In *ECCV (2)*, 361–370.
- LIANG, L., LIU, C., XU, Y.-Q., GUO, B., AND SHUM, H.-Y. 2001. Real-time texture synthesis by patch-based sampling. *ACM Trans. Graph.* 20, 3, 127–150.
- NAKKEDEJ, J., AND KANONGCHAIYOS, P. 2008. Fast and robust parameter evaluation method for patch-based texture synthesis. ACM.
- PORTELLA, J., AND SIMONCELLI, E. P. 2000. A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients. *Int. J. Comput. Vision* 40, 1, 49–70.
- WANG, Y., WANG, W., AND WU, E. 2006. Optimizing the parameters for patch-based texture synthesis. In *Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications*, ACM, Hong Kong, China, 75–82.
- WEI, L.-Y., AND LEVOY, M. 2000. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. In *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 479–488.
- XU, Y., ZHU, S., GUO, B., AND SHUM, H. 2001. Asymptotically admissible texture synthesis. In *Second International Workshop of Statistical and Computational Theories of Vision*.
- ZHU, S. C., LIU, X. W., AND WU, Y. N. 2000. Exploring texture ensembles by efficient markov chain monte carlo-toward a 'trichromacy' theory of texture. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 22, 6, 554–569.


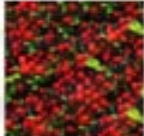
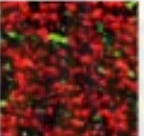
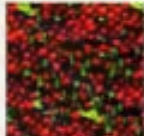
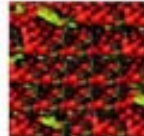


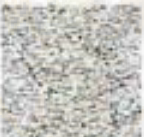








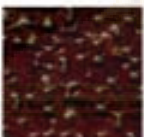
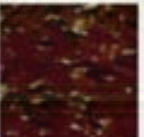


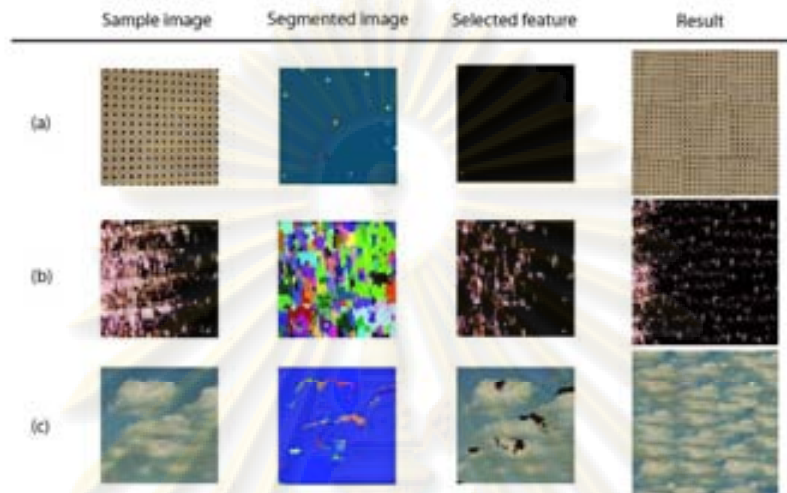
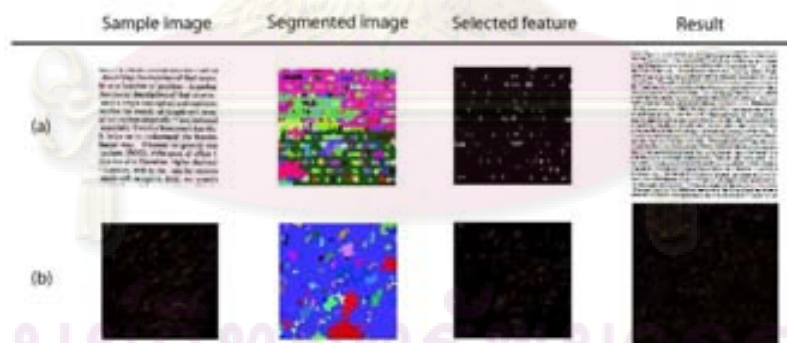
Sample	Optimal	Test 1	Test 2	Test 3
	 $\alpha = 72 \times 64$ $\beta = 20 \times 16$	 $\alpha = 10 \times 10$ $\beta = 2 \times 2$	 $\alpha = 50 \times 50$ $\beta = 10 \times 10$	 $\alpha = 150 \times 150$ $\beta = 50 \times 50$
	 $\alpha = 72 \times 77$ $\beta = 6 \times 5$	 $\alpha = 10 \times 10$ $\beta = 2 \times 2$	 $\alpha = 80 \times 20$ $\beta = 10 \times 2$	 $\alpha = 150 \times 150$ $\beta = 50 \times 50$
	 $\alpha = 82 \times 58$ $\beta = 22 \times 14$	 $\alpha = 20 \times 10$ $\beta = 6 \times 4$	 $\alpha = 30 \times 100$ $\beta = 10 \times 20$	 $\alpha = 100 \times 100$ $\beta = 50 \times 50$
	 $\alpha = 82 \times 58$ $\beta = 22 \times 14$	 $\alpha = 20 \times 20$ $\beta = 4 \times 4$	 $\alpha = 50 \times 30$ $\beta = 20 \times 10$	 $\alpha = 150 \times 150$ $\beta = 50 \times 50$

Figure 8: Results using parameters from our method compared to other possible parameters

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**Figure 9:** Limitations of our method; (a) texture that has too small feature, (b) non-homogeneous texture, (c) texture that is difficult to define segment boundary



**Figure 10:** Textures that failed in segmentation but still gives good results; (a) we only get some of the feature that should be all of characters in sample, (b) stochastic sample

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนนิพนธ์

นายจักรพงษ์ นาคเดช เกิดวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และในปีการศึกษา 2549 จึงสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ เกียรตินิยมอันดับสอง และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย