

เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลโดยใช้คุณลักษณะเด่นสำหรับรูปภาพ
ที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉาย

FEATURE-BASED DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR
PROJECTIVE-TRANSFORMED IMAGES

ณัฐพล พันธุ์วงศ์
NATAPON PANTUWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-9286-3

เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลโดยใช้คุณลักษณะเด่นสำหรับรูปภาพ
ที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉาย

FEATURE-BASED DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR
PROJECTIVE-TRANSFORMED IMAGES

ณัฐพล พันธุ์วงศ์

NATAPON PANTUWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2236-3

**FEATURE-BASED DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR
PROJECTIVE-TRANSFORMED IMAGES**

NATAPON PANTUWONG

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

2006

ISBN 974-15-2236-3

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัล โดยใช้คุณลักษณะเด่นสำหรับ รูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉาย
นักศึกษา	นายณัฐพล พันธุ์วงศ์
รหัสประจำตัว	46066201
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศ
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นพพร โชติภักดิ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการสร้างลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉาย ซึ่งพื้นที่ในการฝังลายน้ำดิจิทัลสามารถสร้างได้จากตำแหน่งของจุดที่มีลักษณะเด่น หรือ จุดพีเจอร์ภายในรูปภาพ โดยจุดที่มีลักษณะเด่นที่นำมาใช้ในการกำหนดพื้นที่การฝังลายน้ำดิจิทัล จะเป็นจุดที่มีลักษณะเด่นที่ตรงกันระหว่างจุดที่มีลักษณะเด่นในรูปภาพต้นฉบับ และจุดที่มีลักษณะเด่นในรูปภาพที่ผ่านการปรับขนาด จุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการคัดเลือกและมีลักษณะเด่นสูงจะถูกนำมาใช้เป็นจุดศูนย์กลางในการคำนวณหาพื้นที่ในการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ นำเสนอวิธีการคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสมต่อการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยที่ตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้นสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราส่วนไขว้ และตำแหน่งของจุดตัดของเส้นตรง เนื่องจากคุณสมบัติทั้งสองมีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย ในส่วนของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นปัญหาการค้นหาตำแหน่งของจุดที่มีลักษณะเด่น และพื้นที่การฝังลายน้ำดิจิทัลเป็นสิ่งสำคัญ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการค้นหาตำแหน่งของจุดที่มีลักษณะเด่น และพื้นที่ที่ใช้ในการฝังลายน้ำดิจิทัลอย่างเป็นระบบเพื่อลดความซับซ้อนในการค้นหาในส่วนของกระบวนการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล ในการวิจัยได้ทำการศึกษาการนำวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้เพื่อการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพ และการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลอีกด้วย

Thesis	Feature-based Digital Watermarking Technique for Projective-transformed Images
Student	Natapon Pantuwong
Student ID	46066201
Degree	Master of Science
Programme	Information Technology
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Nopporn Chotikakamthorn

ABSTRACT

This thesis describes a digital watermarking technique for projective-transformed images. The method calculates the embedded area from the image's selected featured points. The selected featured points are chosen from point correspondence between an original image and its scaled version. These selected featured points are used to construct the quadrilateral area in the image by using the salient feature point as a center point for quadrilateral tessellation. For each quadrilateral area, the watermark embedding location could be calculated by the projective invariant properties of a cross-ratio and the position of line intersection point. In the watermark detecting process, searching for the image's featured points and the quadrilateral area used in the embedding process is important and very complicated. This research introduces a systematic searching algorithm to reduce the time and complexity of the watermark detection process. In addition to the developed method described above, it was applied to detect a watermark in images obtained through scanning and photographing with a digital camera.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ก็เพราะได้รับการสนับสนุน และความช่วยเหลือจากบุคคลเหล่านี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา(แม้ขณะนี้ท่านจะอยู่บนสรวงสวรรค์ ข้าพเจ้าก็เชื่อว่าท่านจะยังคงคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดไป) และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นพพร โชติกคำธร ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า เป็นอย่างมาก สำหรับคำปรึกษาต่างๆ อีกทั้งยังให้การสนับสนุนเอกสาร และอุปกรณ์ในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำงานตั้งแต่นั้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการสื่อประสมและระบบเสมือน ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา รวมทั้งขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่อยู่รอบข้างในชีวิต ข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าในวันที่รู้สึกท้อแท้

อนึ่ง งานวิจัยที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ส่วนหนึ่งกระทำภายใต้ห้องปฏิบัติการสื่อประสมและระบบเสมือน (Multimedia and Virtual Research Laboratory) สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆ รวมทั้งทุนในการนำเสนอผลงานวิจัยในต่างประเทศ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐพล พันธุ์วงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ลายน้ำดิจิตอลและการแปลงเชิงภาพฉาย.....	5
2.1 ลายน้ำดิจิตอล.....	5
2.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของลายน้ำดิจิตอล.....	6
2.1.2 รูปแบบการนำลายน้ำดิจิตอลไปใช้ประโยชน์.....	7
2.1.3 ประเภทของลายน้ำดิจิตอล.....	7
2.1.4 ตัวอย่างวิธีการฝังลายน้ำดิจิตอล.....	8
2.1.4.1 วิธีแอลเอสบี (LSB : Least Significant Bit).....	9
2.1.4.2 วิธีการแผ่สเปกตรัม (Spread spectrum watermark).....	9
2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต.....	11
2.2.1 การแปลงเชิงสัมพรรคและการแปลงเชิงภาพฉาย.....	11
2.2.2 ค่าอัตราส่วนไขว้.....	15
2.3 การพิมพ์ภาพและการถ่ายภาพ.....	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1 การพิมพ์ภาพ	16
2.3.2 การถ่ายภาพ	17
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3.1 การฝังลายนํ้าคิจิตอลโดยการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบปกติ.....	19
3.2 การฝังลายนํ้าคิจิตอลในขอบเขตที่มีความทนทาน	20
3.3 การฝังลายนํ้าคิจิตอลโดยใช้แม่แบบ	21
3.4 การฝังลายนํ้าคิจิตอลโดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่น	22
3.5 การฝังลายนํ้าคิจิตอลโดยใช้ค่าอัตราส่วนไขว้.....	23
บทที่ 4 ลายนํ้าคิจิตอลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย	26
4.1 การฝังลายนํ้าคิจิตอลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย	26
4.1.1 การคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ	27
4.1.2 การคัดเลือกจุดศูนย์กลางเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม	30
4.1.3 การสร้างและการคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยม	33
4.1.4 การฝังลายนํ้าคิจิตอล.....	43
4.2 การค้นหาพื้นที่ฝังลายนํ้าคิจิตอลสำหรับการตรวจจับลายนํ้าคิจิตอล	46
4.2.1 การคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ	47
4.2.2 การคัดเลือกจุดศูนย์กลางเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม	48
4.2.3 การค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมและการตรวจจับลายนํ้าคิจิตอล.....	49
บทที่ 5 ผลการทดลอง	54
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	54
5.2 การทดลอง	55
5.2.1 การทดลองเพื่อพิจารณาค่าจำนวนจุดศูนย์กลางและจำนวนของจุดที่มี ลักษณะเด่นที่ติดกันที่เหมาะสมเพื่อใช้ในขั้นตอนการตรวจจับลายนํ้า คิจิตอล	55

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2.2	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการแปลงเชิงภาพฉายด้วยการใช้วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลในงานวิจัย Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points.....	57
5.2.3	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการแปลงเชิงภาพฉายด้วยการใช้วิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น.....	58
5.2.4	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการหมุนภาพ.....	60
5.2.5	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการปรับขนาดภาพ.....	63
5.2.6	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการตัดแบ่งส่วนภาพ.....	64
5.2.7	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการเพิ่มสัญญาณรบกวน.....	66
5.2.8	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ.....	68
5.2.9	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพ.....	69
5.2.10	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ.....	72
5.2.11	การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการแปลงเชิงภาพฉายสำหรับรูปภาพอื่นๆ.....	83
5.2.12	การวิเคราะห์ความซับซ้อนในการค้นหาพื้นที่สีเหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัล.....	85
5.2.12.1	ความซับซ้อนของการค้นหาแบบทั้งหมด.....	85
5.2.12.2	ความซับซ้อนในการค้นหาด้วยการใช้ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง.....	86
5.2.12.3	ความซับซ้อนในการค้นหาด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น.....	86
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	89
6.2	ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคต.....	92

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก. รูปภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	96
ภาคผนวก ข. บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	98
ประวัติผู้เขียน	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รูปแบบการแปลงที่เกิดขึ้นในการแปลงเชิงสัมพรรค และการแปลงเชิงภาพฉาย.....	14
2.2 คุณสมบัติที่มีความทนทานภายใต้การแปลงเชิงสัมพรรค และการแปลงเชิงภาพฉาย.....	15
4.1 การเปรียบเทียบค่าความต่างของมุมภายในกับมุมฉาก และขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสม ในกรณีที่ทำกาารฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลจำนวน 1600 จุด	41
5.1 ผลการทดลองการพิจารณาจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอมที่มากที่สุด.....	56
5.2 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการแปลงเชิงภาพ ฉายด้วยการใช้วิธีเทสเซลเลชันของเคอร์ลีย์.....	58
5.3 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการ แปลงเชิงภาพฉาย.....	59
5.4 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการหมุนภาพ.....	61
5.5 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการ ปรับขนาดภาพ.....	63
5.6 ผลการทดลองการค้นหาพื้นที่ที่ฝังลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการ ตัดแบ่งส่วนภาพ.....	66
5.7 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการ เพิ่มสัญญาณรบกวน.....	67
5.8 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการ บีบอัดข้อมูลรูปภาพ.....	68
5.9 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพด้วย ความละเอียด 300 จุดต่อนิ้ว.....	71
5.10 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพด้วย ความละเอียด 100 จุดต่อนิ้ว.....	72
5.11 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง.....	75
5.12 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง.....	76
5.13 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง.....	77

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.14 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง .78	
5.15 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ.....79	
5.16 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ.....80	
5.17 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ.....81	
5.18 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วย ความละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ.....82	
5.19 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการแปลงเชิงภาพ ฉาย สำหรับรูปภาพอื่นๆ84	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 จำนวนเอกสารเกี่ยวกับลายน้ำดิจิทัลที่ถูกตีพิมพ์ตั้งแต่ปีค.ศ.1990 ถึงปีค.ศ. 1999.....	1
2.1 การเทียบเคียงระหว่างระบบลายน้ำดิจิทัลและระบบการสื่อสาร	5
2.2 การฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัม	10
2.3 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัม.....	10
2.4 การฉายเชิงตั้งฉาก (Orthogonal projection	12
2.5 การฉายเชิงทัศนมิติ (Perspective projection	12
2.6 การฉายเชิงทัศนมิติ (ก) มุมมองสามมิติ (ข) มุมมองด้านบน และ (ค) มุมมองด้านข้าง.....	13
2.7 (ก) จุดสี่จุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน และ (ข) เส้นตรงสี่เส้นที่มาบรรจบกัน.....	15
3.1 ระบบการสร้างลายน้ำดิจิทัลโดยการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน	19
3.2 ระบบการสร้างลายน้ำดิจิทัลในโดเมนที่มีความทนทาน.....	21
3.3 ระบบการสร้างลายน้ำดิจิทัลโดยใช้วิธีการทดสอบเลขฐานของเคอร์ลออนซ์	22
3.4 ตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลปฐมภูมิ	23
3.5 แสดงการคำนวณหาตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัล	24
4.1 กระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย	27
4.2 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ.....	28
4.3 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ.....	28
4.4 ผลการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากภาพต้นฉบับที่มีการปรับขนาด	29
4.5 จุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการคัดแยกจากรูปภาพ	30
4.6 จุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการคัดแยกจากรูปภาพและผ่านการคัดเลือกแล้ว	30
4.7 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการคัดเลือกจุดศูนย์กลาง	31
4.8 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการคัดเลือกจุดศูนย์กลาง	32
4.9 จุดที่มีลักษณะเด่นที่ถูกคัดเลือกเป็นจุดศูนย์กลางเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม	33
4.10 การกระของตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัล (ก)รูปทรงที่เป็นคอนเว็กซ์-ฮัล (ข)รูปทรงที่เป็น คอนเคฟ.....	34
4.11 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล	35
4.12 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล	36
4.13 ตัวอย่างการคำนวณหามุมของแต่ละจุดที่มีลักษณะเด่น	37
4.14 ตัวอย่างการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล.....	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การพิจารณารูปทรงสี่เหลี่ยม โดยใช้ผลคูณภายในของเวกเตอร์ (ก) รูปทรงที่เป็นคอนเวกซ์ซัด (ข) รูปทรงที่ไม่เป็นคอนเวกซ์ซัด.....	38
4.16 การพิจารณาค่ามุมภายในของพื้นที่สี่เหลี่ยม	39
4.17 การคำนวณหาขนาดพื้นที่สี่เหลี่ยมใดๆ.....	40
4.18 การพิจารณาจุดว่าอยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมหรือไม่ (ก) จุดอยู่ภายในรูปทรงสี่เหลี่ยม (ข) จุดไม่ อยู่ภายในรูปทรงสี่เหลี่ยม	41
4.19 จุดเริ่มต้นในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมถัดไปหลังจากผ่านการพิจารณารูปทรงสี่เหลี่ยมก่อนหน้า แล้ว (ก) รูปทรงสี่เหลี่ยมก่อนหน้ามีความเหมาะสม (ข) รูปทรงสี่เหลี่ยมก่อนหน้าไม่มีความ เหมาะสม	42
4.20 พื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล.....	42
4.21 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัล.....	43
4.22 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัล	44
4.23 ตัวอย่างรูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัล (ก) พิจารณาค่ากำลังลายน้ำด้วยลักษณะของรูปภาพ (ข) ไม่พิจารณาค่ากำลังลายน้ำด้วยลักษณะของรูปภาพ	46
4.24 กระบวนการการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล.....	47
4.25 จุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาจากรูปภาพที่ถูกบิดเบือน	47
4.26 จุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดเลือกมาเป็นจุดศูนย์กลาง	48
4.27 การทำงานของอัลกอริทึมการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำ	49
4.28 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำ.....	50
4.29 จุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กันเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล ..	51
4.30 การเลื่อนชุดข้อมูลการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยม (ก) พบพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) ไม่พบพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ฝังลายน้ำดิจิทัล	53
5.1 ตัวอย่างรูปภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	54
5.2 ร้อยละของตำแหน่งจุดศูนย์กลางตำแหน่งต่างๆ ของรูปภาพต้นฉบับที่พบในรูปภาพที่ผ่านการ บิดเบือน.....	56

สารบัญญรูป(ต่อ)

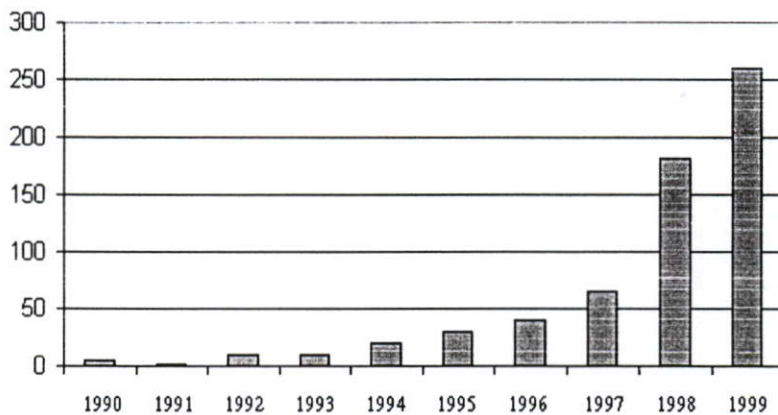
รูปที่	หน้า
5.3 ตัวอย่างรูปภาพที่ถูกบิดเบือนด้วยการแปลงเชิงภาพฉาย (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา (ง) มุมของการฉายเท่ากับ 20 องศา (จ) มุมของการฉายเท่ากับ 25 องศา (ฉ) มุมของการฉายเท่ากับ 30 องศา.....	57
5.4 ตัวอย่างรูปภาพที่ถูกบิดเบือนด้วยการหมุนภาพ (ก) มุมของการหมุนเท่ากับ 5 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ง) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศาตามเข็มนาฬิกา (จ) มุมของการฉายเท่ากับ 25 องศาตามเข็มนาฬิกา (ฉ) มุมของการฉายเท่ากับ 30 องศาตามเข็มนาฬิกา.....	61
5.5 ตัวอย่างรูปภาพที่ถูกบิดเบือน โดยการตัดแบ่งส่วนภาพ (ก) เหลือพื้นที่ร้อยละ 80 ของขนาดภาพต้นฉบับ (ข) เหลือพื้นที่ร้อยละ 90 ของขนาดภาพต้นฉบับ	65
5.6 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพ (ก) มุมของการหมุนเท่ากับ 5 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ข) มุมของการหมุนเท่ากับ 0 องศา (ค) มุมของการหมุนเท่ากับ 5 องศาตามเข็มนาฬิกา	70
5.7 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา	73
5.8 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1.5 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา	74
5.9 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา	74
5.10 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา	74
5.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนพื้นที่ที่ต้องตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแบบทั้งหมด , วิธีการค้นหาด้วยการใช้ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง และวิธีการค้นหาที่พัฒนาขึ้น.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตมีการพัฒนาขึ้นและมีผู้ใช้งานเป็นอย่างมากจึงส่งผลให้ข้อมูลต่าง ๆ ถูกเข้าถึงและนำไปใช้ได้โดยง่ายค้าย เพิ่มข้อมูลรูปภาพในรูปแบบดิจิทัลเป็นข้อมูลหนึ่งที่ถูกเข้าถึงและบางครั้งถูกแอบอ้างนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต เทคนิคการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลสำหรับสื่อประเภทรูปภาพจึงถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อที่จะทำการฝังข้อมูลลิขสิทธิ์ (Copyright) ของเพิ่มข้อมูลรูปภาพนั้นลงไป ในปัจจุบันเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลสำหรับสื่อประเภทรูปภาพ ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีกมากมายเช่น การเพิ่มข้อมูลประกอบเกี่ยวกับรูปภาพ (Data annotation) หรือ การฝังข้อมูลเพื่อตรวจสอบว่ารูปภาพนั้นได้ถูกคัดแปลงมาก่อนหรือไม่ (Authentication) การฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลได้เริ่มเป็นที่สนใจของนักวิจัยทั่วไปตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 โดยเริ่มเติบโตอย่างรวดเร็วในปี 1995 เรื่อยมา ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 จำนวนเอกสารเกี่ยวกับลายน้ำดิจิทัลที่ถูกตีพิมพ์ตั้งแต่ปีค.ศ.1990 ถึงปีค.ศ. 1999 [1]

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลคือ รูปภาพในส่วนของการตรวจจับลายน้ำมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งสาเหตุของการผิดเพี้ยนที่สำคัญสาเหตุหนึ่งคือการแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transform) เช่นการแปลงเชิงภาพฉาย (Projective transform) ซึ่งอาจจะเกิดจากการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพ หรืออาจจะเกิดจากการแปลงโดยตั้งใจของผู้ที่จงใจจะทำลายรูปภาพ และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลคือการประมวลผลภาพแบบต่างๆ เช่นการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ, การเพิ่มสัญญาณรบกวน (Noise) รวมทั้ง

การตัดแบ่งส่วนภาพ (Cropping) ซึ่งทำให้ข้อมูลบางส่วนของภาพหายไป อันอาจจะรวมถึงข้อมูลในส่วนที่ทำการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วย นอกจากนี้การพิมพ์ภาพและการแปลงรูปภาพกลับมาอยู่ในรูปแบบข้อมูลดิจิทัลจากการกวาดภาพและการถ่ายภาพ ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลเสียหายได้ จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและท้าทายในการพัฒนาแนวทางการสร้างลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนในรูปแบบต่างๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิทยานิพนธ์นี้คือเพื่อทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการสร้างข้อมูลลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานสูงเพื่อใช้ในงานรูปแบบต่างๆ โดยสามารถสรุปวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. ทำการศึกษา และพัฒนาวิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย (Projective Transform) โดยใช้ตำแหน่งของจุดที่คำนวณได้จากลักษณะเด่นภายในรูปภาพ (Feature point)
2. ทำการพัฒนาวิธีการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่น และคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างจากจุดที่มีลักษณะเด่นภายในรูปภาพที่เหมาะสมเพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัล
3. ทำการพัฒนาวิธีการค้นหาตำแหน่งของจุดที่มีลักษณะเด่นภายในรูปภาพที่ถูกใช้ในการลายน้ำดิจิทัล ในส่วนของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล
4. ทำการประเมินผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนแบบต่างๆ รวมทั้งการกวาดภาพ (Scan) และรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉายนั้น ไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการตรวจจับลายน้ำจากรูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงสัมพรรค (Affine transform) ทั้งนี้เนื่องจากการแปลงเชิงภาพฉายนั้นเป็นลักษณะโดยทั่วไป (Generalization) ของการแปลงเชิงสัมพรรคนั่นเอง งานวิจัยนี้จะเป็นการแก้ไขปัญหาดังนั้น โดยจะทำการคำนวณหาตำแหน่งพื้นที่สำหรับการฝังลายน้ำดิจิทัลภายในรูปภาพ โดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่นที่คำนวณจากลักษณะทางกายภาพของรูปภาพ โดยจุดที่มีลักษณะเด่นที่นำมาใช้นั้น จะต้องผ่านการคัดเลือกจากการค้นหาจุดที่ตรงกันระหว่างจุดที่มีลักษณะเด่นในรูปภาพต้นฉบับ และจุดที่มีลักษณะเด่นในรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนในบางรูปแบบ เช่นการปรับขนาดรูปภาพเป็นต้น จุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการคัดเลือกจะมีความทนทานเพียงพอต่อการบิดเบือนทางเรขาคณิตในรูปแบบต่าง ๆ เช่นการแปลงเชิงภาพฉายเป็นต้น สำหรับแต่ละพื้นที่การฝังลายน้ำดิจิทัลนั้นตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัล สามารถทำได้โดยการ

คำนวณตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลค่าอัตราส่วนไขว้ และจุดตัดของเส้นตรงซึ่งมีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย รวมทั้งการแปลงเชิงสัมพรรคด้วย ซึ่งจะทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความทนทานต่อการบิดเบือนเชิงเรขาคณิต รวมทั้งการตัดแบ่งส่วนภาพ

สำหรับปัญหาการเพิ่มสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดโดยความตั้งใจ หรือไม่ตั้งใจจากการถ่ายภาพ รวมทั้งการบีบอัดข้อมูลต่างๆ นั้นสามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีการฝังลายน้ำที่มีความทนทาน (Robust Watermark) เช่น การฝังลายน้ำวิธีการแผ่สเปกตรัม (Spread spectrum watermarking [6]) ซึ่งโดยแนวทางการแก้ปัญหานี้ จะทำให้สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉาย และการบิดเบือนอื่นๆ รวมทั้งการพิมพ์ภาพ และการถ่ายภาพได้

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้มีดังนี้

1. ขนาดของมุมของการฉาย (Projection) มีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล
2. ระดับของการปรับขนาดภาพมีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล
3. การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้จุดศูนย์กลางมากกว่าหนึ่งจุดจะเพิ่มความทนทานต่อการตัดแบ่งส่วนภาพได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉายโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) และภาพที่ผ่านการกราดภาพรวมทั้งการถ่ายภาพ โดยมีขอบเขตในการศึกษาดังนี้

1. ในการทดลองจะใช้รูปภาพระดับสีเทา (Grayscale image)
2. การทดลองเพื่อประเมินผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพหรือถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลนั้น จะต้องกราดภาพหรือถ่ายภาพตลอดทั้งรูปภาพ
3. ในการทดลองเพื่อการตัดแบ่งส่วนภาพ จะเป็นการตัดแบ่งส่วนภาพจากขอบของรูปภาพเข้ามาด้านละเท่าๆ กัน
4. กล้องถ่ายภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นกล้องถ่ายภาพดิจิทัลความละเอียด 5 ล้านพิกเซล

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ เป้าหมาย จุดประสงค์ และขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาทฤษฎี และหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

3. ศึกษาปัญหา และวิเคราะห์วิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น
4. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประกอบการทดลอง
5. ทำการทดลอง ปรับปรุง และสรุปผล
6. จัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการฝังลายน้ำดิจิทัลสำหรับสื่อประเภทรูปภาพ และทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยคือการแปลงเชิงเรขาคณิตซึ่งประกอบด้วย การแปลงเชิงสัมพรรค และการแปลงเชิงภาพฉาย รวมทั้งทฤษฎีการพิมพ์ภาพและการถ่ายภาพ

บทที่ 3 กล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นงานวิจัยในกลุ่มของการพัฒนาวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงเรขาคณิตจากอดีตจนถึงปัจจุบัน

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลสำหรับการแปลงเชิงภาพฉาย โดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่นที่ได้พัฒนาขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งการวิเคราะห์ค่าความซับซ้อนในการค้นหาตำแหน่งของจุดที่มีลักษณะเด่นที่ใช้ในการสร้างพื้นที่สำหรับการฝังลายน้ำดิจิทัล ในส่วนของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

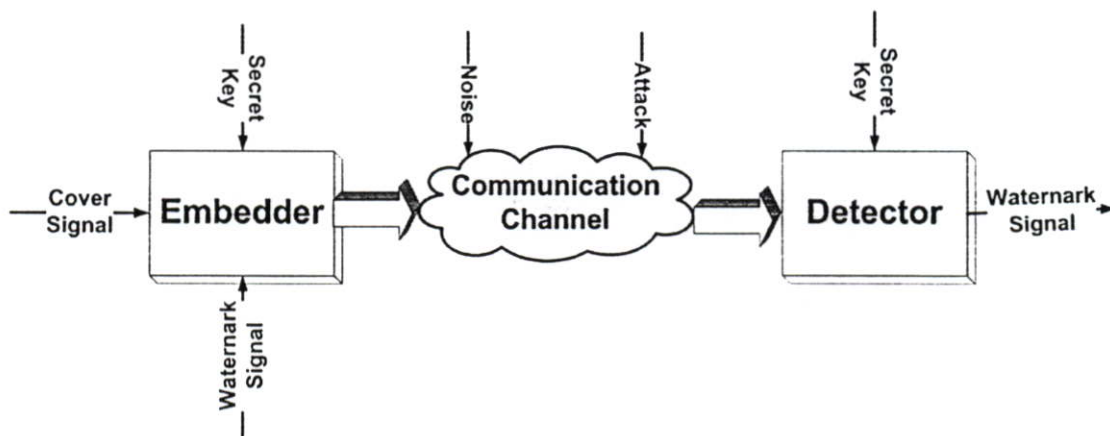
บทที่ 2

ลายน้ำดิจิทัลและการแปลงเชิงภาพฉาย

ในบทนี้ จะได้ทำการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลสำหรับข้อมูลสื่อประเภทรูปภาพรวมทั้งทฤษฎีพื้นฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลลงไปนีสื่อประเภทรูปภาพ คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับลายน้ำดิจิทัล ตัวอย่างวิธีการฝังและการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลลายน้ำดิจิทัล สุดท้ายคือทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเชิงเรขาคณิต ซึ่งประกอบด้วยแปลงเชิงสัมพรรคและการแปลงเชิงภาพฉาย, ทฤษฎีเบื้องต้นของการพิมพ์ภาพรวมถึงการถ่ายภาพซึ่งเป็นปัญหาหลักของงานวิทยานิพนธ์นี้

2.1 ลายน้ำดิจิทัล

ลายน้ำดิจิทัลคือรหัสข้อมูลแบบดิจิทัลที่ทำการบรรจุลงไปในสื่อประเภทต่างๆ เช่นรูปภาพ โดยที่ระบบของการสื่อสารด้วยข้อมูลลายน้ำดิจิทัลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเทียบเคียงระหว่างระบบลายน้ำดิจิทัลและระบบการสื่อสาร

ระบบการสื่อสารด้วยข้อมูลลายน้ำดิจิทัลจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนฝังข้อมูล (Embedder) ซึ่งเป็นส่วนในการฝังข้อมูลเข้าไปในรูปภาพที่ต้องการจะใช้ในการสื่อสาร โดยที่ข้อมูลเข้าของส่วนนี้คือเพิ่มข้อมูลรูปภาพที่ต้องการจะฝังลายน้ำดิจิทัล (Cover signal) และข้อมูลลายน้ำดิจิทัล (Watermark signal) สำหรับรหัสลับ (Watermark) จะถูกใช้เพื่อสร้างความปลอดภัยในการเข้าถึงลายน้ำดิจิทัล ซึ่งจะมีหรือไม่มีขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้และการนำลายน้ำดิจิทัลไปประยุกต์ใช้ เมื่อได้รูปภาพที่ผ่านการฝังข้อมูลเรียบร้อยแล้วรูปภาพนั้นจะสามารถนำไปใช้ในการ

สื่อสารได้โดยปกติ ซึ่งในระหว่างการสื่อสารอาจจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) หรือการโจมตีรูปภาพในรูปแบบต่างๆ (Attack) เกิดขึ้นทำให้ข้อมูลรูปภาพและข้อมูลลายน้ำดิจิทัลเสียหายได้ ซึ่งรูปภาพที่ผ่านการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลจะต้องมีความทนทานต่อสิ่งเหล่านี้ ส่วนสำคัญส่วนที่สองคือส่วนตรวจจับข้อมูลลายน้ำดิจิทัล (Detector) ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจจับและถอดข้อมูลลายน้ำดิจิทัลออกมาจากรูปภาพนั้น ๆ โดยที่หากมีการเข้ารหัสข้อมูลไว้ ก็จะต้องมีกระบวนการในการถอดรหัสด้วยโดยใช้รหัสลับ (Secret key) ที่ใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลมาใช้ในการถอดรหัส ซึ่งเมื่อผ่านการถอดรหัสและการถอดข้อมูลแล้วก็จะได้ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลตามที่ได้บรรจุลงไป

2.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของลายน้ำดิจิทัล [2][3][4][5]

การฝังลายน้ำดิจิทัลนั้นควรมีคุณสมบัติที่สำคัญ ๆ ดังนี้

1. ความทนทาน (Robustness) : ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลควรจะคงอยู่ในรูปภาพนั้นๆ ไม่ว่าจะเกิดอะไรขึ้นกับรูปภาพนั้นก็ตาม เช่นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของรูปภาพ, การโจมตีจากผู้ที่ต้องการจะทำลายรูปภาพเหล่านี้, การบีบอัดข้อมูล, การพิมพ์ภาพและการถ่ายภาพเป็นต้น แนวทางหนึ่งที่สามารถทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความทนทานสูงคือ การฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลเดียวกันลงในหลายๆ พื้นที่ของรูปภาพ รวมทั้งการให้กำลังงานของข้อมูลลายน้ำดิจิทัล (Watermark power) มีค่าสูงก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความทนทานมากขึ้น

2. การไม่ทำให้คุณสมบัติของภาพต้นฉบับสูญเสียไป (Imperceptibility) : คือรูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้ว และรูปภาพต้นฉบับจะต้องไม่แตกต่างกันหรือไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยประสาทการรับรู้ของมนุษย์ทั่วไปได้โดยง่าย ซึ่งวิธีที่จะทำให้ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลไม่ทำให้คุณสมบัติของภาพต้นฉบับสูญเสียไปคือ การควบคุมกำลังงานของข้อมูลลายน้ำดิจิทัลให้มีค่าน้อยไม่เกินขีดระดับความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์

3. ปริมาณข้อมูลที่สามารถบรรจุได้ (Capacity) รูปภาพที่ทำลายน้ำดิจิทัล ควรจะสามารถฝังข้อมูลได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ตามความต้องการของการนำไปประยุกต์ใช้

โดยที่คุณสมบัติที่สำคัญทั้งสามที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะมีคุณสมบัติที่แปรผกผัน (Trade-off) ซึ่งกันและกัน เช่นหากต้องการให้ข้อมูลมีความทนทานสูงและฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลได้มากมีความจำเป็นต้องเพิ่มกำลังของลายน้ำให้สูง ซึ่งมีผลให้ความสามารถในการซ่อนข้อมูลต่ำลง นอกจากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกเช่น

1. การเข้ารหัสลับ (Encryption) เพื่อทำให้ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลมีความปลอดภัยเพิ่มขึ้นต่อการเข้าถึงจากบุคคลที่ไม่ต้องการ โดยการเข้ารหัสนั้นควรใช้การเข้ารหัสแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical coding) เนื่องจากมีความยุ่งยากในการถอดรหัสมากกว่าการเข้ารหัสแบบสมมาตร (Symmetrical coding)

2. การเข้ารหัสตรวจจับความผิดพลาดของข้อมูล (Error detection code) หรือการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล (Error correction code) ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น

2.1.2 รูปแบบการนำลายน้ำดิจิทัลไปใช้ประโยชน์ [2][3][4][5]

ลายน้ำดิจิทัลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายรูปแบบ ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงรูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ดังนี้

1. การป้องกันสิทธิ์ (Copyright protection) : ในปัจจุบันรูปภาพสามารถถูกคัดลอกได้โดยง่าย ถึงแม้ว่าผู้ผลิตรูปภาพจะมีเอกสารเพื่อรับรองการเป็นเจ้าของก็ตาม ลายน้ำดิจิทัลสามารถนำมาช่วยเหลือได้ โดยการฝังข้อมูลเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของรูปภาพนั้นลงไปในรูปภาพโดยตรง

2. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปภาพ (Authentication) : ในการสื่อสาร รูปภาพต่างๆ สามารถถูกแก้ไขได้โดยง่าย ซึ่งหากรูปภาพนั้นมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ที่ต้องการความถูกต้องของข้อมูลสูงเช่นกระบวนการทางยุติธรรม ความถูกต้องของรูปภาพจะเป็นสิ่งที่สำคัญมาก การตรวจสอบความถูกต้องของรูปภาพกระทำได้โดยการฝังลายน้ำดิจิทัลลงไปในรูปภาพในบริเวณต่างๆ ซึ่งถ้าหากรูปภาพได้ผ่านการแก้ไขเปลี่ยนแปลงแล้วจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพนั้นได้

3. การเพิ่มข้อมูลประกอบ (Data annotation) : เป็นการเพิ่มข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับรูปภาพนั้นๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถค้นหาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปภาพนั้นๆ ต่อไปได้ เช่นการฝังข้อมูลรายละเอียดลงไปในป้ายประกาศต่างๆ เมื่อผู้พบเห็นทำการนำรูปภาพนั้นกลับเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ก็จะสามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเพื่อรับทราบถึงข้อมูลประกอบอื่นๆ ได้

2.1.3 ประเภทของลายน้ำดิจิทัล [1][2]

ลายน้ำดิจิทัลสามารถจำแนกตามคุณสมบัติของความสามารถในการซ่อนข้อมูลได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1. ลายน้ำดิจิทัลที่มองเห็นได้ (Visible watermark) : เป็นรูปแบบของลายน้ำดิจิทัลที่ใช้กันมากบนเว็บไซต์ และลายน้ำดิจิทัลดังกล่าวมีลักษณะเป็นชื่อหรือสัญลักษณ์ของบริษัทวางทับบนภาพดิจิทัล ซึ่งลายน้ำดิจิทัลนี้มีความคล้ายคลึงกับลายน้ำในกระดาษที่ใช้กันในธนบัตรหรือภาพวาด ดังนั้นจะมีผลประโยชน์ในกรณีที่เกี่ยวข้องถึงสิทธิความเป็นเจ้าของได้อย่างชัดเจน

2. ลายน้ำดิจิทัลที่มองไม่เห็น (Invisible watermark) : ลายน้ำดิจิทัลชนิดนี้นิยมใช้กันมากและเป็นการฝังข้อมูลบางอย่างเข้าไปในส่วนที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ของตัวข้อมูล เช่น ข้อความแสดงลิขสิทธิ์ หรือเลขลำดับ (Serial number) เป็นต้น โดยเป็นลายน้ำดิจิทัลที่ไม่สามารถมองเห็นได้

ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าลายน้ำดิจิทัลที่สามารถมองเห็นได้ เพราะภาพดิจิทัลที่ได้หลังจากการฝังลายน้ำดิจิทัลไม่ถูกลดคุณค่าและความสวยงามลง

นอกจากนี้ลายน้ำดิจิทัลยังสามารถจำแนกตามคุณสมบัติความทนทานได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ลายน้ำดิจิทัลเปราะบาง (Fragile watermark) : เป็นลายน้ำดิจิทัลที่ไม่มี ความทนทานต่อการบิดเบือนใดๆ ของรูปภาพเลขเช่น ในกรณีของการบีบอัดข้อมูลภาพดิจิทัล การกรองภาพดิจิทัล การแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงภาพดิจิทัล เป็นต้น

2. ลายน้ำดิจิทัลกึ่งเปราะบาง (Semi-Fragile watermark) : เป็นลายน้ำดิจิทัลที่คงทนต่อการบิดเบือนต่างๆ ได้ในระดับหนึ่ง จนกว่าที่ข้อมูลของภาพดิจิทัลนั้นได้เสียหายไปเองซึ่งเกิดจากการแปลงเชิงเรขาคณิต การซูมภาพดิจิทัลเข้าหรือออก การแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงภาพดิจิทัลด้วยการตัดแบ่งส่วนภาพ เป็นต้น

3. ลายน้ำดิจิทัลทนทาน (Robust Watermark) : เป็นลายน้ำดิจิทัลคงทนต่อการใช้งานทั่วไป สามารถทนต่อการบีบอัดภาพดิจิทัล การตัดแบ่งส่วนภาพ การปรับขนาดภาพ การกรองภาพ การแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงภาพดิจิทัลต่างๆ ซึ่งลายน้ำดิจิทัลชนิดนี้หลังจากนำภาพดิจิทัลไปประมวลผลต่างๆ แล้ว ลายน้ำดิจิทัลจะยังคงอยู่ไม่เสียหายแต่อย่างใด

2.1.4 ตัวอย่างวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัล [2][4][6]

ในปัจจุบันมีวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่ได้ถูกนำเสนอออกมาอย่างมากมาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป้าหมายของวิธีเหล่านั้นคือเพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทาน และความสามารถในการซ่อนข้อมูลที่ดีพอสมควร

การฝังลายน้ำดิจิทัลนั้น จะใช้ประโยชน์จากข้อจำกัดของระบบการมองเห็นของมนุษย์ (Human visual system) กล่าวคือส่วนรับแสงของดวงตามนุษย์ (Retina) จะประกอบด้วยส่วนที่ไวต่อการรับรู้ข้อมูลภาพ (Photo receptors) ซึ่งแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ร็อด (Rods) และ โคน (Cones) โดยส่วนเซลล์ร็อดจะมีความไวต่อความเข้มแสงทำให้สามารถมองเห็นความแตกต่างทางด้านความสว่างของสี ส่วนเซลล์โคนนั้นจะมีความไวต่อแสงสีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งการรับรู้ของมนุษย์นั้น จะไม่สามารถรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงความสว่างของสีเพียงเล็กน้อยได้ รวมทั้งจะรับรู้ถึงความเปลี่ยนแปลงในแสงสีน้ำเงินน้อยกว่าแสงสีอื่นๆ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วการฝังลายน้ำดิจิทัลในขอบเขตทางพื้นที่ (Spatial domain) จะทำการแก้ไขรูปภาพเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลในส่วนของสีน้ำเงินสำหรับภาพสี และความสว่างของรูปภาพสำหรับภาพระดับสีเทา โดยจะทำการแก้ไขข้อมูลภาพเพียงเล็กน้อย ซึ่งทำให้มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้ ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่ใช้งานโดยทั่วไป 2 วิธีดังนี้

2.1.4.1 วิธีแอลเอสบี (LSB: Least Significant Bit) [2][4]

วิธีแอลเอสบีนี้เป็นวิธีในการฝังข้อมูลลงในรูปภาพที่ง่าย และเป็นที่ยอมรับมากที่สุดวิธีหนึ่ง ซึ่งหลักการทำงานคือจะนำข้อมูลลายน้ำดิจิตอลแต่ละบิตเข้าไปเก็บไว้ในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุดของแต่ละไบต์ข้อมูลของรูปภาพ การแก้ไขในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุดนี้รูปภาพจะไม่ถูกแก้ไขมากเกินไปซึ่งจะมีผลให้ผู้พบเห็นรูปภาพจะไม่รับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ตัวอย่างการทำงานของวิธีแอลเอสบีเช่นหากต้องการฝังข้อมูล 01000001 ลงไปในรูปภาพ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลรูปภาพทั้งหมด 8 ไบต์ หากข้อมูลทั้ง 8 ไบต์ของรูปภาพเป็นดังแสดงด้านล่าง

(00100111 11101001 11001000)

(00100111 11001000 11101001)

(11001000 00100111)

กำหนดให้บิตที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุดในกรณีนี้คือ บิตสุดท้ายของแต่ละไบต์ข้อมูล ดังนั้นข้อมูลรูปภาพหลังการฝังลายน้ำดิจิตอลคือ

(00100110 11101001 11001000)

(00100110 11001000 11101000)

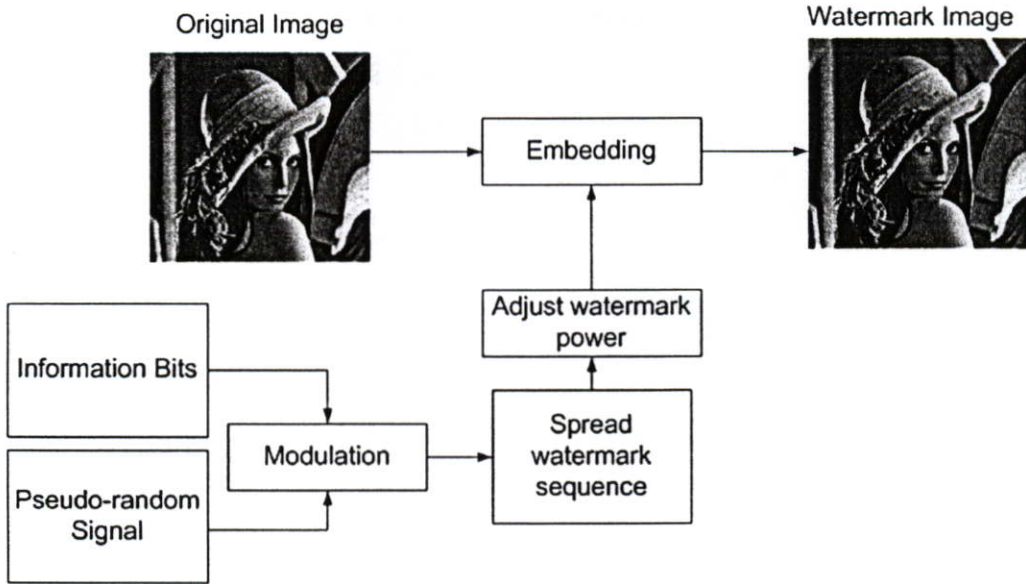
(11001000 00100110)

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าวิธีการแอลเอสบีนี้จะสามารถฝังข้อมูลลายน้ำดิจิตอลได้มาก เช่นหากรูปภาพมีขนาดความกว้าง 100 พิกเซล และความสูง 100 พิกเซลจะสามารถฝังข้อมูลลายน้ำดิจิตอลได้ 10,000 บิต แต่ว่าการฝังลายน้ำดิจิตอลลงไปเพียงตำแหน่งเดียวของแต่ละบิต รวมทั้งการฝังลายน้ำดิจิตอลลงไปโดยการแก้ไขบิตที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุดนี้ จะส่งผลให้ลายน้ำดิจิตอลมีความทนทานต่ำ กล่าวคือหากมีการแก้ไขรูปภาพเพียงเล็กน้อยข้อมูลลายน้ำดิจิตอลที่ฝังไว้ก็จะถูกทำลายไปทันที

2.1.4.2 วิธีการแผ่สเปกตรัม (Spread spectrum watermark) [6]

เทคนิคการสื่อสารแบบแผ่สเปกตรัมได้ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อใช้ในการสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัย และความถูกต้อง โดยในการสื่อสารแบบการแผ่สเปกตรัมนั้นข้อมูลที่ต้องการจะส่งออกจะถูกเข้ารหัส แล้วทำการกล้ำสัญญาณ (Modulate) เข้ากับคลื่นพาห้ (Carrier) ตลอดทั่วทั้งแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลที่ส่งไปนั้นมีความทนทานและปลอดภัยสูงขึ้น อีกทั้งยังยากต่อการตรวจจับด้วยเนื่องจากว่าไม่จำเป็นต้องใช้กำลังส่งสูงจนเกินไป

สำหรับการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิตอลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัม ก็สามารถทำได้ด้วยหลักการเดียวกัน โดยขั้นตอนการฝังลายน้ำดิจิตอลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

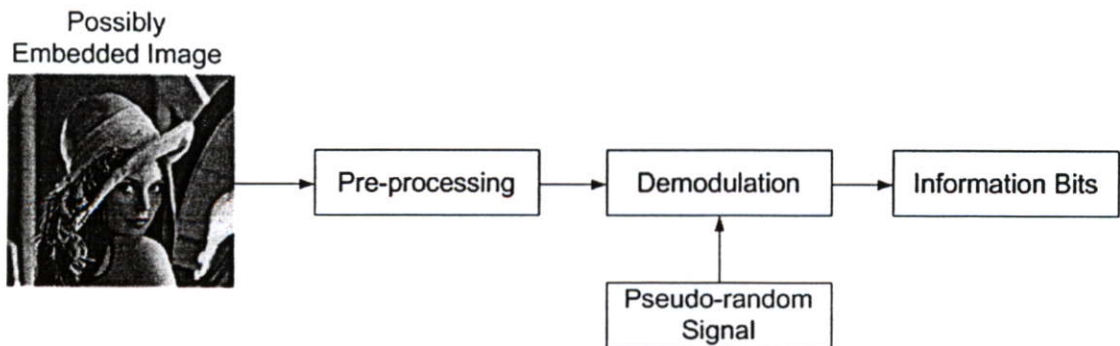


รูปที่ 2.2 การฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัม

โดยข้อมูลที่ต้องการจะฝังลายน้ำดิจิทัลแต่ละบิต จะถูกนำมาคูณกับสัญญาณรบกวนสุ่มแบบเสมือน (Pseudo-random signal) และนำไปปรับขนาดกำลังของลายน้ำดิจิทัลก่อนจะนำไปฝังลงในรูปภาพ โดยถ้ากำหนดให้ตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัลคือ $p_i^c, i=1,2,\dots,N$ โดยที่ N คือจำนวนบิตของลายน้ำดิจิทัล และให้ลายน้ำดิจิทัลคือ $W_i \in \{1,-1\}, i=1,2,\dots,N$ แล้วรูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัล $I_e(x_i, y_i)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$I_e(x_i, y_i) = I(x_i, y_i) + (\alpha \cdot W_i) \quad (2.1)$$

โดยที่ $I(x_i, y_i)$ คือรูปภาพก่อนการฝังลายน้ำดิจิทัล, (x_i, y_i) คือตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัล p_i^c และ α คือค่ากำลังของลายน้ำดิจิทัล



รูปที่ 2.3 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัม

สำหรับขั้นตอนในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 กล่าวคือรูปภาพที่คาดว่ามีการฝังลายน้ำดิจิทัลเอาไว้ จะถูกนำมาผ่านกระบวนการเตรียมการประมวลผล (Pre-processing) โดยการแยกเอาค่าความสว่างของรูปภาพในตำแหน่งที่ฝังลายน้ำดิจิทัลออกมาจากรูปภาพ ซึ่งในขั้นตอนนี้ถ้าหากมีรูปภาพต้นฉบับอยู่แล้วจะสามารถนำมาหาค่าความแตกต่างของความสว่างของทั้งสองรูปภาพซึ่งมีผลให้การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จากนั้นนำค่าความสว่างที่คัดแยกออกมาได้มาทำการแยกสัญญาณ (Demodulate) กับสัญญาณสุ่มแบบเสมือน โดยสามารถพิจารณาการมีอยู่ของลายน้ำดิจิทัลได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ระหว่างข้อมูลรูปภาพที่ต้องการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลและข้อมูลสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม โดยสมการในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเป็นดังสมการที่ 2.2

$$C(I'_e, W) = \frac{\sum_{i=1}^N (I'_e(x_i, y_i) - \bar{I}'_e(x_i, y_i)) \cdot (W(i) - \bar{W})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I'_e(x_i, y_i) - \bar{I}'_e(x_i, y_i))^2 \cdot \sum_{i=1}^N (W(i) - \bar{W})^2}} \quad (2.2)$$

โดยที่ (x_i, y_i) คือตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัลที่คำนวณจากรูปภาพ $I'_e(x_i, y_i)$, $\bar{I}'_e(x_i, y_i)$ คือค่าเฉลี่ยของค่าความสว่างของรูปภาพ $I'_e(x_i, y_i)$ และ \bar{W} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลลายน้ำดิจิทัล ลายน้ำดิจิทัลจะถูกตรวจจับได้เมื่อค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเกินกว่าค่าขีดแบ่ง (Threshold) ที่ตั้งไว้

วิธีการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัมนี้ เป็นวิธีที่มีความทนทานต่อการใช้งานสูง และเป็นที่ยอมรับนำไปใช้ในช่องทางการสื่อสารที่ต้องการความทนทานของลายน้ำดิจิทัลสูงๆ

2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอถึงทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเชิงเรขาคณิต ซึ่งประกอบด้วยการแปลงเชิงสัมพรรคและการแปลงเชิงภาพฉาย อันเป็นปัญหาหลักของงานวิจัยนี้

2.2.1 การแปลงเชิงสัมพรรคและการแปลงเชิงภาพฉาย[7]

การแปลงเชิงสัมพรรค (Affine transform) จะประกอบไปด้วยการส่งจุดภาพ (Mapping) แบบเชิงเส้นของทั้งรูปภาพ อันได้แก่ การหมุนภาพ, การปรับขนาดรูปภาพ, การเอียงของรูปภาพ และการเลื่อนตำแหน่งภายในรูปภาพ โดยการแปลงเชิงสัมพรรคจะมีคุณสมบัติดังนี้

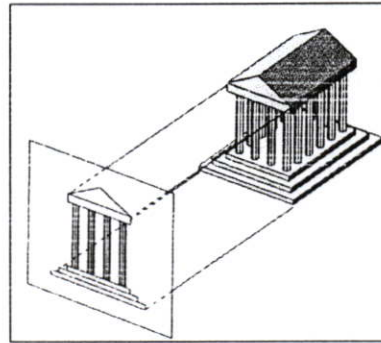
- เส้นตรงที่ขนานจะยังคงขนานอยู่หลังการแปลง

- จุดตัดของเส้นตรงตรงสองเส้นจะเป็นจุดเดิม และค่าอัตราส่วนไขว้ (Cross ratio) จะไม่เปลี่ยนแปลง

สมการของการแปลงเชิงสัมพรรคสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

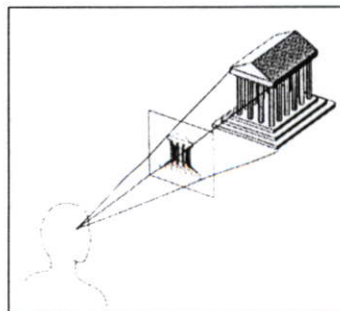
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.3 พบว่าการเปลี่ยนแปลงเชิงสัมพรรคนี้มีระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) เท่ากับ 6 โดยที่ค่าตัวแปร a, b, c, d, e และ f สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการเชิงเส้น 6 สมการที่สร้างขึ้นโดยข้อมูลพิกัดของจุดอ้างอิง 3 จุดในรูปภาพทั้งก่อนการแปลง และหลังการแปลงเชิงสัมพรรค



รูปที่ 2.4 การฉายเชิงตั้งฉาก (Orthogonal projection)

การแปลงเชิงภาพฉาย (Projective transform) จะประกอบไปด้วยการแปลงเชิงสัมพรรค ร่วมกับการฉาย (Projection) ซึ่งการฉายโดยทั่วไปจะแบ่งได้เป็นสองแบบคือ การฉายเชิงตั้งฉาก (Orthogonal projection) โดยที่แนวการฉายจะตั้งฉากกับระนาบของการฉายดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 การฉายเชิงทัศนมิติ (Perspective projection)

การฉายอีกรูปแบบหนึ่งคือ การฉายเชิงทัศนมิติ (Perspective projection) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแนวทางการฉายนั้นจะไม่ตั้งฉากกับระนาบของการฉาย ยกเว้นกรณีที่เราฉายที่แสงที่มาตกกระทบกับระนาบของการฉายนั้นมาจากระยะอนันต์ ซึ่งมีผลให้เส้นตรงขนานที่ไม่ขนานกับระนาบการฉายจะไม่ขนานกันอีก หลังจากผ่านการฉายเชิงทัศนมิติ โดยเส้นขนานเหล่านั้นจะไปตัดกัน ณ จุดหนึ่งที่เราเรียกว่าจุดสูญสาตา (Vanishing point)

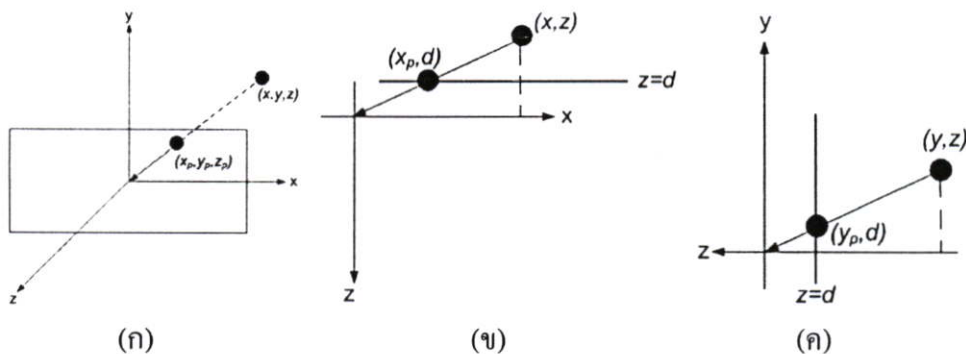
โดยการแปลงเชิงภาพฉาย ที่มีการฉายเชิงทัศนมิตินั้นมีคุณสมบัติดังนี้

- เส้นขนานหลังการแปลงมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป
- ตำแหน่งของจุดตัดของเส้นตรงสองเส้น และค่าอัตราส่วนไขว้ (Cross ratio) จะไม่เปลี่ยนแปลง

โดยสมการของการแปลงเชิงภาพฉายเป็นดังสมการที่ 2.4

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงเชิงสัมพรรคนี้มีระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) เท่ากับ 8 โดยที่ค่าตัวแปร a, b, c, d, e, f, g และ h สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการเชิงเส้น 8 สมการที่สร้างขึ้นโดยข้อมูลพิกัดของจุดอ้างอิง 4 จุดในรูปภาพทั้งก่อนการแปลงและหลังการแปลงเชิงภาพฉาย



รูปที่ 2.6 การฉายเชิงทัศนมิติ (ก) มุมมองสามมิติ (ข) มุมมองด้านบน และ (ค) มุมมองด้านข้าง

อีกแนวทางหนึ่งในการคำนวณหาพิกัดของจุดหลังการฉายนั้น กระทำได้ดังสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 โดยกำหนดให้พิกัดจุดในปริภูมิสามมิติคือ (x,y,z) โดยมีจุดศูนย์กลางการฉายอยู่ที่จุดพิกัด $(0,0,0)$ และกำหนดให้พิกัดของจุดหลังการฉายคือ (x_p,y_p,z_p) ดังรูปที่ 2.6

กำหนดให้ระนาบในการฉาย z_p มีค่าเท่ากับ d จากรูปที่ 2.6(ข) จะพบว่าจะเกิดสามเหลี่ยมคล้ายขึ้นหนึ่งคู่ โดยใช้กฎของสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ผลดังสมการที่ 2.5

$$x_p = \frac{x}{z/d} \quad (2.5)$$

เช่นเดียวกันกับรูปที่ 2.6(ข) จะพบว่าจะเกิดสามเหลี่ยมคล้ายขึ้นอีกหนึ่งคู่ดังรูปที่ 2.6(ค) ซึ่งเมื่อใช้กฎของสามเหลี่ยมคล้ายแล้วจะได้ผลดังสมการที่ 2.6

$$y_p = \frac{y}{z/d} \quad (2.6)$$

จากความรู้ข้างต้น สามารถนำมาเขียนตารางสรุปคุณสมบัติของการแปลงเชิงสัมพรรคและการแปลงเชิงภาพฉายได้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 จากตารางที่ 2.1 เป็นการสรุปว่าการแปลงเชิงภาพฉายเป็นลักษณะทั่วไปของการแปลงเชิงสัมพรรค ซึ่งคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ในการสร้างลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการการแปลงทั้งสองรูปแบบคือ ตำแหน่งจุดตัดของเส้นตรงสองเส้น และค่าอัตราส่วนไขว้ ดังได้แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งทฤษฎีเกี่ยวกับอัตราส่วนไขว้จะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการแปลงที่เกิดขึ้นในการแปลงเชิงสัมพรรค และการแปลงเชิงภาพฉาย

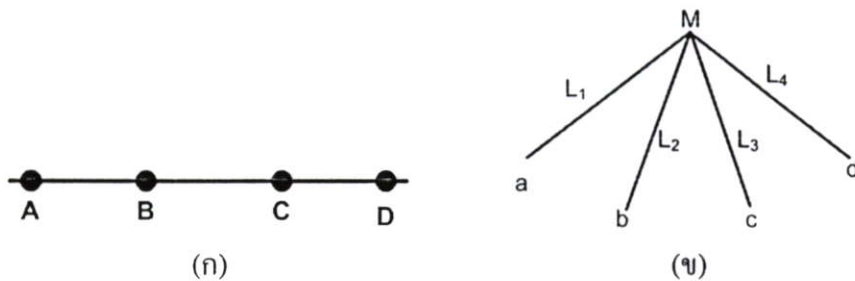
	การแปลงเชิงสัมพรรค	การแปลงเชิงภาพฉาย
การเลื่อนตำแหน่งในภาพ	√	√
การปรับขนาดของรูปภาพ	√	√
การหมุนรูปภาพ	√	√
การเฉือนภาพ	√	√
การฉายภาพ	X	√

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติที่มีความทนทานภายใต้การแปลงเชิงสัมพรรค และการแปลงเชิงภาพฉาย

	การแปลง เชิงสัมพรรค	การแปลง เชิงภาพฉาย
ระยะระหว่างจุดสองจุด	X	X
ขนาดของมุม	X	X
อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดสองจุด	X	X
เส้นขนาน	√	X
ตำแหน่งของจุดตัดของเส้นตรงสองเส้น	√	√
ค่าอัตราส่วนไขว้	√	√

2.2.2 ค่าอัตราส่วนไขว้ [8]

ค่าอัตราส่วนไขว้สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งของจุดสี่จุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน (4 Collinear points) และจากเส้นตรงสี่เส้นที่มาบรรจบกัน (4 Concurrent lines) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งค่าอัตราส่วนไขว้นี้จะไม่มีเปลี่ยนแปลง หากการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นแบบระนาบเดียวกัน (Coplanar)



รูปที่ 2.7 (ก) จุดสี่จุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน และ (ข) เส้นตรงสี่เส้นที่มาบรรจบกัน

จากรูปที่ 2.7 (ก) ค่าอัตราส่วนไขว้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$[A, B; C, D] = \frac{\overline{AC} \cdot \overline{BD}}{\overline{AD} \cdot \overline{BC}} \quad (2.5)$$

โดยที่จุด A และจุด B เป็นจุดอ้างอิงและค่า \overline{AB} เป็นระยะห่างแบบยูคลิด (Euclidean distance) ระหว่างจุดสองจุด

จากรูปที่ 2.7(ข) ค่าอัตราส่วนไขว้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$[L_1, L_2; L_3, L_4] = \frac{\sin(aMc) \cdot \sin(bMd)}{\sin(aMd) \cdot \sin(bMc)} \quad (2.6)$$

โดยที่ให้เส้นตรง L_1 และเส้นตรง L_2 เป็นเส้นอ้างอิง

จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 พบว่าหากสามารถกำหนดจุดอ้างอิง หรือเส้นตรงอ้างอิงทั้งสองได้อย่างถูกต้อง และสามารถรู้ตำแหน่งของจุดหรือเส้นตรงที่สามได้ รวมทั้งรู้ค่าอัตราส่วนไขว้ของจุดหรือเส้นตรงทั้งสี่แล้ว จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดหรือเส้นตรงที่สี่ได้

2.3 การพิมพ์ภาพและการถ่ายภาพ

การพิมพ์ภาพ และการถ่ายภาพเป็นปัญหาหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพได้ เนื่องจากค่าสีหรือค่าความสว่างของรูปภาพมีโอกาสที่จะผิดเพี้ยนไปอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการพิมพ์ และการถ่ายภาพ อีกทั้งคุณภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และสภาพแวดล้อมยังมีผลต่อคุณภาพของรูปภาพที่ผ่านการพิมพ์ และการถ่ายภาพด้วยเช่นกัน ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอถึงทฤษฎีพื้นฐานของการพิมพ์ภาพ รวมทั้งการถ่ายภาพ

2.3.1 การพิมพ์ภาพ [9]

การพิมพ์ภาพ หมายถึง การถ่ายทอดรูปแบบจากแม่พิมพ์ออกมาเป็นผลงานที่มีลักษณะเหมือนกันกับแม่พิมพ์ทุกประการ และได้ภาพที่เหมือนกันมีจำนวนตั้งแต่ 2 ขึ้นขึ้นไป

การพิมพ์ภาพเป็นงานที่พัฒนาต่อเนื่องมาจากการวาดภาพ ซึ่งการวาดภาพไม่สามารถสร้างผลงาน 2 ขึ้นที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการได้ จึงมีการพัฒนาการพิมพ์ขึ้นมาชาติจีนถือว่าเป็นชาติแรกที่น่าเอาวิธีการพิมพ์มาใช้อย่างแพร่หลายมานานนับพันปี จากนั้นจึงได้แพร่หลายออกไปในภูมิภาคต่างๆของโลก โดยที่ชนชาติทางตะวันตกได้พัฒนาการพิมพ์ภาพขึ้นมาอย่างมากมาย มีการนำเอาเครื่องจักรกลต่างๆ เข้ามาใช้ในการพิมพ์ ทำให้การพิมพ์มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน

การพิมพ์ภาพมีองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้

- แม่พิมพ์ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการพิมพ์
- วัสดุที่ใช้พิมพ์ลงไป
- สีที่ใช้ในการพิมพ์
- ผู้พิมพ์

ผลงานที่ได้จากการพิมพ์จะมีคุณภาพที่ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญดังที่กล่าวไปแล้ว นั่นคือถ้าองค์ประกอบต่างๆ มีคุณภาพที่ดีผลของภาพที่พิมพ์ออกมานั้นก็จะมีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น

ตามไปด้วย ส่งผลให้ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังอยู่ในรูปภาพมีโอกาสที่จะไม่ถูกทำลายไปมีสูงมากขึ้นด้วย โดยรูปภาพที่ผ่านการพิมพ์ภาพนั้น มีโอกาสที่จะเกิดความผิดเพี้ยนของค่าความสว่างในแต่ละพิกเซล รวมทั้งอาจจะเกิดสัญญาณรบกวน และการบิดเบือนเชิงเรขาคณิตซึ่งจะทำให้ลายน้ำดิจิทัลถูกทำลายไปได้

2.3.2 การถ่ายภาพ [10]

การถ่ายภาพ คือ การบันทึกเหตุการณ์ ณ จุดเวลาใดเวลาหนึ่ง โดยการเก็บสภาพแสง ณ เวลานั้นไว้บนวัตถุไวแสง ผ่านอุปกรณ์รับแสงที่เรียกว่ากล้องถ่ายรูป หลังจากนั้น จะสามารถเปลี่ยนสภาพแสงเหล่านั้นกลับมาเป็นภาพได้อีกครั้งหนึ่งโดยผ่านกระบวนการล้างอัดภาพ ในปัจจุบันการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลเป็นการถ่ายภาพวิธีหนึ่งที่ได้รับนิยมนั้น เนื่องจากมีความสะดวก และสามารถพิจารณารูปภาพที่ถ่ายได้อย่างทันทีทันใด อีกทั้งราคาของกล้องดิจิทัลในปัจจุบันยังไม่ราคาไม่สูงมาก นอกจากนี้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งมีการบรรจุกล้องถ่ายภาพดิจิทัลลงไปด้วย การถ่ายภาพดิจิทัลด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลนั้นจะใช้ตัวรับรู้ภาพ (Image sensor) ในการสร้างภาพดิจิทัลแทนที่ฟิล์มในการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพธรรมดา

ตัวรับรู้ภาพทำหน้าที่เสมือนฟิล์ม ที่รับภาพมาจากเลนส์ โดยที่การถ่ายภาพด้วยฟิล์ม ภาพจะเกิดเป็นภาพแฝงในฟิล์ม หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเคมีจึงจะออกมาเป็นภาพจริงได้ ส่วนตัวรับรู้ภาพจะแปลงแสงที่รับมาให้สุดท้ายออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หรือออกเป็นข้อมูลได้ โดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ช่วย ภาพที่ออกมาจึงอยู่ในรูปแบบไฟล์ข้อมูลดิจิทัลที่จับต้องไม่ได้ อย่างฟิล์ม มีข้อดีตรงที่เราสามารถโอนย้ายและทำสำเนาไฟล์ข้อมูลนี้ให้เหมือนต้นฉบับ ได้ไม่จำกัดจำนวน และสามารถนำไฟล์ข้อมูลดิจิทัลนี้ไปใช้งานได้หลากหลาย

ขนาดภาพของไฟล์ข้อมูลขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนพิกเซลของอิมเมจตัวรับรู้ภาพ โดยในแต่ละพิกเซล เมื่อนำวางเรียงต่อกันจะสามารถนำมาประกอบขึ้นเป็นภาพๆ หนึ่ง หากจำนวนพิกเซลมาก มันก็จะมีรายละเอียดของภาพมากขึ้นตามไปด้วย ปัจจุบันกล้องดิจิทัลแบบพกพา (Compact digital camera) จะมีความละเอียดอยู่ในช่วง 3 - 5 ล้านพิกเซล ส่วนกล้องดิจิทัลสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยว (Digital single lens reflect) มักจะมีความละเอียดอยู่ที่ 6 ล้านพิกเซล ถึง 10 ล้านพิกเซล

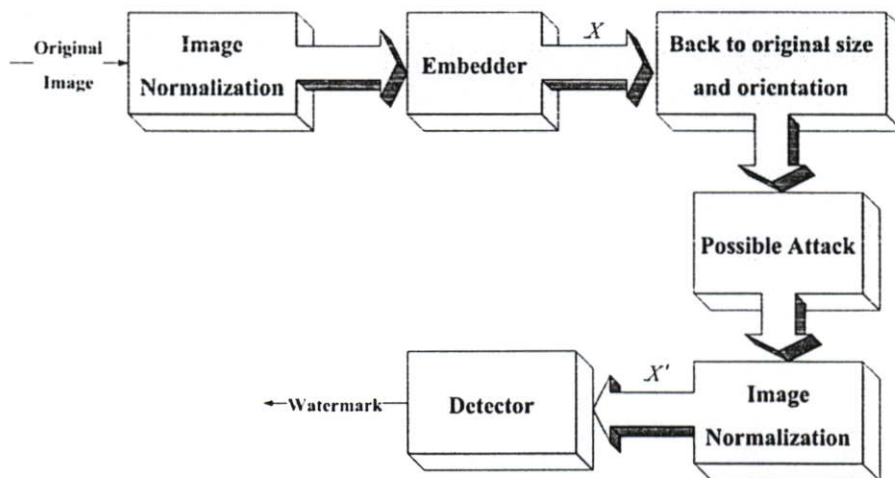
ชนิดของตัวรับรู้ภาพเห็นทั่วไปจะมีสองประเภท คือ ตัวรับรู้ภาพประเภทซีซีดี (CCD: Charge Coupled Device) และ ตัวรับรู้ภาพประเภทซีโมส (CMOS: Complementary metal-oxide-semiconductor) ซึ่งในกล้องดิจิทัลคอมแพ็คส่วนใหญ่จะเป็นซีซีดีขณะที่กล้องดิจิทัลสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวจะมีทั้งซีซีดี และซีโมส แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของตัวรับรู้ภาพในกล้องดิจิทัลแบบพกพา และกล้องดิจิทัลสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวจะเป็นคนละแบบกัน ซึ่งจะมีความแตกต่างในเรื่องคุณภาพ และก็ทำให้ฟังก์ชันการทำงานบางอย่างแตกต่างกันออกไปด้วย

การถ่ายภาพจำเป็นต้องมีองค์ประกอบที่ดี ไม่ว่าจะเป็นตัวกล้องถ่ายภาพดิจิทัล สภาพแวดล้อม รวมทั้งผู้ถ่ายภาพ เพื่อที่จะได้ภาพถ่ายที่มีคุณภาพ การถ่ายภาพที่ฝังลายนํ้าดิจิทัลก็จำเป็นต้องมีองค์ประกอบที่ดีเพื่อจะสามารถตรวจจับลายนํ้าดิจิทัลได้อย่างถูกต้อง โดยรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภูมุนั้น มีโอกาสที่จะเกิดความผิดเพี้ยนของค่าความสว่างในแต่ละพิกเซล รวมทั้งอาจเกิดสัญญาณรบกวน และการบิดเบือนเชิงเรขาคณิต โดยเฉพาะการแปลงเชิงภาพฉายซึ่งจะทำให้ลายนํ้าดิจิทัลถูกทำลายไป

บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ นั่นคืองานวิจัยเกี่ยวกับการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงสัมพรรค และการแปลงเชิงภาพฉาย ซึ่งสามารถจัดแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มคือ การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบปกติ (Image normalization based watermarking) [11][12], การฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนที่มีความทนทาน (Invariant transform domain based watermarking) [13][14], การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้แม่แบบ (Template matching based watermarking) [15][16], การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่น (Feature extraction based watermarking) [17][18] และการฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้ค่าอัตราส่วนไขว้ (Cross ratio based watermarking) [19]

3.1 การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบปกติ



รูปที่ 3.1 ระบบการสร้างลายน้ำดิจิทัลโดยการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน

วิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบปกติ มีหลักการคือจะทำการเปลี่ยนรูปภาพที่ต้องการจะบรรจุลายน้ำดิจิทัลไปอยู่ในรูปแบบปกติก่อน โดยใช้ค่าโมเมนต์ของรูปภาพ (Image moment) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1 แล้วจึงทำการบรรจุข้อมูลลายน้ำดิจิทัลลงไปดังรูปที่ 3.1

$$m_{p,q} = \iint_{\tau} x^p y^q f(x,y) dx dy \quad (3.1)$$

โดยที่ τ คือขอบเขตของรูปภาพ p, q คือลำดับ (Order) ของค่าโมเมนต์ของรูปภาพ $m_{p,q}$

ค่าโมเมนต์รูปภาพนี้จะใช้ในการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบปกติ โดยที่รูปภาพปกติ (Normalized image) ที่ส่วนภาคของการบรรจุข้อมูล (X) จะต้องมีขนาดและลักษณะที่เหมือนกันกับรูปภาพปกติที่ส่วนถอดข้อมูล (X') เพื่อที่จะสามารถตรวจจับและถอดข้อมูลลายน้ำดิจิทัลออกมาได้

วิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบปกติมีข้อดี คือสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย และมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน แต่วิธีนี้มีข้อเสียที่สำคัญคือค่า โมเมนต์ของรูปภาพจะเปลี่ยนแปลงไปหากรูปภาพได้รับการแก้ไขเช่น การตัดแบ่งส่วนภาพ และการเพิ่มสัญญาณรบกวนลงไปในรูปแบบภาพ

3.2 การฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนที่มีความทนทาน

วิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลในโดเมน (Domain) ที่มีความทนทานนั้นจะเป็นการเปลี่ยนโดเมนของรูปภาพที่ต้องการบรรจุข้อมูลลายน้ำดิจิทัล ไปอยู่ในโดเมนที่มีความทนทานไม่เปลี่ยนแปลงต่อการบิดเบือนต่างๆ ตามที่ต้องการก่อนจะทำการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัล

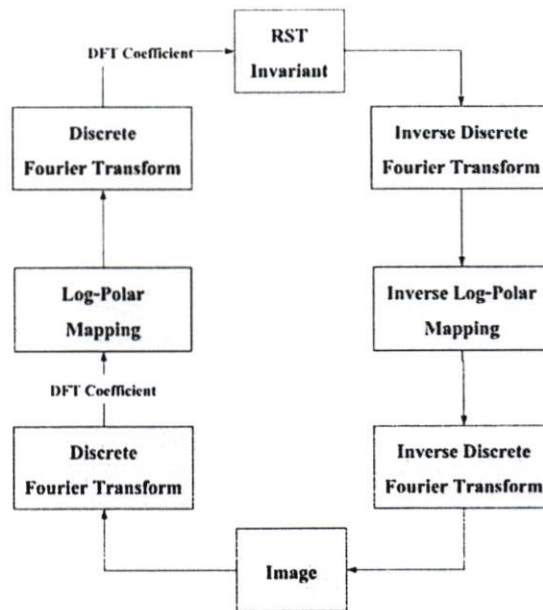
วิธีหนึ่งที่มีความนิยมในการนำไปใช้งาน คือการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลลงในโดเมนฟูเรียร์-เมลลิน (Fourier-Mellin transform domain) ซึ่งวิธีนี้มีความทนทานต่อการเลื่อนตำแหน่งของรูปภาพ, การหมุนภาพ และการปรับขนาดของภาพ โดยที่วิธีนี้ได้ใช้ประโยชน์จากความทนทานต่อการเลื่อนตำแหน่งของรูปภาพของค่าสัมประสิทธิ์การแปลงฟูเรียร์ สมการของการแปลงฟูเรียร์เป็นดังสมการที่ 3.2

$$F(k_1, k_2) = \sum_{x=0}^{N_1-1} \sum_{y=0}^{N_2-1} f(x, y) \cdot e^{(-j2\pi x k_1 / N_1 - j2\pi y k_2 / N_2)} \quad (3.2)$$

คุณสมบัติที่สำคัญของการแปลงฟูเรียร์คือค่าขนาด (Magnitude) หรือค่าสัมประสิทธิ์การแปลงฟูเรียร์จะไม่เปลี่ยนไป สำหรับการบิดเบือนในรูปแบบการเคลื่อนที่ในรูปภาพ โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงคือเฟส (Phase) เท่านั้น

โดยขั้นตอนการฝังลายน้ำดิจิทัลเป็นดังรูปที่ 3.2 กล่าวคือเริ่มต้นทำการแปลงฟูเรียร์กับรูปภาพแล้วทำการแยกข้อมูลส่วนที่เป็นสัมประสิทธิ์การแปลงฟูเรียร์ออกมาเนื่องจากว่าข้อมูลนี้มีความทนทานต่อการเลื่อนตำแหน่งในรูปภาพ หลังจากนั้นทำการแปลงพิกัดของข้อมูลส่วนที่สัมประสิทธิ์การแปลงฟูเรียร์เป็นพิกัดเชิงขั้ว (Log-polar coordinate) แล้วทำการแปลงฟูเรียร์อีกครั้งแล้วทำการ

แยกส่วนสัมประสิทธิ์การแปลงฟูเรียร์ออกมาเพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัล ซึ่งจะมีความทนทานต่อการเลื่อนตำแหน่งในภาพ, การหมุนภาพ และการเปลี่ยนขนาดของภาพ



รูปที่ 3.2 ระบบการสร้างลายน้ำดิจิทัลในโดเมนที่มีความทนทาน

สำหรับวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนที่มีความทนทานนั้นมีข้อเสียคือ การแปลงไปยังโดเมนที่มีความทนทานนั้นๆ และแปลงกลับมาสู่โดเมนทางพื้นที่จะต้องใช้การคำนวณที่ถูกต้องมากๆ เพื่อที่จะให้รูปภาพไม่ได้รับความเสียหาย อีกทั้งยังเป็นเรื่องยากที่จะค้นหาโดเมนที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงได้ในทุกๆ รูปแบบ นอกจากนี้ ยังไม่มีโดเมนของรูปภาพใดที่พบว่ามีคุณสมบัติไม่แปรผันกับการแปลงเชิงภาพฉาย

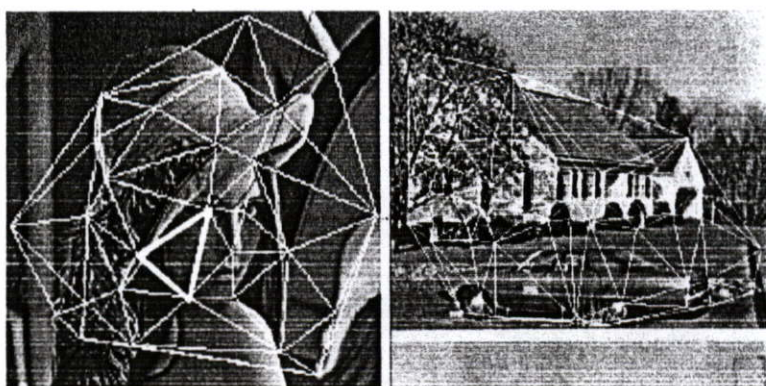
3.3 การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้แม่แบบ

การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้แม่แบบนี้ จะมีการฝังแม่แบบ (Template) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่มีความหมาย และไม่มีการรบกวนต่อข้อมูลลายน้ำดิจิทัลลงไปยังรูปภาพรวมกับการฝังลายน้ำดิจิทัล ซึ่งข้อมูลแม่แบบนี้จะนำมาช่วยในการหาเมทริกซ์เพื่อใช้ในการแปลงผกผัน (Inverse transform) ซึ่งโดยทั่วไปงานวิจัยในกลุ่มการฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้แม่แบบนี้จะใช้ร่วมกับการฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนฟูเรียร์-เมลลิน โดยแม่แบบจะถูกฝังลงไปโดยการทำให้ตำแหน่งนั้นเป็นตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดเฉพาะที่ (Local peak) สำหรับงานวิจัยในกลุ่มนี้นั้นจะพบปัญหาในการค้นหาตำแหน่งที่ฝังแม่แบบจะต้องใช้การคำนวณที่สูง

3.4 การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่น

สำหรับวิธีการนี้จุดที่มีลักษณะเด่นภายในรูปภาพจะถูกใช้เป็นจุดที่ใช้ในการอ้างอิงสำหรับการบรรจุ และถอดข้อมูลลายน้ำดิจิทัล โดยที่จุดเหล่านั้นอาจจะเป็นจุดบริเวณขอบ, มุม ของรูปภาพซึ่งจุดที่มีลักษณะเด่นที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มีความทนทานต่อการรบกวนต่าง ๆ เช่นการบีบอัดข้อมูล
- มีความทนทานต่อการแปลงเชิงเรขาคณิต เช่นการหมุน, การเปลี่ยนแปลงขนาด, การแปลงเชิงภาพฉาย เป็นต้น
- มีตำแหน่งบริเวณที่เหมาะสม เพื่อป้องกันปัญหาการตัดแบ่งรูปภาพออกเป็นส่วนย่อย



รูปที่ 3.3 ระบบการสร้างลายน้ำดิจิทัลโดยใช้วิธีการทesselเลชันของเดอร์ลอนีย์

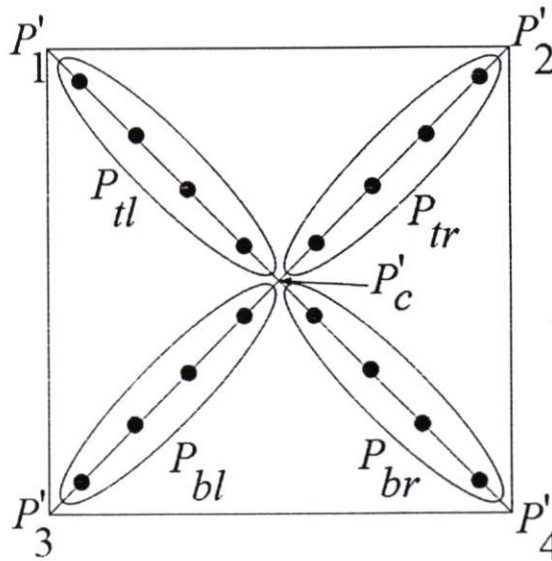
วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่นสามารถนำไปใช้ได้สองวิธีคือ สามารถใช้เป็นจุดช่วยเหลือในการบอกตำแหน่งของข้อมูลลายน้ำดิจิทัล ส่วนวิธีที่สองคือใช้เป็นจุดในการบรรจุข้อมูลลายน้ำดิจิทัลโดยตรง สำหรับหัวข้อนี้จะขอยกตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้จุดมุมของรูปภาพเป็นจุดในการสร้างพื้นที่เพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล โดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดเลือกจากรูปภาพนั้นมาทำการสร้างพื้นที่สามเหลี่ยมต่อกัน โดยใช้วิธีการทesselเลชันของเดอร์ลอนีย์ (Delaunay tessellation algorithm) ดังรูปที่ 3.3 จากนั้นทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงไปแต่ละพื้นที่สามเหลี่ยม โดยทำการประมาณการแปลงเชิงสัมพรรคระหว่างข้อมูลลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในรูปแบบสี่เหลี่ยม ไปยังพื้นที่สามเหลี่ยมนั้น

สำหรับงานวิจัยในกลุ่มนี้นั้นจะได้ผลดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการเลือกตำแหน่งของจุดที่มีลักษณะเด่นกล่าวคือถ้าหากจุดที่มีลักษณะเด่นที่เลือกมาใช้งานไม่มีความทนทานเพียงพอ ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลก็จะมี ความทนทานน้อยลงไปด้วย

3.5 การฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้ค่าอัตราส่วนไขว้

เนื่องจากวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลในหัวข้อ 3.1 ถึง 3.4 ได้ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้สมมติฐานว่ารูปภาพที่จะทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นมีการผิดเพี้ยนจากการแปลงเชิงสัมพรรค ซึ่งจากหัวข้อ 2.2.1 จะพบว่า การแปลงเชิงภาพฉายเป็นลักษณะโดยทั่วไปของการแปลงเชิงสัมพรรค ดังนั้นวิธีการเหล่านี้จึงให้ผลลัพธ์ในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ไม่ดีเพียงพอ จึงได้มีการนำเสนอวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย โดยทำการกำหนดหาตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยค่าอัตราส่วนไขว้ของจุด 4 จุดบนเส้นตรง และตำแหน่งจุดตัดของเส้นตรง โดยมีหลักการดังนี้

1. กำหนดค่าอัตราส่วนไขว้ Cr สำหรับการหาตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัล



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลปฐมภูมิ

2. จากรูปที่ 3.4 กำหนดให้จุดมุมทั้งสี่คือ P'_1, P'_2, P'_3, P'_4 ทำการกำหนดหาจุดตัดของเส้นทแยงมุม P'_c ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของภาพที่จะฝังลายน้ำดิจิทัล ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 โดยใช้การกำหนดหาจุดตัดของเส้นทแยงมุมสองเส้นของภาพนั้น โดยการหาค่าตอบของสมการเชิงเส้นสองสมการ โดยสามารถสร้างสมการเส้นตรงของเส้นทั้งสองโดยใช้สมการที่ 3.3

$$(y - y_1) = \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot (x - x_1) \quad (3.3)$$

3. คำนวณหาตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลปฐมภูมิ (Primary level watermark location) $P_{rr}, P_{rl}, P_{br}, P_{bl}$ ที่อยู่บนเส้นทแยงมุมทั้งสอง ด้วยสมการของอัตราส่วนไขว้โดยใช้ค่าอัตราส่วนไขว้ที่กำหนดไว้ในข้อที่ 1 ดังรูปที่ 3.4 เช่นถ้าต้องการจะหาตำแหน่งของจุดบนเส้นตรง $P'_1P'_4$ โดยที่ตำแหน่งของจุด P'_1 คือ (x_1, y_1) และตำแหน่งของจุด P'_4 คือ (x_4, y_4) แล้วตำแหน่งของจุดที่ต้องการจะคำนวณหา P'_x ตำแหน่ง (x, y) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

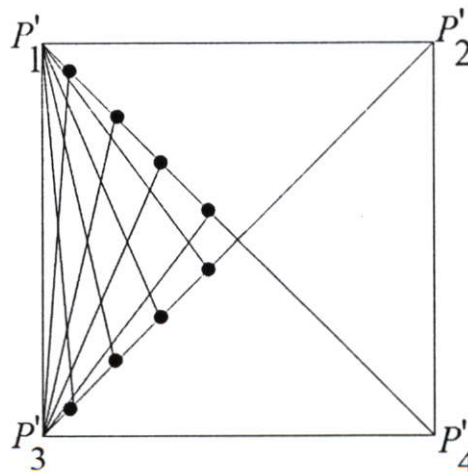
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \beta \cdot \begin{bmatrix} x_4 - x_1 \\ y_4 - y_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดยที่ $\beta = \frac{r_1}{r_1 + r_2} = \frac{r_1/r_2}{1 + (r_1/r_2)} = \frac{r_x}{1 + r_x}$ ซึ่ง r_x สามารถคำนวณได้จากสมการที่

3.5

$$r_x = \frac{r_1}{r_2} = Cr \cdot \frac{w_1}{w_2} \quad (3.5)$$

โดยที่ Cr คือค่าอัตราส่วนไขว้ของจุด P_x , r_1 คือระยะห่างระหว่างจุด P'_1 และจุด P_x , r_2 คือระยะห่างระหว่างจุด P_x และจุด P'_4 , w_1 คือระยะห่างระหว่างจุด P'_1 และจุด P'_c และ w_2 คือระยะห่างระหว่างจุด P'_c และจุด P'_4



รูปที่ 3.5 แสดงการคำนวณหาตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัล

4. ทำการค้นหาคำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลในแต่ละพื้นที่สามเหลี่ยม ที่เกิดจากการตัดกันของเส้นทแยงมุมทั้งสองเส้นของรูปภาพ เช่นตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลในพื้นที่สี่เหลี่ยมด้านซ้าย สามารถคำนวณได้จากจุดตัดของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุด P_1' และ จุด $P_{bl}(i)$ กับเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุด P_3' และ จุด $P_{tl}(i)$ ดังรูปที่ 3.5

5. ทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงไปในรูปแบบ โดยใช้จุดที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 4 รวมทั้งตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลปฐมภูมิ

สำหรับวิธีการนี้ เป็นวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย แต่วิธีการนี้ไม่มีความทนทานต่อการตัดแบ่งส่วนภาพ เนื่องจากการคำนวณหาคำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลนั้นได้ใช้จุดมุมของรูปภาพซึ่งเป็นจุดที่เข้าถึงได้ง่าย ดังนั้นการโจมตีรูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีนี้นั้นสามารถกระทำได้โดยง่ายด้วยเช่นกัน งานศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการอ้างอิงวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.5 นี้มาใช้งาน โดยได้ทำการปรับปรุงให้มีความทนทานต่อการตัดแบ่งส่วนภาพเพิ่มขึ้น โดยทำการฝังข้อมูลลายน้ำดิจิทัลลงไปในพื้นที่สี่เหลี่ยมภายในรูปภาพที่คำนวณได้จากจุดที่มีลักษณะเด่น สาเหตุที่จำเป็นต้องทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงไปในพื้นที่ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมนั้น เนื่องจากการนำเอาค่าอัตราส่วนไขว้ไปใช้คำนวณหาคำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัลจำเป็นต้องใช้ตำแหน่งของจุดสามจุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน ร่วมกับค่าอัตราส่วนไขว้ที่กำหนดไว้ ซึ่งในพื้นที่ที่เป็นสี่เหลี่ยมจะสามารถหาจุดสามจุดที่อยู่บนสามตรงได้ง่ายกว่า การใช้พื้นที่ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมซึ่งสร้างด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.4 อีกทั้งเมื่อทดลองนำเอาวิธีการในหัวข้อที่ 3.4 มาใช้งานกับรูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉายแล้ว พบว่าค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นไม่ดีเท่าที่ควร

บทที่ 4

เทคนิคไล่น้ำดิจิตอลสำหรับการแปลงเชิงภาพฉาย

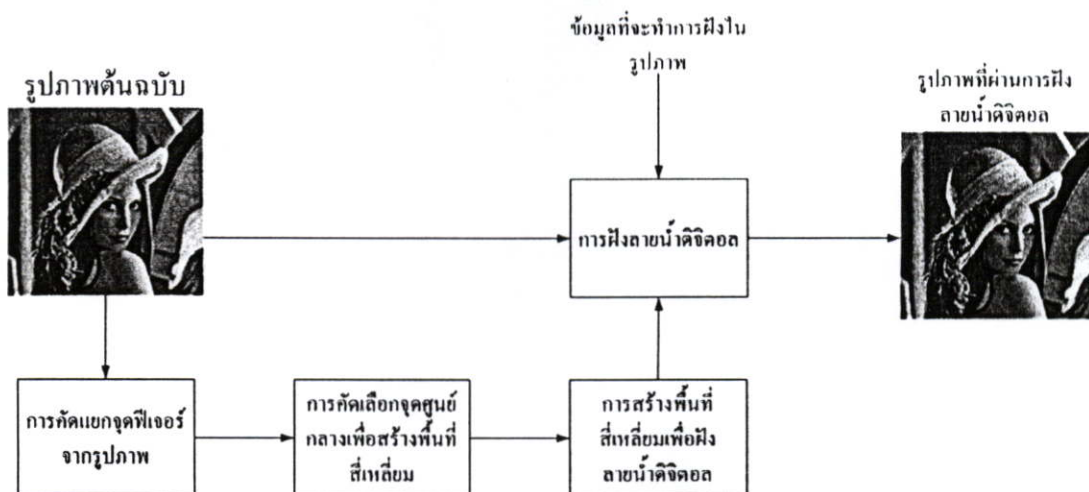
ในบทนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึม (Algorithm) ในการฝึกลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพโดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่นภายในรูปภาพ โดยที่จะนำเสนอวิธีการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่น, การสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมในการฝึกลายน้ำดิจิตอล, การเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมเหมาะสมและการฝึกลายน้ำดิจิตอลโดยใช้คุณลักษณะของการมองเห็นของมนุษย์

นอกจากนี้ในส่วนของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล ยังได้นำเสนอวิธีการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ในการฝึกลายน้ำดิจิตอลที่มีประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน

4.1 การฝึกลายน้ำดิจิตอลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย

อัลกอริทึมการฝึกลายน้ำดิจิตอลที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ เป็นวิธีการฝึกลายน้ำดิจิตอลที่มีความมุ่งหมายเพื่อให้ลายน้ำดิจิตอลที่ถูกฝึกลงไปในรูปภาพมีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉายซึ่งอาจจะเกิดจากการถ่ายภาพ หรือความตั้งใจของผู้ที่ต้องการทำลายข้อมูลลายน้ำดิจิตอล ซึ่งจากหัวข้อที่ 2.2 พบว่าการแปลงเชิงภาพฉายเป็นลักษณะโดยทั่วไปของการแปลงเชิงสัมพรรค ดังนั้นวิธีการที่ได้แนะนำเสนอนี้จะมีความทนทานทั้งการแปลงเชิงภาพฉาย และการแปลงเชิงสัมพรรค นอกจากนี้วิธีการนี้เป็นการฝึกลายน้ำดิจิตอลลงในพื้นที่สี่เหลี่ยมภายในรูปภาพซึ่งพื้นที่สี่เหลี่ยมนี้ถูกสร้างขึ้นจากจุดที่มีลักษณะเด่นภายในรูปภาพ ดังนั้นวิธีการนี้จำเป็นต้องมีวิธีการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีความทนทานต่อการบิดเบือนต่างๆ รวมทั้งการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการตัดแบ่งส่วนภาพด้วยเช่นกัน

สำหรับการฝึกลายน้ำดิจิตอลในแต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมนั้นจะทำการฝึกลายน้ำดิจิตอลด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งวิธีการนี้จำเป็นต้องมีลักษณะพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นคอนเวกซ์-ฮัล (Convex hull) และมีมุมภายในและขนาดพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสม (เหตุผลที่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติดังกล่าวจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.3) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอวิธีการคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมเพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ในการตรวจจับลายน้ำที่ดีที่สุด สำหรับการฝึกลายน้ำดิจิตอลนั้นได้ทำการปรับปรุงวิธีการฝึกลายน้ำดิจิตอลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัม โดยใช้คุณลักษณะทางการมองเห็นของมนุษย์ที่จะไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในบริเวณที่เป็นขอบ หรือลวดลายภายในรูปภาพ แต่จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงในส่วนที่เป็นพื้นสีเรียบของรูปภาพแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งอัลกอริทึมในส่วนของการฝึกลายน้ำดิจิตอลเป็นดังรูปที่ 4.1 ดังที่อธิบายได้ดังต่อไปนี้



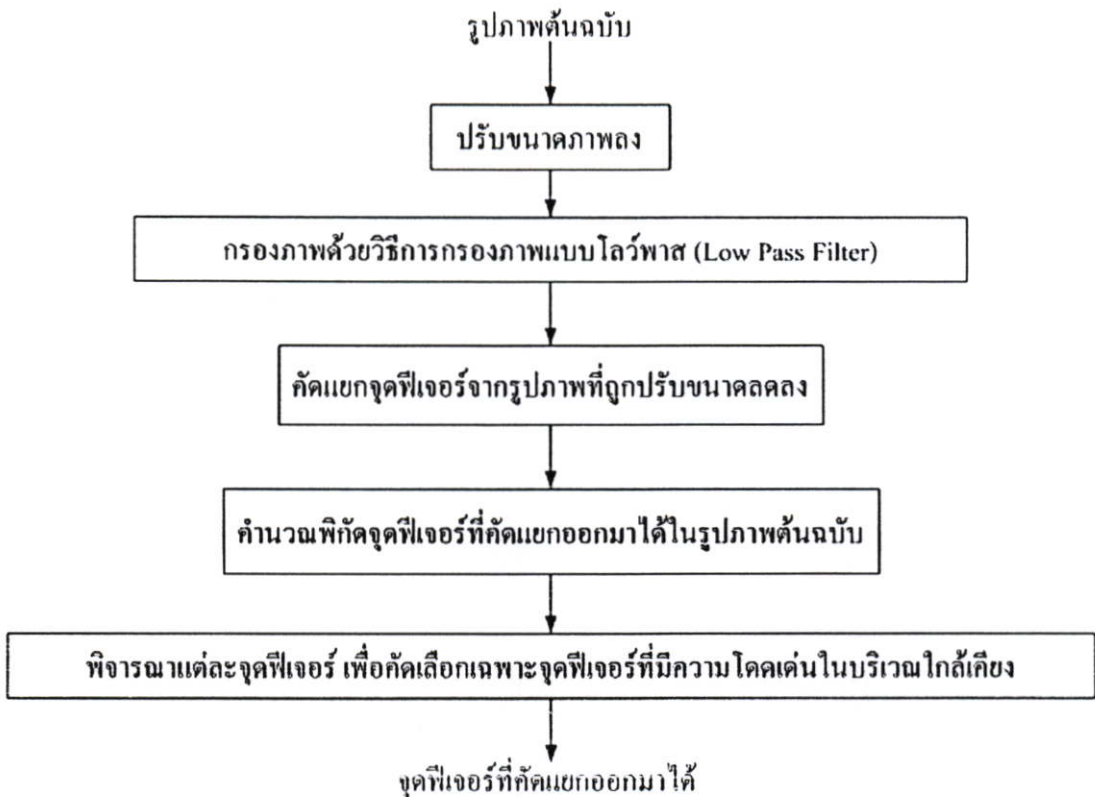
รูปที่ 4.1 กระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย

4.1.1 การคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ

วิธีการคำนวณจุดที่มีลักษณะเด่นในรูปภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีลักษณะโดดเด่นทางกายภาพของรูปภาพ เช่น จุดมุมภายในรูปภาพ หรือจุดบนเส้นขอบของรูปภาพ เป็นต้น เนื่องจากว่าขอบเขตของปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นการบิดเบือนรูปภาพที่เกิดจากการแปลงเชิงเรขาคณิตรวมทั้งการตัดแบ่งส่วนภาพ หากใช้วิธีการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นจากลักษณะอื่นๆ เช่น ค่าโมเมนต์ของรูปภาพ หรือผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสว่าง จุดที่มีลักษณะเด่นเหล่านั้นจะไม่มี ความทนทานเพียงพอ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการของตรวจจับจุดมุมที่อยู่ภายในรูปภาพของแฮร์ริส (Harris corner detector) [20] เนื่องจากว่าเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยที่ในงานวิจัยทางด้านการประมวลผลภาพที่ใช้งานวิธีการตรวจจับจุดมุมภายในรูปภาพนี้อยู่มากมาย อย่างไรก็ตามวิธีการที่ได้แนะนำเสนอนี้สามารถประยุกต์ใช้กับวิธีการหาจุดที่มีลักษณะเด่นแบบอื่นๆ ได้

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอการคัดแยก และคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีความทนทานเพื่อใช้ในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับทำการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยหลักการอย่างง่ายในการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีความทนทานคือ ทำการค้นหาจุดที่มีลักษณะเด่นที่จะค้นพบในรูปภาพที่ถูกบิดเบือนไปทุกๆ กรณีนั่นเองแต่การกระทำนี้เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก และใช้เวลาในการประมวลผลนาน วิธีการที่ได้นำเสนอนี้จะเป็นการค้นหาจุดที่มีลักษณะเด่นที่ตรงกันของรูปภาพต้นฉบับ และรูปภาพที่ผ่านการปรับขนาด เนื่องจากว่าการปรับขนาดนั้นเป็นการบิดเบือนที่ส่งผลต่อพื้นที่ต่างๆ ภายในรูปภาพเท่าๆ กันนั่นเอง อีกทั้งการย่อขนาดภาพนั้น ยังก่อให้เกิดปัญหากับกระบวนการพิจารณาคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีความโดดเด่นมากที่สุดในบริเวณใกล้เคียงด้วย โดยมีแผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึม (Flow chart) ดังรูปที่ 4.2 และรหัสคำสั่งเสมือน (Pseudo-code) ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการสกัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ

```

Function ExtractFeatured (I:Image) {
    I_Scale, I_Scale_LPF : Image;
    Cord_Original, Cord_Scale, Cord_PointMatch, Cord_NonEdge : Coordinate;
    // Coordinate is structure {x,y: Integer, cornerness_score:Real} //
    I_Scale = Scale(I,Scale_Factor);
    I_Scale_LPF= LowPassFilter(I_Scale);
    Cord_Scale = FeaturedDetection(I_Scale_LPF);
    Cor_Original = ComputePosition(Cord_Sacle);
    Cord_PointMatch = LocalMaximaSuppress(Cord_Original);
    Cord_NonEdge = CheckDistance (Cord_PointMatch);
    Return(Cord_NonEdge);
}
  
```

รูปที่ 4.3 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการสกัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ

โดยขั้นตอนในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นภายในรูปภาพเป็นดังนี้

1. ทำการปรับขนาดรูปภาพต้นฉบับ (ตัวแปร I จากรูปที่ 4.3) ที่ต้องการจะคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น (ตัวแปร I_Scale จากรูปที่ 4.3)
2. ทำการกรองรูปภาพต้นฉบับที่ผ่านการปรับขนาดรูปภาพลง โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกวิธีการของเกาส์เซียนฟังก์ชัน (Gaussian smoothing) เพื่อทำการลดผลของความไวต่อการแปรผัน (Variation) ของรูปภาพเช่นส่วนของลวดลายภายในรูปภาพ หรือสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพ (ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้คือตัวแปร I_Scale_LPF ในรูปที่ 4.3)
3. ทำการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ในรูปภาพต้นฉบับที่ผ่านการปรับขนาด ด้วยวิธีการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นที่ต้องการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการตรวจจับจุดมุมภายในรูปภาพของแฮร์ริส ซึ่งตัวอย่างผลของการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นในรูปภาพแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยทำการปรับขนาดรูปภาพลดลงเหลือพื้นที่ร้อยละ 70 ของพื้นที่รูปภาพต้นฉบับ (ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้คือตัวแปร Cord_Scale ในรูปที่ 4.3) อนึ่งตัวเลขระดับการปรับขนาดเท่ากับ 70 ในที่นี้เลือกจากช่วงระดับการปรับขนาดภาพลดลงสูงสุดที่ออกแบบให้สายน้ำสามารถทนทานได้



รูปที่ 4.4 ผลการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากภาพต้นฉบับที่มีการปรับขนาด

4. ทำการคำนวณตำแหน่งพิกัดของจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนที่ 3 ว่าอยู่ ณ ตำแหน่งใดในรูปภาพต้นฉบับ (ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้คือตัวแปร Cord_Original ในรูปที่ 4.3) จากนั้นทำการพิจารณาความโดดเด่นของแต่ละจุดที่มีลักษณะเด่น ว่าเป็นจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีความโดดเด่นสูงที่สุดในบริเวณใกล้เคียงหรือไม่ (ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้คือตัวแปร Cord_PointMatch ในรูปที่ 4.3) โดยจุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการคัดแยกในขั้นตอนนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 จุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการคัดแยกจากรูปภาพ

5. จากรูปที่ 4.5 พบว่ามีจุดที่มีลักษณะเด่นบางส่วนที่อยู่บริเวณขอบของรูปภาพ ในขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนที่ 4 ให้เหลือเพียงจุดที่มีลักษณะเด่นที่ไม่อยู่ในบริเวณขอบของรูปภาพ ตัวอย่างของจุดที่มีลักษณะเด่นที่ถูกรับการคัดเลือกแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้คือตัวแปร $Cord_NonEdge$ ในรูปที่ 4.3) และกำหนดให้จุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้นี้คือ $P_i^f, i=1,2,\dots,N_f$ โดยที่ N_f คือจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่น



รูปที่ 4.6 จุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการคัดแยกจากรูปภาพและผ่านการคัดเลือกแล้ว

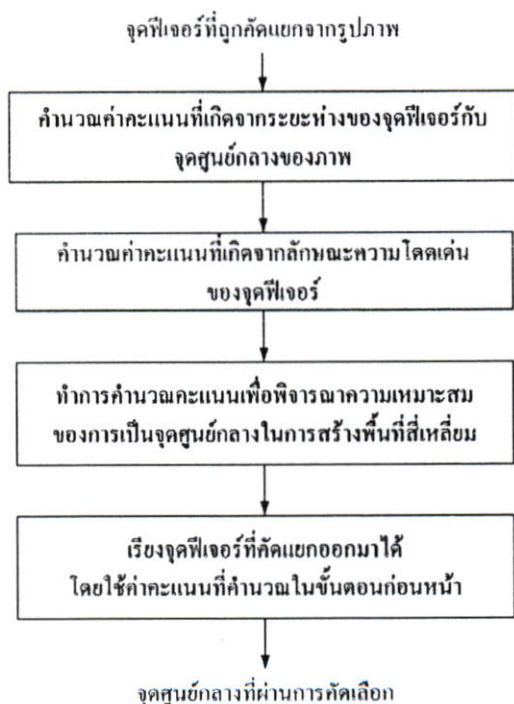
4.1.2 การคัดเลือกจุดศูนย์กลางเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม

ขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกได้จากรูปภาพในหัวข้อ 4.1.1 มาเป็นจุดศูนย์กลางในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิตอล $P_k^c, k=1,2,\dots,L$ โดยที่จำนวนจุดศูนย์กลาง, L นี้ควรมีมากกว่าหนึ่งจุดเพื่อจะคำนวณหาพื้นที่ในการฝังลายน้ำดิจิตอลได้มาก

ขึ้น เป็นผลให้ความทนทานต่อการตัดแบ่งส่วนภาพสูงขึ้นด้วย จุดศูนย์กลางนี้จะเป็นจุดอ้างอิงที่สำคัญในการค้นหาพื้นที่ที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลในส่วนของการตรวจจับลายน้ำ ดังนั้นจุดที่มีลักษณะเด่นที่จะผ่านการคัดเลือกมาเป็นจุดศูนย์กลางนั้นควรจะมีค่าความทนทานสูงกว่าจุดที่มีลักษณะเด่นอื่นๆ ที่คัดแยกออกมาได้ โดยปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของการเป็นจุดศูนย์กลางประกอบไปด้วย

- ค่าคะแนนที่บ่งบอกความเป็นจุดที่มีลักษณะเด่น : วิธีการตรวจจับจุดที่มีลักษณะเด่นโดยทั่วไป จะมีการคิดคะแนนเพื่อพิจารณาความโดดเด่นของการเป็นจุดที่มีลักษณะเด่นเนื่องจากจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีค่าคะแนนสูงๆ นี้มีโอกาสที่จะถูกตรวจจับได้ในขั้นตอนของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลสูงเช่นกัน
- ตำแหน่งของจุดที่มีลักษณะเด่น : จุดที่มีลักษณะเด่นที่จะเป็นจุดศูนย์กลางนั้นควรจะอยู่บริเวณด้านในรูปภาพ หรือใกล้กับจุดกึ่งกลางของรูปภาพ ทั้งนี้เพื่อที่จุดศูนย์กลางนี้จะไม่ถูกทำลายไปโดยง่ายจากการตัดแบ่งส่วนภาพ

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอวิธีการพิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ เพื่อเป็นจุดศูนย์กลางในการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยมีแผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมดังรูปที่ 4.7 และรหัสคำสั่งเสมือนดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการคัดเลือกจุดศูนย์กลาง

```

Function SelectCenter (Cord:Coordinate,I:Image)
{
    Sort_Feature,Feature : Feature Data
    // Feature Data is structure {x,y,order,Integer dist_score,score:Real};//
    Image_Center : Coordinate;
    Featured.x = Cord.x;
    Featured.y = Cord.y;
    Feature.order = SortASC(Cord);
    Image_Center = FindImageCenter(I);
    Feature.dist_score = FindDistScore(Feature,Image_Center);
    For i=1:NumFeatured
        Feature(i).score = Feature(i).order+Round(NumFeatured*Featured(i).distance);
    End
    Sort_Featured = SelectCenter (Featured);
    Return(Sort_Featured);
}

```

รูปที่ 4.8 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการคัดเลือกจุดศูนย์กลาง

โดยขั้นตอนในการคัดเลือกจุดศูนย์กลางเป็นดังนี้

1. ทำการคำนวณตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูปภาพ โดยการคำนวณหาจุดตัดของเส้นทแยงมุมสองเส้นของภาพนั้น (ตัวแปร Image_Center ในรูปที่ 4.8) โดยการหาคำตอบของสมการเชิงเส้นสองสมการ
2. ทำการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างความยาวของเส้นตรงที่สั้นที่สุด ที่เริ่มจากจุดที่มีลักษณะเด่นนั้น ๆ ไปตั้งฉากยังขอบของรูปภาพ ต่อความยาวของเส้นตรงที่เริ่มจากจุดศูนย์กลางของภาพไปตั้งฉากยังขอบของรูปภาพ ค่าอัตราส่วนที่คำนวณได้นี้จะเป็นค่าคะแนนที่เกิดจากระยะห่างของจุดที่มีลักษณะเด่นกับจุดศูนย์กลางของภาพ (ตัวแปร Feature.dist_score ในรูปที่ 4.8)
3. เรียงข้อมูลจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกจากรูปภาพที่ได้ในหัวข้อ 4.1.1 ตามคะแนนความบ่งบอกการเป็นจุดที่มีลักษณะเด่นของแต่ละจุด โดยเรียงข้อมูลจากน้อยไปมาก ค่าอันดับที่คำนวณได้นี้คือค่าคะแนนที่เกิดจากความโดดเด่นของจุดที่มีลักษณะเด่น (ตัวแปร Featured.order ในรูปที่ 4.8)

4. ทำการคำนวณคะแนนเพื่อพิจารณาความเหมาะสมของการเป็นจุดศูนย์กลาง ของจุดที่มีลักษณะเด่น โดยกำหนดให้จุดที่มีลักษณะเด่นคือ $P_i^f, i=1,2,\dots,N_f$ โดยที่ N_f คือจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่น $S_i^d, i=1,2,\dots,N_f$ คือคะแนนที่เกิดจากระยะห่างของจุดที่มีลักษณะเด่นกับจุดศูนย์กลางของภาพ และ $S_i^f, i=1,2,\dots,N_f$ คือค่าคะแนนที่เกิดจากความโดดเด่นของจุดที่มีลักษณะเด่น คะแนนเพื่อพิจารณาความเหมาะสมของการเป็นจุดศูนย์กลาง $S_i, i=1,2,\dots,N_f$ (ตัวแปร Featured.score ในรูปที่ 4.8) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.1

$$S_i = S_i^f + (N * S_i^d) \quad (4.1)$$

5. เรียงจุดที่มีลักษณะเด่นด้วยข้อมูลคะแนนที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 4 โดยเรียงจากมากไปน้อย (ตัวแปร Sort_Featured ในรูปที่ 4.8) แล้วทำการคัดเลือกจุดจากชุดข้อมูลจุดที่มีลักษณะเด่นที่เรียงได้นี้เป็นจุดศูนย์กลางในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมในการฝังลายน้ำดิจิทัล $P_k^c, k=1,2,\dots,L$ โดยที่ L คือจำนวนจุดศูนย์กลางที่คัดเลือก ตัวอย่างของจุดศูนย์กลางที่คัดเลือกแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยจุดศูนย์กลางแสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลม ส่วนตัวเลขภายในวงกลมแสดงถึงอันดับของการเรียงลำดับคะแนน

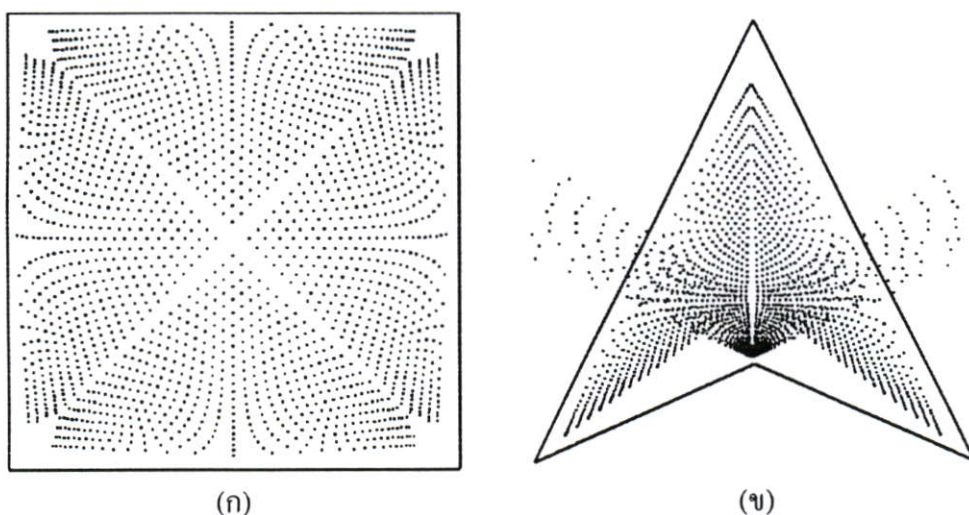


รูปที่ 4.9 จุดที่มีลักษณะเด่นที่ถูกคัดเลือกเป็นจุดศูนย์กลางเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม

4.1.3 การสร้างและการคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยม

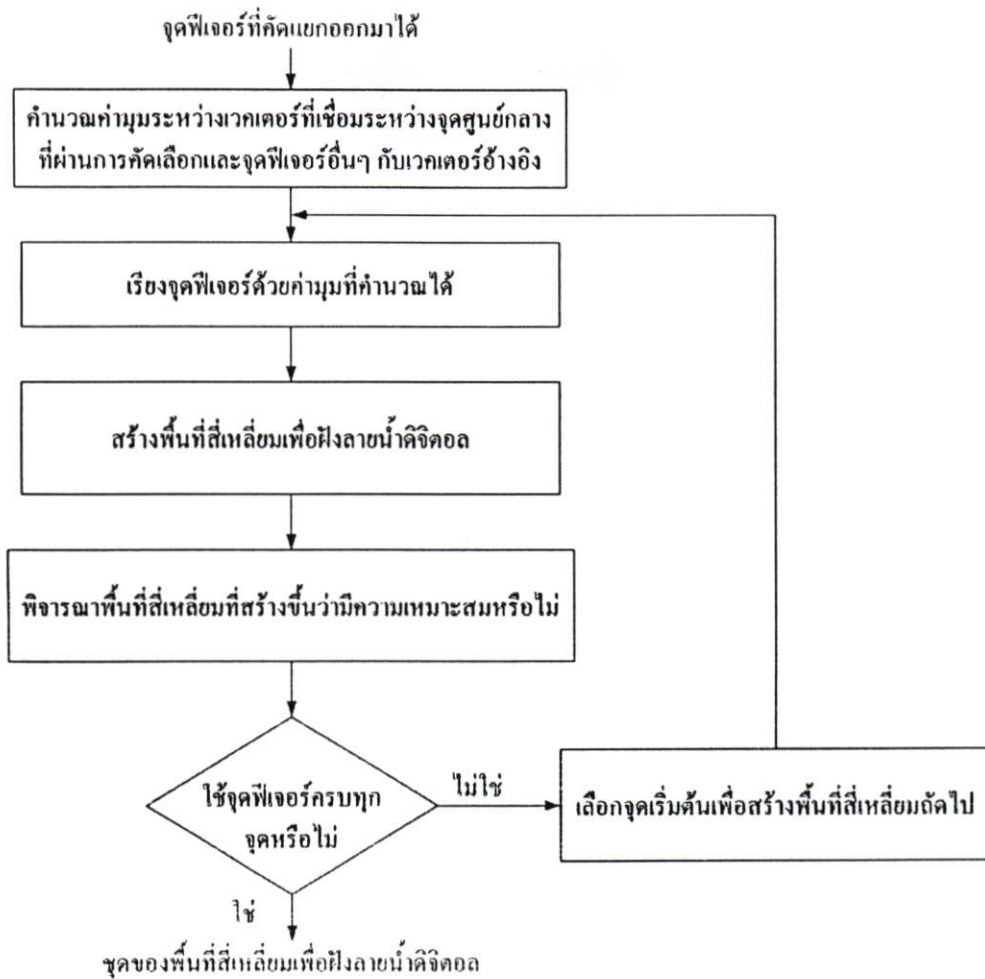
ขั้นตอนนี้เป็นการนำเอาจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้จากรูปภาพ มาทำการสร้างเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสมต่อการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยจะใช้จุดศูนย์กลางที่ทำการคัดเลือกมาจาก

หัวข้อ 4.1.2 เป็นจุดร่วมของแต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้น พื้นที่สี่เหลี่ยมนี้จะถูกใช้เพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงเชิงภาพฉาย ซึ่งคำนวณตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยค่าอัตราส่วนไขว้ และตำแหน่งจุดตัดของเส้นตรงดังหัวข้อ 3.5 เนื่องจากวิธีการคำนวณตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลในหัวข้อ 3.5 นี้ จำเป็นต้องใช้พื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นคอนเว็กซ์-ฮัล กล่าวคือตำแหน่งจุดตัดเส้นทแยงมุมทั้งสองของรูปทรงสี่เหลี่ยมจะต้องอยู่ภายในรูปทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากว่าในรูปสี่เหลี่ยมที่เป็นคอนเว็กซ์-ฮัลนั้นจะมีการกระจายของตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัลที่ดีกว่าลักษณะสี่เหลี่ยมที่เป็นคอนเคฟ(Concave) ดังรูปที่ 4.10 อีกทั้งลักษณะของรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ให้ผลลัพธ์ในการฝังลายน้ำดิจิทัลที่ดีนั้น ควรจะมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก รวมทั้งมีขนาดของพื้นที่ที่ใหญ่เพียงพอต่อการฝังลายน้ำดิจิทัลทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลในพื้นที่สี่เหลี่ยมเกิดการซ้อนทับกัน



รูปที่ 4.10 การกระจายของตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัล (ก)รูปทรงที่เป็นคอนเว็กซ์-ฮัล (ข)รูปทรงที่เป็นคอนเคฟ

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอวิธีการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล รวมทั้งการคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีคุณภาพเพียงพอต่อการฝังลายน้ำ โดยมีแผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมดังรูปที่ 4.11 และรหัสคำสั่งเสมือนดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล

```

Function CreateQuad (Featured:Feature Data)
{
    Sort_Angle :Feture2Quad_Data;
    // Feture2Quad_Data is structure {x,y:Integer angle:Real}//
    Quad, Quad_Temp: Array of Coordinate;
    N,Start,Point : Integer; CenterPoint : Coordinate;
    N=0;
    For each center point
        Sort_Angle.angle = ComputeAngle(Featured);
        Sort_Angle = SortByAngle(Sort_Angle);
        Start = 1;
        While Start < NumFeature-2
            Quad_Temp(1) = CenterPoint;
            For j=2:4
                Quad_Temp(j).x = Sort_Angle(Start+(j-2)).x;
                Quad_Temp(j).y = Sort_Angle(Start+(j-2)).y;
            End
            If Check(Quad_Temp) = True
                Quad(N)=Quad_Temp;
                Start=Start+2;
                N=N+1;
            Else
                Start=Start+1;
            End
        End
    End
    Return(Quad);
}

```

รูปที่ 4.12 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิตอล

โดยขั้นตอนในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล สำหรับแต่ละจุดศูนย์กลางที่ได้คัดเลือกนั้นมีดังนี้

1. ทำการคำนวณหามุมระหว่างเวกเตอร์ที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลาง, P_k^c และจุดที่มีลักษณะเด่นอื่น ๆ กับเวกเตอร์อ้างอิงหนึ่งหน่วย $\mathbf{v} = [0 \ 1]$ จากนั้นทำการเรียงจุดที่มีลักษณะเด่นทุกจุดยกเว้นจุดศูนย์กลางด้วยค่ามุมที่คำนวณได้, $P_i^{sf}, i = 1, 2, \dots, N_f - 1$ ตัวอย่างการสร้างเวกเตอร์ที่คำนวณมุมแสดงดังรูปที่ 4.13 (ตัวแปร Sort_Angle ในรูปที่ 4.12)



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการคำนวณหามุมของแต่ละจุดที่มีลักษณะเด่น

โดยการคำนวณมุมระหว่างเวกเตอร์สามารถคำนวณได้โดยการใช้ค่าผลคูณภายในของเวกเตอร์ (Dot product) ดังสมการที่ 4.2

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|} \quad : 0 \leq \theta \leq \pi \quad (4.2)$$

ซึ่งหากกำหนดให้ $\mathbf{A} = xi + yj$ และ $\mathbf{B} = \mathbf{j}$ แล้วจะได้ว่า

$$\theta = \begin{cases} \cos^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} & : x \leq x_c \\ \pi + \cos^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} & : x > x_c \end{cases} \quad (4.3)$$

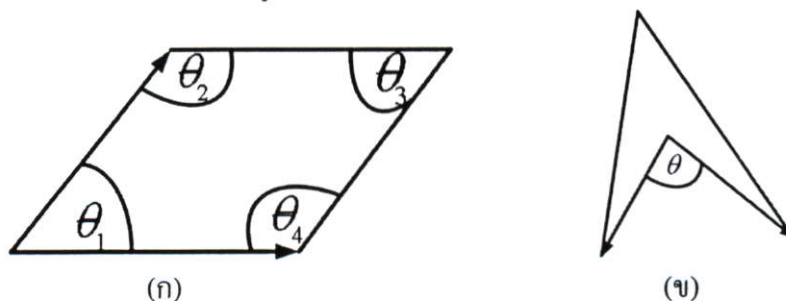
2. ทำการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยใช้จุดศูนย์กลาง P_k^c ร่วมกับจุดที่มีลักษณะเด่นอื่นๆ อีกสามจุดที่อยู่ติดกันในรายการจุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการเรียงข้อมูลแล้ว ดังรูปที่ 4.14 (ตัวแปร Quad_Temp ในรูปที่ 4.12)



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล

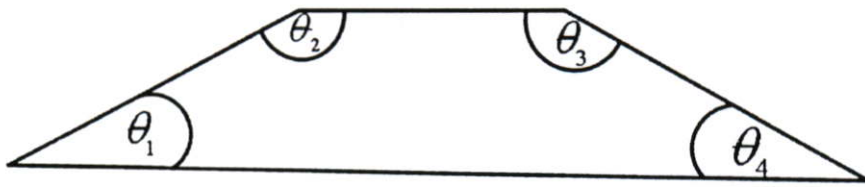
3. ทำการตรวจสอบพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากว่าพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีรูปทรงไม่เหมาะสมนั้น จะทำให้การฝังลายน้ำดิจิทัลไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลล้มเหลว โดยจะทำการตรวจสอบพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นด้วยปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- ลักษณะรูปทรง : ดังจากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าพื้นที่สี่เหลี่ยมที่จะสามารถใช้งานได้นั้น จะต้องมิลักษณะเป็นคอนเวกซ์-ฮัล วิธีการที่จะใช้ในการตรวจสอบคือใช้การหาผลรวมของมุมภายในของพื้นที่สี่เหลี่ยมโดยใช้ผลคูณภายในของเวกเตอร์ที่เชื่อมระหว่างจุดมุมนั้นๆ ไปยังจุดมุมข้างเคียงพื้นที่สี่เหลี่ยม ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การพิจารณารูปทรงสี่เหลี่ยมโดยใช้ผลคูณภายในของเวกเตอร์ (ก) รูปทรงที่เป็นคอนเวกซ์-ฮัล (ข) รูปทรงที่ไม่เป็นคอนเวกซ์-ฮัล

เนื่องจากว่าผลลัพธ์ของมุมระหว่างเวกเตอร์ที่คำนวณได้จาก ค่าผลคูณภายในของเวกเตอร์นั้นจะมีค่าระหว่าง 0 องศา ถึง 180 องศา ดังนั้นสำหรับรูปทรงที่เป็นคอนเวกซ์-ฮัลล์นั้นค่าของมุมแต่ละมุมนั้นจะไม่เกิน 180 องศา ซึ่งผลของมุมที่คำนวณจากผลคูณภายในนั้นจะเป็นค่ามุมที่อยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมทั้ง 4 มุมดังรูปที่ 4.15(ก) ทำให้ผลลัพธ์ของค่ามุมทั้ง 4 จะเท่ากับ 360 องศา แต่สำหรับรูปทรงที่ไม่เป็นคอนเวกซ์-ฮัลล์นั้นจะมีมุมหนึ่งที่มีค่ามุมมากกว่า 180 องศา ซึ่งเมื่อคำนวณด้วยค่าผลคูณภายในของเวกเตอร์แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่ามุมที่อยู่ภายนอกพื้นที่สี่เหลี่ยมดังรูปที่ 4.15(ข) ดังนั้นเมื่อค่ามุมภายในของรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ไม่เป็นคอนเวกซ์-ฮัลล์ที่คำนวณได้จึงมีค่าน้อยกว่า 360 องศา

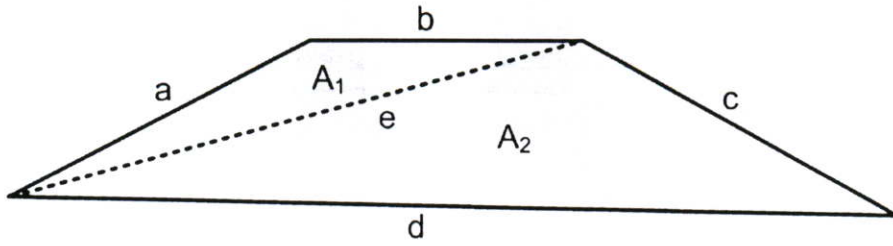


รูปที่ 4.16 การพิจารณาค่ามุมภายในของพื้นที่สี่เหลี่ยม

- มุมของรูปทรงสี่เหลี่ยม : แม้ว่ารูปทรงสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะเป็นคอนเวกซ์-ฮัลล์ก็ตาม แต่ถ้าหากมุมของพื้นที่สี่เหลี่ยมมีลักษณะที่เป็นมุมแหลม หรือมุมป้านมากเกินไป จะทำให้พื้นที่ในการฝังลายน้ำดิจิทัลแควบลง ซึ่งจะส่งผลให้โอกาสที่ตำแหน่งในการฝังลายน้ำดิจิทัลจะทับกันก็มีสูงมากขึ้นด้วย ซึ่งสามารถพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่สี่เหลี่ยมด้วยข้อมูลของมุมภายในด้วยสมการที่ 4.4 ซึ่งเป็นการพิจารณาค่ามุมภายในแต่ละมุมว่ามีความแตกต่างจากมุมฉากเพียงไรแล้วนำมาทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้

$$\theta_e = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |\theta_i - 90^\circ| \leq T_\theta \quad (4.4)$$

- ขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยม : รูปสี่เหลี่ยมที่จะนำมาฝังลายน้ำดิจิทัลแม้ว่าจะมีมุมที่เหมาะสม แต่ถ้าหากมีขนาดเล็กมากเกินไปก็จะส่งผลให้ตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลทับกันสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบขนาดพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยจะได้ทำการแบ่งพื้นที่สี่เหลี่ยมออกเป็นสามเหลี่ยมย่อยๆ สองรูปดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การคำนวณหาขนาดพื้นที่สี่เหลี่ยมใด ๆ

โดยหลังจากการแบ่งพื้นที่สี่เหลี่ยมออกเป็นสามเหลี่ยมสองพื้นที่แล้ว หลังจากนั้นทำการคำนวณหาขนาดของพื้นที่สามเหลี่ยมด้วยสมการหาขนาดพื้นที่สามเหลี่ยมใด ๆ ซึ่งจะใช้ข้อมูลความยาวในแต่ละด้านของสามเหลี่ยมมาทำการคำนวณ โดยที่ถ้ากำหนดให้ความยาวของเส้นรอบรูปในแต่ละด้านของสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ a, b และ c ขนาดของพื้นที่สามเหลี่ยมใด ๆ นั้นจะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.5

$$A = \sqrt{S(S-a)(S-b)(S-c)} \quad (4.5)$$

โดยที่ค่า S สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.6

$$S = \frac{a+b+c}{2} \quad (4.6)$$

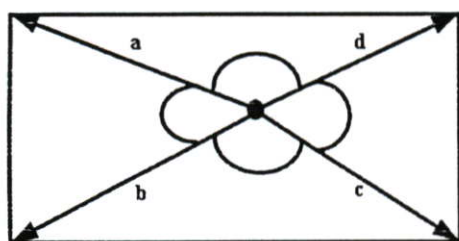
ซึ่งจากรูปที่ 4.17 หลังจากหาค่าของขนาดพื้นที่สามเหลี่ยมย่อยทั้งสองแล้วจะสามารถพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่สี่เหลี่ยมนี้ด้วยสมการที่ 4.7 ซึ่งเป็นการนำเอาขนาดของสามเหลี่ยมทั้งสองมารวมกันแล้วทำการพิจารณากับค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้

$$A_1 + A_2 \leq T_A \quad (4.7)$$

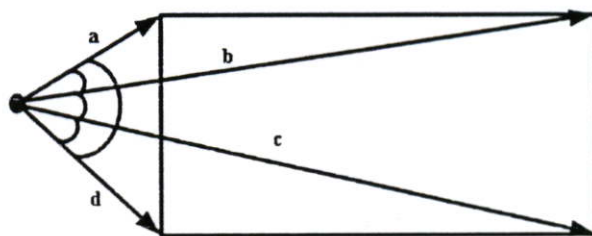
โดยตารางที่ 4.1 จะเป็นการเปรียบเทียบค่าความต่างของมุมภายในกับมุมฉาก และขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสม ในกรณีทำการฝังลายน้ําดิจิตอลด้วยตำแหน่งการฝังลายน้ําดิจิตอลจำนวน 1600 จุด ซึ่งเป็นการพิจารณาจากพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านขนาน

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความต่างของมุมภายในกับมุมฉาก และขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสม ในกรณีที่ทำกรฟ้งลายน้ำดิจิตอลด้วยตำแหน่งการฟ้งลายน้ำดิจิตอลจำนวน 1600 จุด

θ_c	ขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เล็กที่สุด (พิกเซล)
0°	15876
10°	16770
20°	17556
30°	18360
40°	19044
50°	20022



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18 การพิจารณาจุดว่าอยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมหรือไม่ (ก) จุดอยู่ภายในรูปทรงสี่เหลี่ยม (ข) จุดไม่อยู่ภายในรูปทรงสี่เหลี่ยม

- การซ้อนทับกันของพื้นที่สี่เหลี่ยม : สำหรับการฟ้งลายน้ำดิจิตอลโดยใช้จุดศูนย์กลางในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพียงจุดเดียวจะควบคุมไม่ให้เกิดการซ้อนทับกันของพื้นที่สี่เหลี่ยมได้ แต่ถ้าหากมีการใช้งานจุดศูนย์กลางมากกว่าหนึ่งจุด โอกาสที่จะเกิดการซ้อนทับกันของพื้นที่สี่เหลี่ยมจะมีมากขึ้น วิธีการที่จะพิจารณาว่ามีการซ้อนทับกันของพื้นที่สี่เหลี่ยมหรือไม่ กระทำได้โดยถ้ากำหนดให้ Q และ Q' เป็นเซตของจุดมุมของพื้นที่สี่เหลี่ยมสองพื้นที่ พื้นที่ทั้งสองจะไม่ซ้อนทับกันก็ต่อเมื่อจำนวนสมาชิกของ $(Q \cap Q')$ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 และไม่มีจุดใดจุดหนึ่งในเซต Q ไปอยู่ในพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างด้วยสมาชิกของเซต Q' รวมทั้งในทางกลับกันด้วย ซึ่งสามารถพิจารณาว่าจุดนั้นๆ อยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมหรือไม่ได้จากมุมระหว่างเวกเตอร์ที่เชื่อมระหว่างจุดนั้นๆ ไปยังจุดมุมทั้งสี่ของพื้นที่สี่เหลี่ยม (มุมระหว่างเวกเตอร์ ab, bc, cd, da ในรูป 4.18) ซึ่งหากว่าจุดมุมนั้นๆ อยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมผลรวมของมุมระหว่างเวกเตอร์จะเท่ากับ 360 องศา ดังรูป 4.18(ก) แต่ถ้าหากว่าจุดมุมนั้นๆ อยู่ภายนอกพื้นที่สี่เหลี่ยมผลรวมของมุมระหว่างเวกเตอร์นี้จะน้อยกว่า 360 องศา ดังรูป 4.18(ข)

4. หากผลการพิจารณาพื้นที่สี่เหลี่ยมในขั้นตอนที่ 3 พบว่าเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เข้าตามเงื่อนไขที่กำหนด จุดเริ่มต้นในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมถัดไปคือจุดที่สามของชุดข้อมูลที่นำมาสร้างเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมในขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.19(ก) แต่ถ้าหากผลการพิจารณาพื้นที่สี่เหลี่ยมในขั้นตอนที่ 3 พบว่าเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ไม่เหมาะสม จุดเริ่มต้นในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมถัดไปคือจุดถัดไปของจุดเริ่มต้นเดิมในขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.19(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 จุดเริ่มต้นในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมถัดไปหลังจากผ่านการพิจารารูปทรงสี่เหลี่ยมก่อนหน้าแล้ว (ก) รูปทรงสี่เหลี่ยมก่อนหน้ามีความเหมาะสม (ข) รูปทรงสี่เหลี่ยมก่อนหน้าไม่มีความเหมาะสม

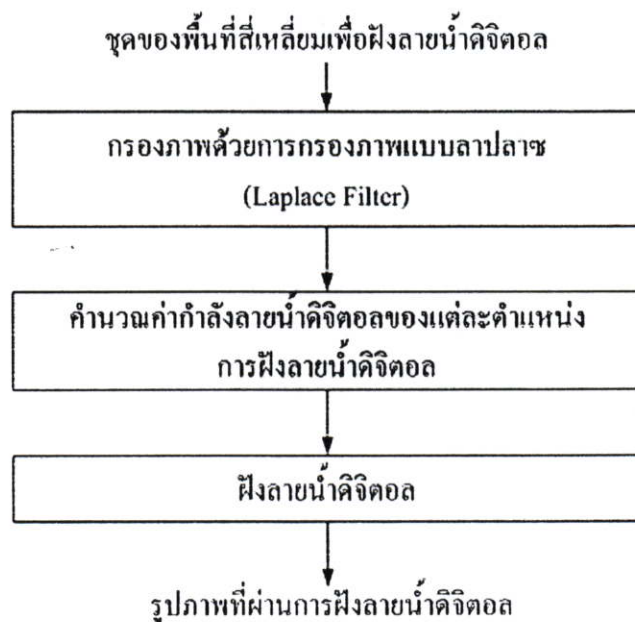
5. ทำการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมอื่นๆ ด้วยวิธีการในขั้นตอนที่ 2-4 ซ้ำ จนกว่าจะพิจารณาครบทุกจุดที่มีลักษณะเด่น รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างได้โดยให้ค่าความต่างของมุมภายในกับมุมฉากเท่ากับ 50° และมีขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ 20022 พิกเซล (ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้คือตัวแปร Quad ในรูปที่ 4.11)



รูปที่ 4.20 พื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล

4.1.4 การฝังลายน้ำดิจิทัล

หลังจากที่ได้ทำการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมแล้วดังขั้นตอนที่ 4.1.3 ขั้นตอนนี้เป็นการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยจะทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงไปยังตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลที่คำนวณจากค่าอัตราส่วนไขว้และตำแหน่งจุดตัดของเส้นตรง ด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัมซึ่งเป็นวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน และการบีบอัดต่างๆ โดยทำการปรับปรุงวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัมดังสมการที่ 2.1 โดยจะได้นำเอาคุณลักษณะของการมองเห็นของมนุษย์เข้ามาพิจารณาค่ากำลังของการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วย[2] โดยมีแผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมดังรูปที่ 4.21 และรหัสคำสั่งเสมือนดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัล

```

Function Embedding (Quad:Array of coordinate,I:Image, Power:Interger,Wm:Watermark)
{
    k : Array of Real;
    EmbedPoint : Array of Coordinate;
    k = LaplaceFilter(I);
    For i=1:NumQuad
        EmbedPoint=ComputeEmbedPoint(Quad(i));
        For j=1:NumWatermarkLocation
            I(EmbedPoint(j).x,EmbedPoint(j).y)=I(EmbedPoint(j).x,EmbedPoint(j).y)+...
                ...k(EmbedPoint(j).x,EmbedPoint(j).y)*Power)*...
                ...Wm(EmbedPoint(j).x,EmbedPoint(j).y);
        End
    End
    Return(I);
}

```

รูปที่ 4.22 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัล

ขั้นตอนในการฝังลายน้ำดิจิทัลมีดังนี้

1. ทำการกรองภาพที่จะฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยอัลกอริทึมของลาปลาซ (Laplace filter) ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการตรวจจับพื้นที่ส่วนที่เป็นขอบ รวมทั้งจุดที่มีความแตกต่างจากจุดรอบข้างได้เป็นอย่างดี ซึ่งพื้นที่บริเวณเหล่านั้นจะเป็นพื้นที่ที่สามารถจะฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยกำลังของลายน้ำที่สูงได้ สำหรับอัลกอริทึมการกรองภาพของลาปลาซเป็นดังสมการที่ 4.8

$$\nabla^2 I = I(x+1, y) + I(x-1, y) + I(x, y+1) + I(x, y-1) - 4I(x, y) \quad (4.8)$$

โดยที่ I คือรูปภาพที่จะทำการฝังลายน้ำดิจิทัล, $\nabla^2 I$ คือผลการกรองภาพด้วยการกรองภาพของลาปลาซ และ (x, y) คือพิกัดของตำแหน่งภายในรูปภาพ

ค่าผลการกรองภาพนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดขนาดของกำลังของลายน้ำ โดยจะทำการคำนวณค่าปรับระดับกำลังของลายน้ำดิจิทัล, k ซึ่งกำหนดให้อยู่ในระหว่างค่า k_{\min} และ k_{\max} โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.9 และ 4.10

$$k_i(x_i, y_i) = \frac{I_L(x_i, y_i) \cdot k_{\max}}{\max_{\substack{1 \leq x_i \leq M \\ 1 \leq y_i \leq N}}(I_L(x_i, y_i))} \quad (4.9)$$

สมการที่ 4.5 เป็นการคำนวณเพื่อจำกัดค่าของผลลัพธ์การกรองภาพให้ไม่เกินค่า k_{\max} โดยที่ $I_L(x_i, y_i)$ คือรูปภาพที่ผ่านการกรองภาพแล้ว $\max_{\substack{1 \leq x_i \leq M \\ 1 \leq y_i \leq N}}(I_L(x_i, y_i))$ คือค่าความสว่างที่สูงที่สุดของรูปภาพที่ผ่านการกรองภาพแล้ว เนื่องจากว่าผลลัพธ์ของสมการที่ 4.9 อาจจะมีค่าต่ำมากเกินไปซึ่งจะไปส่งผลให้กำลังของลายน้ำดิจิทัลมีค่าลดลงไปมากดังนั้นค่าปรับระดับกำลังของลายน้ำดิจิทัล, k ซึ่งจะใช้ในการพิจารณากำลังของลายน้ำดิจิทัลที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่นั้นๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.10 (ตัวแปร k ในรูปที่ 4.22)

$$k(x_i, y_i) = \begin{cases} k_i(x_i, y_i) & : k_i(x_i, y_i) \geq k_{\min} \\ k_{\min} & : k_i(x_i, y_i) < k_{\min} \end{cases} \quad (4.10)$$

2. ทำการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัม (ตัวแปร I ในรูปที่ 4.20) โดยที่นำเอาค่าปรับระดับกำลังของลายน้ำดิจิทัล, k ซึ่งคำนวณได้ในขั้นตอนที่แล้วมาทำการพิจารณาคำแนะนำการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วย โดยสมการการฝังลายน้ำดิจิทัลเป็นดังสมการที่ 4.11

$$I_e(x_i, y_i) = I(x_i, y_i) + (k(x_i, y_i) \cdot \alpha \cdot W_i) \quad (4.11)$$

โดยกำหนดให้ตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัล $p_i^e, i = 1, 2, \dots, N$ โดยที่ N คือจำนวนบิตของลายน้ำดิจิทัล และให้ลายน้ำดิจิทัล $W_i \in \{1, -1\}, i = 1, 2, \dots, N, I_e(x_i, y_i)$ คือรูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัล, $I(x_i, y_i)$ คือรูปภาพก่อนการฝังลายน้ำดิจิทัล, (x_i, y_i) คือตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัล p_i^e และ α คือค่ากำลังของลายน้ำดิจิทัลเริ่มต้น

ในการฝังลายน้ำดิจิทัลจะทำการฝังลายน้ำดิจิทัลในบริเวณข้างเคียงของตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลที่คำนวณได้ไว้ด้วย เนื่องจากว่าในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลอาจจะมีการคำนวณที่คลาดเคลื่อนไปบ้าง สำหรับตำแหน่งข้างเคียงนั้นควรจะให้ค่ากำลังลายน้ำดิจิทัลต่ำกว่าตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัลที่คำนวณได้ เพื่อให้รูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลมีคุณภาพที่ดี

ตัวอย่างของรูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัล โดยที่ไม่ได้ทำการพิจารณาค่ากำลังของลายน้ำดิจิทัล คุณลักษณะการมองเห็นของมนุษย์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.23(ก) และรูปที่ 4.23(ข) แสดงรูปภาพที่ฝัง

ลายน้ำดิจิทัลด้วยการพิจารณาค่ากำลังของลายน้ำดิจิทัลด้วยคุณลักษณะการมองเห็นของมนุษย์ โดยมีค่ากำลังลายน้ำดิจิทัลเริ่มต้นเท่ากับ 10



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างรูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัล (ก) พิจารณาค่ากำลังลายน้ำด้วยลักษณะของรูปภาพ (ข) ไม่พิจารณาค่ากำลังลายน้ำด้วยลักษณะของรูปภาพ

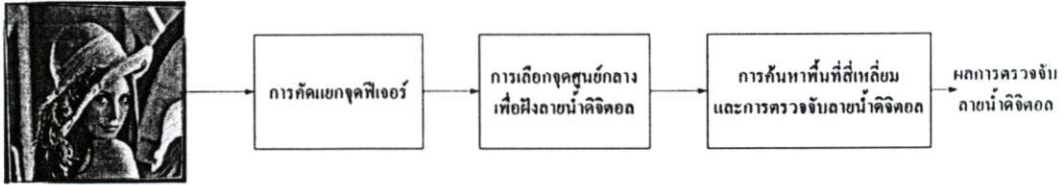
4.2 การค้นหาพื้นที่ฝังลายน้ำดิจิทัลสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

เนื่องจากจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาจากรูปภาพที่มีการบิดเบือนไปนั้น มีโอกาสที่จะมีความแตกต่างจากชุดข้อมูลจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกได้จากรูปภาพต้นฉบับ โดยอาจจะมีจุดที่มีลักษณะเด่นบางจุดที่หายไป และมีจุดที่มีลักษณะเด่นบางจุดที่เพิ่มเข้ามา ดังนั้นวิธีการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลดังที่อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 4.1 ไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรงในขั้นตอนนี้ แนวทางที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมได้โดยง่ายคือการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่อยู่ภายในรูปภาพ ซึ่งการค้นหาด้วยวิธีการนี้นั้นจะต้องใช้การคำนวณที่สูง โดยเฉพาะในกรณีที่มีจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากว่าความน่าจะเป็นที่แต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมจะมีโอกาสเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลนั้นมีเท่าๆ กัน

ในหัวข้อนี้ จะได้นำเสนอวิธีการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมภายในรูปภาพที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลสำหรับขั้นตอนในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล ที่จะช่วยลดความซับซ้อนจากการค้นหาแบบทั้งหมดได้ เนื่องจากในขั้นตอนของการฝังลายน้ำดิจิทัลนั้นได้มีการคัดเลือกจุดศูนย์กลางที่มีความหนาแน่นไว้แล้ว ดังนั้นการค้นหาไม่จำเป็นจะต้องกระทำกับทุกๆ พื้นที่สี่เหลี่ยม โดยจะค้นหาเพียงแค่พื้นที่

สี่เหลี่ยมที่สร้างจากจุดศูนย์กลาง ที่มีความน่าจะเป็นจุดศูนย์กลางที่ใช้สร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมสูงเท่านั้น ซึ่งอัลกอริทึมในส่วนของกาฟ้งลายน้ำดิจิทัลเป็นดังรูปที่ 4.24 ดังที่อธิบายได้ดังต่อไปนี้

รูปภาพที่กล่าวถึงกาฟ้งลายน้ำดิจิทัล



รูปที่ 4.24 กระบวนการตรวจจบบลายน้ำดิจิทัล

4.2.1 การคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพ

ขั้นตอนนี้เป็นการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นทั้งหมดที่เป็นไปได้จากรูปภาพทั้งหมด ด้วยวิธีการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นที่ได้เลือกใช้ขั้นตอนการฟ้งลายน้ำดิจิทัล ตัวอย่างจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้จากรูปภาพเป็นดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 จุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาจากรูปภาพที่ถูกบิดเบือน

จากรูปที่ 4.25 พบว่าจะมีจุดที่มีลักษณะเด่นที่แตกต่างออกไปจากรูปภาพต้นฉบับ รวมทั้งยังมีจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่บริเวณขอบของรูปภาพด้วย ซึ่งในขั้นตอนนี้ถ้าหากสามารถกำหนดตำแหน่งของรูปภาพได้อย่างแน่ใจว่าไม่เกิดการตัดแบ่งส่วนภาพ และแน่ใจว่าบริเวณใดคือขอบของรูปภาพต้นฉบับก็จะสามารถคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นบางส่วนออกมาได้ โดยเลือกเฉพาะจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ภายในรูปภาพจริงๆ แต่ถ้าไม่สามารถจะบ่งบอกบริเวณที่แท้จริงของรูปภาพได้ การ

คัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นนั้นจะไม่สามารถกระทำได้เพราะอาจจะส่งผลให้จุดที่มีลักษณะเด่นที่ใช้ในการฝังลายน้ำดิจิทัลถูกคัดออกไปได้

4.2.2 การคัดเลือกจุดศูนย์กลางเพื่อใช้ในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยม

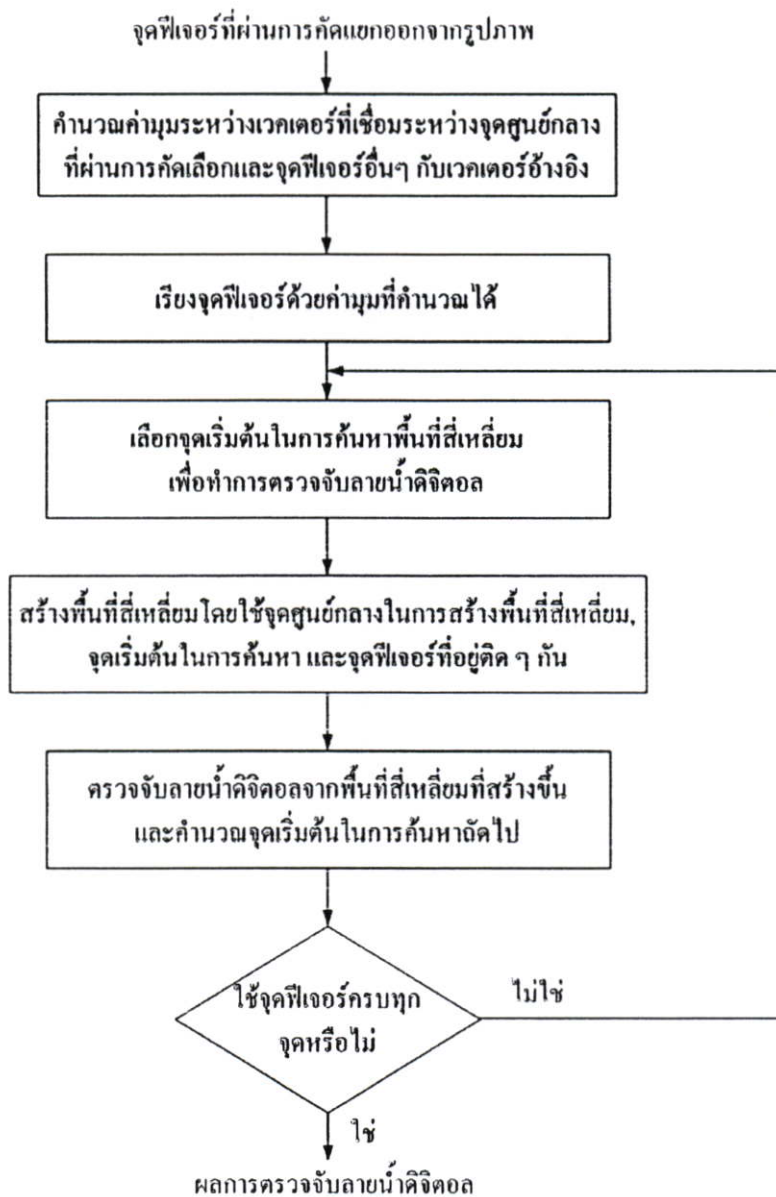
ขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกจุดศูนย์กลาง P_k^c เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.1.2 ซึ่งเป็นขั้นตอนการคัดเลือกจุดศูนย์กลางเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการฝังลายน้ำดิจิทัล สำหรับจำนวนของจุดศูนย์กลางที่คัดเลือกออกมาจากชุดข้อมูลจุดที่มีลักษณะเด่นในขั้นตอนนี้ ควรจะมีมากกว่าจำนวนจุดศูนย์กลางที่ใช้งานในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากว่าค่าคะแนนที่คำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4.1 ของแต่ละจุดที่มีลักษณะเด่นอาจจะเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อย อันส่งผลให้อันดับหลังการเรียงลำดับจุดที่มีลักษณะเด่นเหล่านี้ด้วยค่าคะแนนที่คำนวณได้นั้นเปลี่ยนแปลงไปได้ ตัวอย่างจุดศูนย์กลางที่ผ่านการคัดเลือกเป็นดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 จุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดเลือกมาเป็นจุดศูนย์กลาง

รูปที่ 4.26 นี้เป็นการคัดเลือกจุดศูนย์กลางจากชุดข้อมูลจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้จากรูปภาพที่มีการบิดเบือน โดยทำการคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่ได้คะแนนบ่งบอกความเหมาะสมต่อการเป็นจุดศูนย์กลาง 5 อันดับแรก จากรูปที่ 4.26 นี้พบว่าจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดเลือกออกมาได้เป็นอันดับที่ 1 และ 2 ในขั้นตอนที่ 4.1.2 นั้นยังคงได้รับคะแนนเป็นอันดับที่ 1 และ 2 เช่นเดิม ส่วนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ได้คะแนนเป็นอันดับ 3 ในขั้นตอนที่ 4.1.2 นั้น ได้รับคะแนนเป็นอันดับ 4 ในขั้นตอนนี้ ซึ่งจะพบว่าอันดับของจุดที่มีลักษณะเด่นที่เป็นจุดศูนย์กลางในการค้นหานั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงจากอันดับเดิมมากนัก ซึ่งส่งผลให้ สามารถจำกัดขอบเขตในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมให้อยู่เฉพาะพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างจากจุดศูนย์กลางที่คัดเลือกในขั้นตอนนี้ได้

4.2.3 การค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมและการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล
 ขั้นตอนนี้เป็นการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล โดยมีแผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมดังรูปที่ 4.27 และรหัสคำสั่งเสมือนดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำ

```

Function SearchAndDetect (Featured:Featured Data,I:Image,Wm:Watermark)
{
    Sort_Angle :Feture2Quad_Data;
    Quad, Detect_Quad: Array of Coordinate;
    Start,Information,NumConsecPoint : Integer;
    CenterPoint : Coordinate;
    For each center point
        Sort_Angle.angle = ComputeAngle(Featured);
        Sort_Angle = SortByAngle(Sort_Angle);
        Start = 1;
        While Start < NumFeature
            Quad = Combination(CenterPoint,Start,Sort_Angle,NumConsecPoint);
            [Result, Detect_Quad] = Detect(I,Wm,Quad);
            If (Watermark couldn't be founded)
                Start=Start+1;
            Else
                Start=Detect_Quad[3];
            End
        End
    End
    Return(Result);
}

```

รูปที่ 4.28 รหัสคำสั่งเสมือนของอัลกอริทึมการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำ

ขั้นตอนในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล สำหรับแต่ละจุดศูนย์กลางที่ได้คัดเลือกนั้นมีดังนี้

1. ทำการคำนวณหามุมระหว่างเวกเตอร์ที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลาง, P_k^c และจุดที่มีลักษณะเด่นอื่น ๆ กับเวกเตอร์อ้างอิงแล้วทำการเรียงจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาด้วยค่ามุมที่คำนวณได้ ดังขั้นตอนที่ 1 ในหัวข้อ 4.1.3 (ตัวแปร Sort_Angle ในรูปที่ 4.28)

2. ทำการเลือกจุดที่จะเป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหา, P_k^s จากกลุ่มของจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติด ๆ กันในรายการจุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการเรียงแล้ว เช่นจากรูปที่ 4.29 จุดเริ่มต้นในการค้นหาคือ P_1^s จากกลุ่มของจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดกัน 6 จุด, P_1^s ถึง P_6^s จำนวนของจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติด ๆ กันในรายการจุดที่มีลักษณะเด่นที่ผ่านการเรียงข้อมูลแล้วนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญต่อกระบวนการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมเนื่องจากว่า ถ้าหากมีการใช้จุดที่มีจำนวนน้อยเกินไป จะไม่สามารถแก้ไขปัญหอันเกิดมาจากจุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอมที่แทรกอยู่ระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมได้ แต่ถ้าหากมีการใช้จุดที่มีจำนวนมากเกินไปจะทำให้มีความซับซ้อนในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.29 จุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติด ๆ กันสำหรับกระบวนการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยม

3. ใช้จุดศูนย์กลาง P_k^c และ P_k^s เป็นสองจุดหลักเพื่อสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากจุดที่มีลักษณะเด่นในกลุ่มนั้น โดยที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นมานั้นจะต้องผ่านการตรวจสอบรูปทรงของพื้นที่สี่เหลี่ยมเสียก่อนว่ามีลักษณะเป็นคอนเวกซ์-ฮัลหรือไม่ดังที่อธิบายไปแล้วในขั้นตอนที่ 3 ของหัวข้อ 4.1.3 ส่วนปัจจัยอื่นๆ นั้นไม่สามารถจะนำมาคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมได้เนื่องจากมุมภายใน และขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยมมีโอกาที่จะเปลี่ยนแปลงไปได้

4. ทำการตรวจจับลายนิ้วดิจิตอลจากพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ผ่านการคัดเลือกในขั้นตอนที่ 3 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) โดยใช้สมการที่ 4.12

$$C(I'_e, W) = \frac{\sum_{i=1}^N (I'_e(x_i, y_i) - \bar{I}'_e(x_i, y_i)) \cdot (W_i - \bar{W})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I'_e(x_i, y_i) - \bar{I}'_e(x_i, y_i))^2 \cdot \sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2}} \quad (4.12)$$

โดยที่ (x_i, y_i) คือตำแหน่งของการฝังลายน้ำดิจิทัลที่คำนวณจากรูปภาพ $I'_e(x_i, y_i)$, $\bar{I}'_e(x_i, y_i)$ คือค่าเฉลี่ยของค่าความสว่างของรูปภาพ $I'_e(x_i, y_i)$, W_i คือสัญญาณสุ่มแบบเสมือนที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัล ณ ตำแหน่ง (x_i, y_i) โดยได้ผ่านการคูณด้วยค่าปรับระดับกำลังของลายน้ำดิจิทัล, k ที่ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.7 แล้วและ \bar{W} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลลายน้ำดิจิทัลทั้งหมดที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลและผ่านการคูณด้วยค่าปรับระดับกำลังของลายน้ำดิจิทัล, k ในแต่ละตำแหน่งที่ฝังลายน้ำดิจิทัลแล้ว

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $C(I'_e, W)$ นี้จะถูกคำนวณเพื่อปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติ (Normalize correlation coefficient) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.13

$$C_n(I'_e, W) = C(I'_e, W) \cdot \sqrt{N} \quad (4.13)$$

โดยที่ N คือจำนวนบิตข้อมูลของลายน้ำดิจิทัล

การปรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบปกตินี้ เพื่อที่จะให้ผลของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่มีจำนวนของตำแหน่งการฝังลายน้ำดิจิทัลต่างกัน สามารถเปรียบเทียบกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาค่าขีดแบ่งในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปแบบการแจกแจงข้อมูลแบบปกติได้ กล่าวคือผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพหรือพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ไม่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลจะมีลักษณะการแจกแจงเช่นเดียวกับการแจกแจงข้อมูลปกติ คือมีค่าเฉลี่ยของข้อมูลเป็น 0 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 ดังนั้นค่าขีดแบ่งสามารถกำหนดจากการแจกแจงปกติได้ทันที โดยสามารถเลือกค่าขีดแบ่งได้จากระดับค่าสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด (False alarm) ที่ต้องการ

5. ถ้าหากในขั้นตอนที่ 4 สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ จุด P_k^s สำหรับชุดการค้นหาถัดไปคือจุดที่สามของชุดข้อมูลจุดที่มีลักษณะเด่น ที่นำมาประกอบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ เช่นจากรูป 4.30 (ก) พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำดิจิทัลประกอบไปด้วยจุด $(P_1^c, P_1^1, P_1^2, P_1^3)$ จุดที่สามของชุดข้อมูลจุดที่มีลักษณะเด่นที่นำมาประกอบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้คือจุด P_1^3 แต่ถ้าหากในขั้นตอนที่ 4 ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ เลขจุด P_k^s สำหรับชุดการค้นหาถัดไป คือจุดถัดไปของจุด P_k^s ของชุดข้อมูลที่ทำการค้นหาก่อนหน้านี้ เช่นจากรูปที่ 4.30(ข) หากไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ จุด P_k^s ของการค้นหาชุดถัดไปคือ P_1^2 จากนั้นทำการย้อนกลับไปทำในขั้นตอนที่ 3-5 อีกครั้งจนกว่าจะทำการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมด้วยจุดที่มีลักษณะเด่นทุกจุดที่มีลักษณะเด่น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.30 การเลื่อนจุดข้อมูลการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยม (ก) พบพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ฝังลายน้ำดิจิทัล (ข)
ไม่พบพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ฝังลายน้ำดิจิทัล

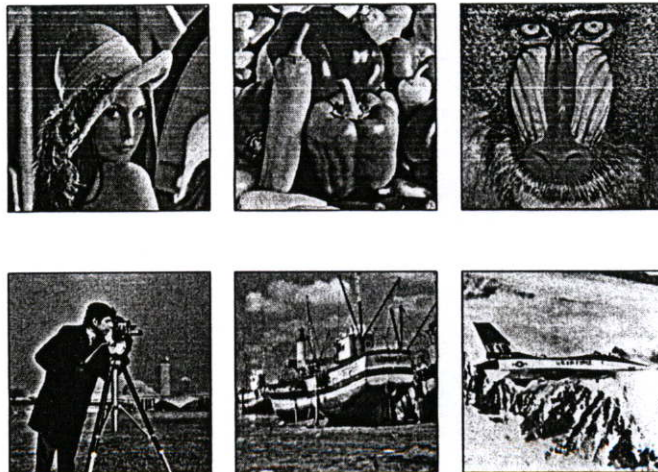
บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย

- เครื่องคอมพิวเตอร์ PC Intel Pentium III 900 MHz หน่วยความจำ 512 MB
- กล้องถ่ายภาพดิจิทัล Panasonic Lumix DMC-FZ5
 - ความละเอียดสูงสุดในการถ่ายภาพเท่ากับ 5 ล้านพิกเซล
 - เลนส์ซูมภาพ LEICA DC Vario Elmarit 12X (36-420 มม.)
- เครื่องกราดภาพ Cannon Canoscan D646U ex
 - ความละเอียดสูงสุดในการกราดภาพเท่ากับ 600x1200 dpi
- พัฒนาโปรแกรมเพื่อตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB 6.5.1 Release 13
- รูปภาพระดับสีเทาในรูปแบบเพิ่มข้อมูลดิจิทัลจำนวน 50 รูป จากฐานข้อมูลภาพ USC-SIPI [21] และฐานข้อมูลภาพ Cities and Building [22] ตัวอย่างรูปภาพที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1
- ค่าขีดแบ่งที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 3.08 ซึ่งจะให้ค่าสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดเท่ากับร้อยละ 0.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างรูปภาพที่ใช้ในการทดลอง

5.2 การทดลอง

การทดลองที่จัดขึ้นนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล ซึ่งในการทดลองจะได้ทำการแยกแยะการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลออกเป็น 3 ระดับคือ

- ตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่บิดเบือน โดยกำหนดจุดที่เป็นจุดมุมของพื้นที่ ที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัล ทั้งนี้การตรวจสอบนี้จะให้ผลลัพธ์ว่าพื้นที่ที่ฝังลายน้ำดิจิทัลที่ไม่สามารถตรวจจับได้เกิดจากสาเหตุของความผิดเพี้ยนของภาพมีจำนวนเท่าไร

- ตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่บิดเบือน โดยพิจารณาจากจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ การตรวจสอบนี้จะให้ผลลัพธ์ว่าพื้นที่ที่ฝังลายน้ำดิจิทัลที่ไม่สามารถตรวจจับได้เกิดจากสาเหตุของความผิดเพี้ยนของภาพ รวมทั้งความผิดพลาดในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นจากรูปภาพมีจำนวนเท่าไร

- ตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่บิดเบือน โดยใช้วิธีการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้น เนื่องจากว่าการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลไม่พบนอกจากสาเหตุของการผิดเพี้ยนของภาพ และความผิดพลาดในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นแล้ว อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้คือจำนวนของจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดๆ กันในการค้นหาพื้นที่ที่สลับในขั้นตอนของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล ซึ่งหากว่าจำนวนจุดนี้มีน้อยเกินไปจะทำให้ในขั้นตอนของการค้นหาพื้นที่ที่สลับนั้นไม่สามารถค้นพบพื้นที่ที่สลับที่ฝังลายน้ำดิจิทัลดิจิทัลจากพื้นที่ที่สลับที่มีจุดที่มีลักษณะเด่นอื่นๆ เข้ามาแทรกเป็นจำนวนมากได้

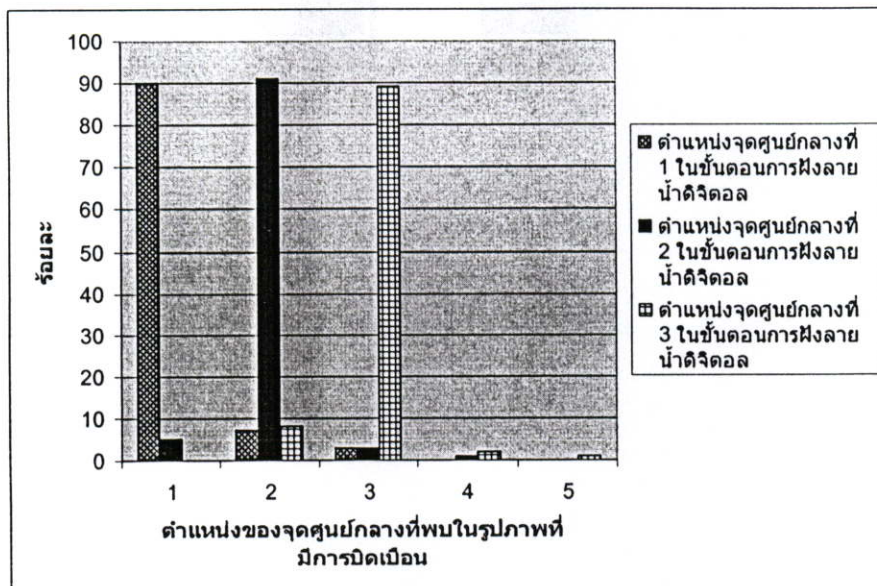
ในการทดลองจะได้แบ่งการทดลองออกเป็น 12 การทดลองดังนี้

5.2.1 การทดลองเพื่อพิจารณาค่าจำนวนจุดศูนย์กลางและจำนวนของจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดกันที่เหมาะสมเพื่อใช้ในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อพิจารณาจำนวนจุดศูนย์กลางในการสร้างพื้นที่ที่สลับ รวมทั้งจำนวนของจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดกันที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

โดยในการทดลองนี้จะใช้รูปภาพระดับสีเทาขนาดความกว้าง 512 พิกเซล และมีความสูง 512 พิกเซลจำนวน 50 รูป มาทำการสร้างพื้นที่ที่สลับด้วยการใช้จุดศูนย์กลางเท่ากับ 3 จุด หลังจากนั้นทำการบิดเบือนรูปภาพทั้ง 50 รูปในรูปแบบต่างๆ กัน 5 รูปแบบ(การแปลงเชิงภาพฉาย, การหมุนภาพ, การปรับขนาดภาพ, การเพิ่มสัญญาณรบกวน และการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ) แล้วทำการพิจารณาค่าอันดับของค่าคะแนน สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมต่อการเป็นจุดศูนย์กลางว่ามี การเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ ซึ่งผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 5.2 โดยจะพบว่าจำนวนจุดศูนย์กลางที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเท่ากับ 5 จุด



รูปที่ 5.2 ร้อยละของตำแหน่งจุดศูนย์กลางตำแหน่งต่างๆ ของรูปภาพต้นฉบับที่พบในรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน

หลังจากนั้นทำการพิจารณาจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม ซึ่งหมายถึงจุดที่มีลักษณะเด่นที่ไม่ถูกคัดแยกในรูปภาพต้นฉบับ แต่ถูกคัดแยกได้ในรูปภาพที่ถูกบิดเบือนไป และอยู่ในตำแหน่งที่แทรกระหว่างจุดที่มีลักษณะเด่นที่ประกอบกันเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม (แทรกระหว่างจุดที่ 2 ถึงจุดที่ 4 ที่ประกอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยจุดที่ 1 คือจุดศูนย์กลางในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม) ซึ่งจะแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.1 โดยจะพบว่าจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอมที่มากที่สุดคือ 3 จุด ซึ่งหมายความว่าจำนวนของจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กันเพื่อใช้ในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจะมีค่าเท่ากับ 6 จุด

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองการพิจารณาจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอมที่มากที่สุด

การบิดเบือน	จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม (ค่าสูงสุด)
การแปลงเชิงภาพฉาย	3
การหมุนภาพ	3
การปรับขนาดภาพ	3
การเพิ่มสัญญาณรบกวน	3
การบีบอัดข้อมูลรูปภาพ	3

5.2.2 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการแปลงเชิงภาพฉายด้วย การใช้วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลในงานวิจัย Geometrically Invariant Watermarking Using

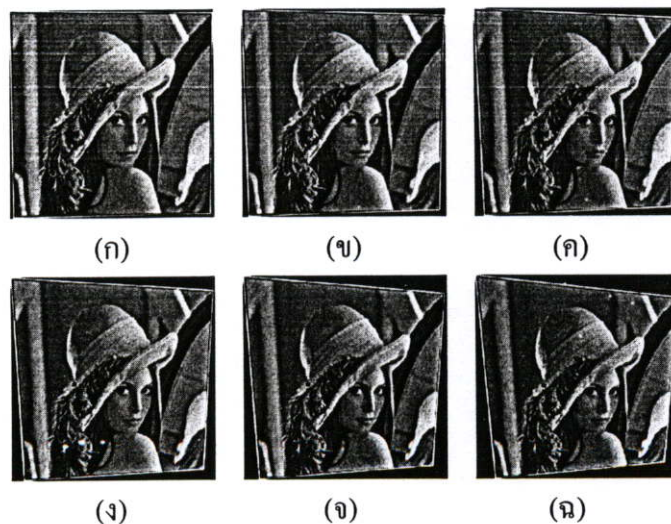
Feature Points

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ผ่านการแปลงเชิงภาพฉายด้วยวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัล และการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยการใช้วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลในงานวิจัย “Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points [17]” (หัวข้อที่ 3.4)

โดยในการทดลองนี้จะใช้รูปภาพระดับสีเทาขนาดความกว้าง 512 พิกเซล และมีความสูง 512 พิกเซลจำนวน 50 รูป เพื่อทำการคัดแยกจุดที่มีลักษณะโดดเด่น และทำการสร้างพื้นที่สามเหลี่ยมด้วยวิธีเทสเซลเลชันของเคอร์ลอนีย์ หลังจากนั้นทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงไปในแต่ละพื้นที่สามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการประมาณการแปลงเชิงสัมพรรคระหว่างข้อมูลลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในรูปแบบสี่เหลี่ยมไปยังพื้นที่สามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นนั้น โดยใช้ค่าสัญญาณสุ่มแบบเสมือนจำนวน 20 รูปแบบที่แตกต่างกันในการฝังลายน้ำดิจิทัล ซึ่งค่าเฉลี่ยของพื้นที่สามเหลี่ยมที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 32.4 พื้นที่ต่อรูปภาพ

ทำการบิดเบือนรูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยการแปลงเชิงภาพฉาย โดยใช้โปรแกรมจำลองโดยคอมพิวเตอร์ โดยแนวของการฉายจะประกอบด้วยแนวการฉายในแนวตั้งโดยที่แนวการฉายจะผ่านจุดกึ่งกลางของแต่ละแถวในรูปภาพ และแนวการฉายในแนวราบโดยที่แนวการฉายจะผ่านจุดกึ่งกลางของแต่ละคอลัมน์ในรูปภาพ ด้วยมุมของการฉายเป็น 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 องศา ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างรูปภาพที่ถูกบิดเบือนด้วยการแปลงเชิงภาพฉาย (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา (ง) มุมของการฉายเท่ากับ 20 องศา (จ) มุมของการฉายเท่ากับ 25 องศา (ฉ) มุมของการฉายเท่ากับ 30 องศา

ทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่บิดเบือนทั้งหมด โดยพิจารณาถึงจำนวนพื้นที่สามเหลี่ยมที่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการแปลงเชิงภาพฉายด้วยการใช้วิธีเทสเซลเลชันของเดอร์ลอนีย์

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	
ความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล	96.50%	93.50%	90.00%	86.50%	83.00%	79.50%	88.17%

จากการทดลองพบว่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ถูกบิดเบือนด้วยการแปลงเชิงภาพฉายนั้นโดยรวมจะสามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ร้อยละ 88.17 ของจำนวนพื้นที่สามเหลี่ยมทั้งหมดที่ทำการตรวจจับลายน้ำ โดยมีจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.054 โดยที่เมื่อมุมของการฉายมีค่ามากขึ้นค่าความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจะมีแนวโน้มที่ลดต่ำลงอย่างมาก

5.2.3 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการแปลงเชิงภาพฉายด้วยการใช้วิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนด้วยแปลงเชิงภาพฉาย ที่เกิดจากการจำลองด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยหลังจากแปลงเชิงภาพฉายแล้วจะทำการปรับขนาดกลับให้ใกล้เคียงกับขนาดภาพเดิม เนื่องจากว่าในการทดลองนี้จะจำลองการบิดเบือนของรูปภาพด้วยการแปลงเชิงภาพฉายจากจุดประสงค์ของการทำลายข้อมูลลายน้ำ ส่วนการทดลองเพื่อตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่บิดเบือนด้วยการแปลงเชิงภาพฉายที่เกิดจากการถ่ายภาพจะได้นำเสนอในการทดลองที่ 5.2.10

- เพื่อทดสอบผลกระทบจากมุมในการแปลงเชิงภาพฉาย ต่อผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

โดยในการทดลองนี้จะใช้รูปภาพระดับสีเทาขนาดความกว้าง 512 พิกเซล และมีความสูง 512 พิกเซลจำนวน 50 รูป เพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น โดยที่จำนวนจุดศูนย์กลางที่ใช้สร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ 3 จุด โดยใช้ค่าสัญญาณสุ่มแบบเสมือนจำนวน 20 รูปแบบ

ที่แตกต่างกันในการฝังลายนํ้าดิจิตอล ค่ากำลังของลายนํ้าดิจิตอลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 3 โดยในแต่ละตำแหน่งที่ทำการฝังลายนํ้าดิจิตอล จะฝังลายนํ้าดิจิตอลในบริเวณข้างเคียงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5x5 พิกเซล จากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้จากรูปภาพมีค่าเท่ากับ 31.36 จุด และค่าเฉลี่ยของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นเพื่อฝังลายนํ้าดิจิตอลมีจำนวนเท่ากับ 4.9 พื้นที่ สำหรับค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติที่ตรวจจับได้จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 11.4691

ทำการบิดเบือนรูปภาพที่ผ่านการฝังลายนํ้าดิจิตอลด้วยการแปลงเชิงภาพฉาย ด้วยมุมของการฉายเป็น 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 องศา ดังรูปที่ 5.2 แล้วจึงทำการตรวจจับลายนํ้าดิจิตอลจากรูปภาพที่บิดเบือนทั้งหมด โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ผ่านการปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติ สำหรับการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมนั้นจะใช้จุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กันจำนวน 6 จุดในการค้นหา (สามารถมีจุดที่มีลักษณะเด่นอื่นๆ ที่แทรกกระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ถูกฝังลายนํ้าดิจิตอลได้ไม่เกิน 3 จุด) และมีจุดศูนย์กลางในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม 5 จุดซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองการตรวจจับลายนํ้าดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการแปลงเชิงภาพฉาย

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	
จุดที่มีลักษณะเด่น ที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	1.34	1.50	1.48	1.76	1.70	1.84	1.5383
จุดที่มีลักษณะเด่น ที่หายไป	4.27%	4.75%	4.72%	5.61%	5.42%	5.87%	4.91%
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	4.20	4.08	4.06	4.04	4.00	3.98	4.0300
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	3	2	2	3	3	3	2.6667
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	10.664	10.345	10.092	9.618	9.462	9.290	10.0785
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ ตรวจจับลายนํ้าได้ (กำหนดจุด)	99.37%	99.16%	99.12%	98.76%	97.82%	96.73%	98.49%

ตารางที่ 5.3(ต่อ) ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการ
แปลงเชิงภาพฉาย

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มี ลักษณะเด่น)	98.35%	97.94%	97.90%	97.33%	95.59%	94.49%	96.93%
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่ พัฒนาขึ้น)	98.35%	97.94%	97.90%	97.33%	95.59%	94.49%	96.93%

จากการทดลองพบว่าจำนวนความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพโดยการกำหนดจุดมุมของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.66 ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเมื่อคำนึงถึงจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 97.27 ซึ่งมีค่าเท่ากับผลความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลโดยใช้วิธีการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้น เพราะ จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่แทรกอยู่ระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมนั้นมีไม่มากกว่าจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดกันในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมนั่นเอง สาเหตุที่ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลลดลง เนื่องจากมีจุดที่มีลักษณะเด่นบางจุดที่ถูกใช้ในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัล ไม่สามารถถูกคัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนนี้ นอกจากนี้ผลของมุมของการฉายนั้นมีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล กล่าวคือเมื่อมุมของการฉายมีขนาดมากขึ้น ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจะมีแนวโน้มที่ลดลง

สำหรับในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นนั้นพบว่าจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.087

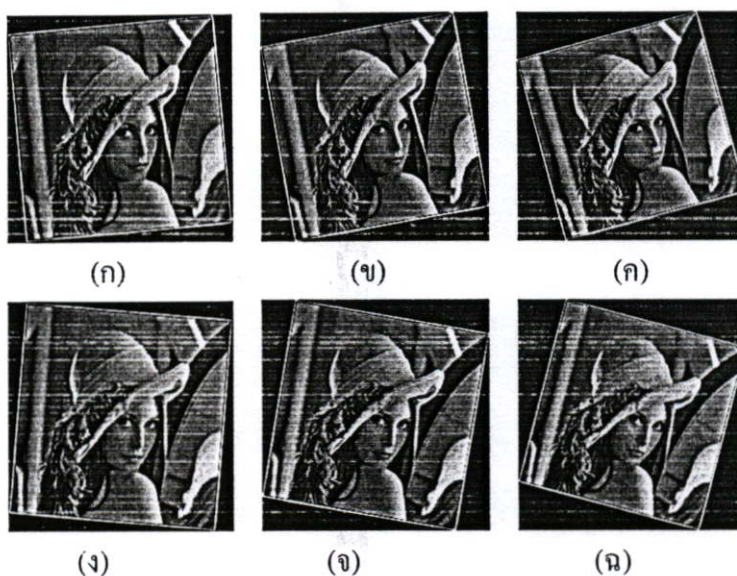
5.2.4 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการหมุนภาพ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนด้วยการหมุนภาพ

- เพื่อทดสอบผลกระทบของมุมของการหมุน ต่อผลของความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

สำหรับการทดลองนี้ใช้รูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5.2.3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติ ที่ตรวจจับได้จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 11.4691 โดยรูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วจะถูกบิดเบือนด้วยการหมุนภาพซึ่งมีมุมของการหมุนเป็น 5,10,15 องศาตามลำดับ โดยทิศทางการหมุนจะเป็นไปทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา ตัวอย่างของรูปภาพที่ถูกบิดเบือนโดยการหมุนแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 หลังจากนั้นทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยขั้นตอนและวิธีการเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5.2.3 โดยผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างรูปภาพที่ถูกบิดเบือนด้วยการหมุนภาพ (ก) มุมของการหมุนเท่ากับ 5 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ง) มุมของการฉายเท่ากับ 5 องศาตามเข็มนาฬิกา (จ) มุมของการฉายเท่ากับ 25 องศาตามเข็มนาฬิกา (ฉ) มุมของการฉายเท่ากับ 30 องศาตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการหมุนภาพ

	มุมของการหมุน						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	แนวทางทวนเข็มนาฬิกา			แนวทางตามเข็มนาฬิกา			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป (ค่าเฉลี่ย)	1.40	1.42	1.41	1.40	1.38	1.42	1.4050

ตารางที่ 5.4(ต่อ) ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการ
หมุนภาพ

	มุมของการหมุน						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	แนวทางทวนเข็มนาฬิกา			แนวทางตามเข็มนาฬิกา			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่ หายไป	4.46%	4.53%	4.50%	4.46%	4.40%	4.53%	4.48 %
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	4.08	4.12	4.00	4.04	4.14	4.22	4.1000
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกลบอม (ค่าสูงสุด)	2	2	3	2	3	2	2.3333
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	11.037	10.652	10.487	10.969	10.593	10.647	10.7309
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	99.66%	99.53%	99.32%	99.57%	99.39%	99.24%	99.43%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มี ลักษณะเด่น)	99.18%	99.22%	98.87%	99.10%	99.08%	98.98%	99.07 %
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่ พัฒนาขึ้น)	99.18%	99.22%	98.87%	99.10%	99.08%	98.98%	99.07 %

จากการทดลองพบว่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพโดยการกำหนด
จุดมุมของพื้นที่สีเหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.52 ความถูกต้องของการ
ตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเมื่อคำนึงถึงจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.07
ซึ่งเท่ากับผลความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล โดยใช้วิธีการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้น สาเหตุ
ที่ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลลดลง เนื่องจากมีจุดที่มีลักษณะเด่นบางจุดที่ใช้

สร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลไม่สามารถถูกคัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนนี้ นอกจากนี้ผลของมุมของการหมุนนั้นมีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล กล่าวคือเมื่อมุมของการหมุนมีขนาดมากขึ้น ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจะมีแนวโน้มที่ลดลง

สำหรับในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นนั้นพบว่ามีความหนาแน่นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.098

5.2.5 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการปรับขนาดภาพ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนด้วยการปรับขนาดภาพ
- เพื่อทดสอบผลกระทบของการปรับขนาดภาพ ต่อผลของความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

สำหรับการทดลองนี้รูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลในการทดลองที่ 5.2.3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติ ที่ตรวจจับได้จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 11.4691 โดยรูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วจะถูกบิดเบือนโดยการปรับขนาดภาพให้ใหญ่ขึ้น และเล็กลงเป็นร้อยละ 10 และ 20 ของขนาดภาพต้นฉบับ จากนั้นทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยขั้นตอนและวิธีการเดียวกับการทดลองที่ 5.2.3 โดยผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการปรับขนาดภาพ

	ขนาดของรูปภาพที่ผ่านการปรับขนาด				รวม (ค่าเฉลี่ย)
	ปรับขนาดลดลง		ปรับขนาดเพิ่มขึ้น		
	10%	20%	10%	20%	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	1.26	1.70	1.16	1.56	29.8950
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	3.19%	5.42%	3.70%	4.97%	4.32%
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่พบ(ค่าเฉลี่ย)	4.18	3.94	4.26	3.94	4.08

ตารางที่ 5.5(ต่อ) ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการปรับขนาดภาพ

	ขนาดของรูปภาพที่ผ่านการปรับขนาด				รวม (ค่าเฉลี่ย)
	ปรับขนาดลดลง		ปรับขนาดเพิ่มขึ้น		
	10%	20%	10%	20%	
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	2	3	2	2	2.25
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	10.3622	9.0849	10.5241	9.9546	9.9815
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	99.06%	98.35%	99.20%	98.80%	98.85%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มีลักษณะ เด่น)	98.04%	97.02%	98.39%	97.51%	97.74%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีการค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	98.04%	97.02%	98.39%	97.51%	97.74%

จากการทดลองพบว่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพโดยการกำหนดจุดมุมของพื้นที่สีเหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.85 ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเมื่อคำนึงถึงจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ และผลความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลโดยใช้วิธีการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.89 ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่ลดลงนี้ มีสาเหตุจากจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนการฝังลายน้ำดิจิทัล และการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลไม่เหมือนกันนั่นเอง นอกจากนี้ผลของการปรับขนาดภาพนั้นมีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล กล่าวคือเมื่อมีการปรับขนาดมากขึ้น ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจะมีแนวโน้มที่ลดลง

สำหรับในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นนั้นพบว่ามีความผิดพลาดที่สี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.079

5.2.6 การค้นหาพื้นที่ที่ฝังลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการตัดแบ่งส่วนภาพ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลกระทบของจำนวนจุดศูนย์กลางต่อความทนทานของการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัล

โดยในการทดลองนี้นอกจากรูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลดังการทดลองที่ 5.2.3 แล้ว รูปภาพต้นฉบับทั้ง 50 ภาพจะถูกฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการเดียวกันกับการทดลองที่ 5.2.3 แต่ใช้จุดศูนย์กลางเพียง 1 จุด รูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลจะถูกบิดเบือนด้วยการตัดแบ่งส่วนภาพให้เหลือร้อยละ 80 และ 90 จากขนาดภาพต้นฉบับ โดยที่ตัวอย่างรูปภาพหลังจากการตัดแบ่งส่วนภาพแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

ทำการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ในการฝังลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลทั้งสองชุดด้วยวิธีการค้นหาที่พัฒนาขึ้น โดยที่จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดกันที่ใช้ในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 6 จุด ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.6



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างรูปภาพที่ถูกบิดเบือน โดยการตัดแบ่งส่วนภาพ (ก) เหลือพื้นที่ร้อยละ 80 ของขนาดภาพต้นฉบับ (ข) เหลือพื้นที่ร้อยละ 90 ของขนาดภาพต้นฉบับ

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองการค้นหาพื้นที่ที่ฝึกลายน้ำดิจिटอลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดย การตัดแบ่งส่วนภาพ

จำนวนจุด ศูนย์กลาง	พื้นที่ที่ใช้ ฝึกลายน้ำ (ค่าเฉลี่ย)	พื้นที่ของรูปภาพที่เหลือหลังการตัดแบ่งส่วนภาพ			
		90 %		80%	
		จำนวนพื้นที่ที่ พบ (ค่าเฉลี่ย)	จำนวนรูปที่ ไม่พบพื้นที่	จำนวนพื้นที่ที่ พบ (ค่าเฉลี่ย)	จำนวนรูปที่ ไม่พบพื้นที่
1	1.46	1.34	28 %	1.10	38 %
3	4.90	4.52	2 %	3.96	2 %

จากตารางที่ 5.6 จะพบว่ารูปภาพที่ฝึกลายน้ำดิจिटอลด้วยจำนวนจุดศูนย์กลางเท่ากับ 3 จุด จะมีความทนทานต่อการตัดแบ่งส่วนภาพที่ดีกว่าการฝึกลายน้ำดิจिटอลด้วยจุดศูนย์กลางเพียง 1 จุด ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่า จำนวนรูปภาพที่ไม่สามารถค้นหาพื้นที่ที่สัมพันธ์ที่ฝึกลายน้ำดิจिटอล ได้จากรูปภาพที่ฝึกลายน้ำดิจिटอลด้วยจำนวนจุดศูนย์กลาง 3 จุดมีเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น ในขณะที่ รูปภาพที่ฝึกลายน้ำดิจिटอลด้วยจุดศูนย์กลางเพียงจุดเดียวนั้น มีจำนวนรูปภาพที่ไม่สามารถค้นหา พื้นที่ที่สัมพันธ์ที่ฝึกลายน้ำดิจिटอลได้ถึงร้อยละ 28 สำหรับการตัดแบ่งส่วนภาพเหลือร้อยละ 90 ของ พื้นที่ภาพค้นฉบับ และร้อยละ 38 สำหรับการตัดแบ่งส่วนภาพเหลือร้อยละ 80 ของพื้นที่ภาพ ค้นฉบับ

5.2.7 การตรวจจับฝึกลายน้ำดิจिटอลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการเพิ่มสัญญาณรบกวน

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจिटอล จากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวน
- เพื่อทดสอบผลกระทบของค่าระดับสัญญาณรบกวน ต่อผลของความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจिटอล

สำหรับการทดลองนี้จะใช้รูปภาพที่ฝึกลายน้ำดิจिटอลเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5.2.3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติ ที่ตรวจจับได้จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 11.4691 โดยรูปภาพที่ผ่านการฝึกลายน้ำดิจिटอลแล้วจะถูกบิดเบือน โดยการเพิ่มสัญญาณรบกวนด้วยฟังก์ชันการสร้างสัญญาณรบกวนของเกาส์เซียน โดยมีระดับของสัญญาณรบกวนเป็นร้อยละ 1,3 และ 5 ตามลำดับ (อัตราส่วนระหว่างค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนต่อค่าเฉลี่ยของความสว่างของรูปภาพ) หลังจากนั้นทำการตรวจจับลายน้ำ

ดิจิทัลด้วยขั้นตอนและวิธีการเดียวกับการทดลองที่ 5.2.3 โดยผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการเพิ่มสัญญาณรบกวน

	ขนาดของสัญญาณรบกวน			รวม (ค่าเฉลี่ย)
	1%	3%	5%	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	1.34	1.86	2.00	1.7333
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	4.27%	5.93%	6.38%	5.53%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ(ค่าเฉลี่ย)	4.44	4.26	4.22	4.3067
จุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม(ค่าสูงสุด)	2	3	3	2.6667
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(ค่าเฉลี่ย)	11.1197	10.8924	10.9770	10.9964
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(กำหนดจุด)	99.43%	99.41%	99.38%	99.41%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(ค้นหาจุดที่มีลักษณะเด่น)	99.02%	98.80%	98.77%	98.87%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	99.02%	98.80%	98.77%	98.87%

จากการทดลองพบว่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล จากรูปภาพโดยการกำหนดจุดมุมของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝงลายน้ำดิจิตอลมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.41 ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลเมื่อคำนึงถึงจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ และผลความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลโดยใช้วิธีการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.87 สาเหตุที่ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลที่ลดลงนี้ เกิดจากจุดที่มีลักษณะเด่นบางจุดที่คัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนการฝงลายน้ำดิจิตอลนั้น ไม่สามารถถูกคัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล นอกสภนี้ผลของการเพิ่มสัญญาณรบกวนนั้นมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล

สำหรับในการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลที่พัฒนาขึ้นนั้นพบว่ามิจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝงลายน้ำดิจิตอล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.06

5.2.8 การตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล จากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนด้วยการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ
- เพื่อทดสอบผลกระทบของการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ ต่อผลของความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล

สำหรับการทดลองนี้จะใช้รูปภาพที่ฝงลายน้ำดิจิตอลเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5.2.3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติ ที่ตรวจจับได้จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 11.4691 โดยรูปภาพที่ผ่านการฝงลายน้ำดิจิตอลแล้วจะถูกบิดเบือนโดยการบีบอัดข้อมูลรูปภาพด้วยฟังก์ชันการบีบอัดข้อมูลแบบ JPEG โดยคุณภาพของรูปภาพหลังการบีบอัดเท่ากับร้อยละ 90, 80, 70 และ 60 ตามลำดับ ทำการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลด้วยขั้นตอนและวิธีการเดียวกับการทดลองที่ 5.2.3 โดยผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ

	คุณภาพของรูปภาพหลังผ่านการบีบอัด				รวม (ค่าเฉลี่ย)
	90%	80%	70%	60%	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป (ค่าเฉลี่ย)	1.01	0.66	0.72	0.70	0.7725
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	3.22%	2.10%	2.23%	2.23%	2.445%

ตารางที่ 5.8(ต่อ) ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ

	คุณภาพของรูปภาพหลังผ่านการบีบอัด				รวม (ค่าเฉลี่ย)
	90%	80%	70%	60%	
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	4.52	4.56	4.50	4.54	4.53
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	1	2	1	2	1.50
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	11.7561	11.8480	12.0576	12.4614	12.0308
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับ ลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	99.55%	99.49%	99.47%	99.43%	99.49%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับ ลายน้ำได้ (ค้นหาจุดที่มีลักษณะเด่น)	98.94%	98.88%	98.86%	98.82%	99.86%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับ ลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	98.94%	98.88%	98.86%	98.82%	99.86%

จากการทดลองพบว่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล จากรูปภาพโดยการกำหนดจุดมุมของพื้นที่สีเหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิตอลมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.49 ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลเมื่อคำนึงถึงจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ และผลความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลโดยใช้วิธีการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.86 สาเหตุที่ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลที่ลดลงนี้ เกิดจากจุดที่มีลักษณะเด่นบางจุดที่คัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนการฝังลายน้ำดิจิตอลนั้น ไม่สามารถถูกคัดแยกออกมาได้ในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำดิจิตอล นอกจากนี้ผลของการบีบอัดข้อมูลรูปภาพนั้นมีผลต่อการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นได้ทำการกรองภาพแบบโลว์พาสก่อนจึงทำให้การบีบอัดข้อมูลภาพไม่ส่งผลกระทบต่อผลการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลนี้

สำหรับในการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลที่พัฒนาขึ้นนั้นพบว่าปริมาณพื้นที่สีเหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝังลายน้ำดิจิตอล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.07

5.2.9 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

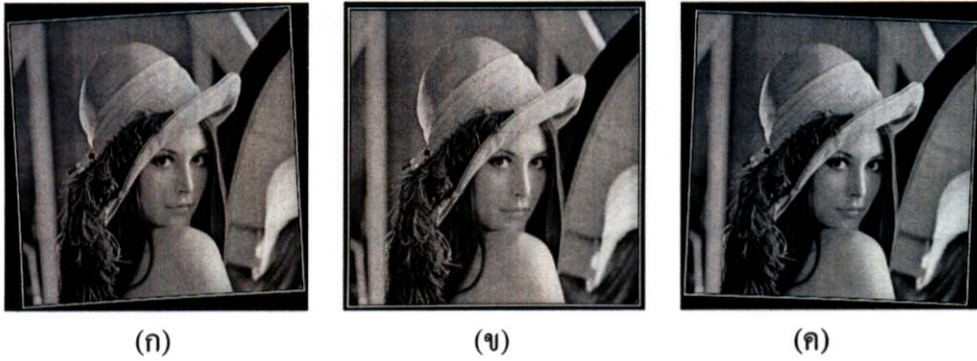
- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพ
- เพื่อทดสอบผลกระทบของมุมของการหมุนภาพในการกราดภาพ ต่อผลของความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

ถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

โดยในการทดลองนี้จะใช้รูปภาพระดับสีเทาขนาดความกว้าง 2143 พิกเซล และมีความสูง 2143 พิกเซลจำนวน 6 รูป ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นรูปภาพที่มีระดับความแตกต่างของความสว่าง และรายละเอียดภายในรูปภาพแตกต่างกันไป ได้ถูกใช้เพื่อการทดลองเพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นโดยที่จำนวนจุดศูนย์กลางที่ใช้สร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ 3 จุด โดยใช้ค่าสัญญาณสุ่มแบบเสมือนจำนวน 1 รูปแบบ ค่ากำลังของลายน้ำดิจิทัลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 6 โดยในแต่ละตำแหน่งที่ทำการฝังลายน้ำดิจิทัลจะฝังลายน้ำดิจิทัลในบริเวณข้างเคียงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 9x9 พิกเซล จากนั้นนำรูปภาพที่ได้ฝังลายน้ำดิจิทัลทั้ง 6 ภาพไปทำการพิมพ์ในแม่พิมพ์ขนาด 8x10 นิ้ว จากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้จากรูปภาพมีค่าเท่ากับ 27.6667 จุด และค่าเฉลี่ยของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลมีจำนวนเท่ากับ 8 พื้นที่ สำหรับค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติที่ตรวจจับได้จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 9.6280

รูปภาพที่ผ่านการพิมพ์ภาพมานั้น จะถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยเครื่องกราดภาพด้วยความละเอียด 300 จุดต่อนิ้ว และ 100 จุดต่อนิ้ว ในรูปแบบการกราดภาพแบบภาพสี (True color) มุมของการกราดภาพเท่ากับ 0 องศา และ 5 องศาด้วยแนวทางของการกราดภาพเป็นไปตามแนวทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพแสดงได้ดังรูปที่ 5.6

ทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพนี้ ด้วยวิธีการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลในการทดลอง 5.2.3 ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.9 และ 5.10



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพ (ก) มุมของการหมุนเท่ากับ 5 องศาทวนเข็มนาฬิกา (ข) มุมของการหมุนเท่ากับ 0 องศา (ค) มุมของการหมุนเท่ากับ 5 องศาตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพด้วยความละเอียด 300 จุดต่อนิ้ว

	มุมของการหมุน			รวม (ค่าเฉลี่ย)
	5° ทวนเข็มนาฬิกา	0°	5° ตามเข็มนาฬิกา	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป (ค่าเฉลี่ย)	1.3333	1.1800	1.6111	1.3748
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	4.82%	4.27%	5.82%	4.97%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	7.3333	7.6667	7.5000	7.6111
จุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	2	1	2	1.6667
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	8.9657	9.2496	8.5041	8.9065
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	95.83%	97.92%	94.44%	96.06%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่น)	93.05%	96.53%	92.36%	93.98%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	93.05%	96.53%	92.36%	93.98%

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพด้วยความละเอียด 100 จุดต่อนิ้ว

	มุมของการหมุน			รวม (ค่าเฉลี่ย)
	5° ทวนเข็มนาฬิกา	0°	5° ตามเข็มนาฬิกา	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป (ค่าเฉลี่ย)	2.6111	2.6667	3.1667	2.8148
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	9.44%	9.64%	11.45%	10.18%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	7.3333	7.5000	7.1667	7.3333
จุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	2	2	3	2.3333
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	5.5931	6.0707	5.8364	5.8334
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	81.25%	84.03%	82.64%	82.64%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่น)	77.08%	81.25%	77.78%	78.70%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	77.08%	81.25%	77.78%	78.70%

จากตารางที่ 5.9 และตารางที่ 5.10 จะพบว่าผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพด้วยความละเอียด 300 จุดต่อนิ้วนั้นจะมีความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลมากกว่าการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการกราดภาพด้วยความละเอียด 100 จุดต่อนิ้วมาก นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่า การคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลมีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเช่นเดียวกับการทดลองต่างๆ ก่อนหน้านี้

สำหรับในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นนั้นพบว่ามิจำนวนพื้นที่สีเหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.012 ในกรณีการกราดภาพด้วยความละเอียด 300 จุดต่อนิ้ว และร้อยละ 0.019 ในกรณีการกราดภาพด้วยความละเอียด 100 จุดต่อนิ้ว

5.2.10 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ
- เพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่ง และสภาพแวดล้อมในการถ่ายภาพต่อความถูกต้อง

ในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

สำหรับการทดลองนี้รูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัล และผ่านการพิมพ์ภาพ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติที่ตรวจจับได้จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 9.6280 จะถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยการถ่ายภาพ ด้วยมุมของการถ่ายเป็นการแหงนขึ้นร่วมกับถ่ายบิดไปทางด้านซ้ายและขวา โดยที่มุมของการแหงนขึ้น และการบิดไปทางด้านข้างจะเท่ากันคือ 5, 10 และ 15 องศา

การถ่ายภาพจะกำหนดค่าปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- ถ่ายภาพด้วยความละเอียด 5 ล้านพิกเซล และ 3 ล้านพิกเซล
- ถ่ายภาพที่ตำแหน่งระยะความห่างจากรูปภาพเป็น 1 เมตร ด้วยความยาวโฟกัส 108 มม. และถ่ายภาพที่ตำแหน่งระยะห่างจากรูปภาพเป็น 1.5 เมตร ด้วยความยาวโฟกัส 180 มม. (ด้วยความยาวโฟกัสที่กำหนดจะทำให้ถ่ายภาพได้เต็มจอแสดงภาพ) โดยถ่ายภาพให้จุดโฟกัสของกล้องอยู่บริเวณกึ่งกลางของภาพ
- ถ่ายภาพที่สภาพแวดล้อมสองรูปแบบคือ ภายใต้แสงสว่างจากหลอดไฟแบบเรืองแสง (Fluorescent) โดยกำหนดค่าไวท์บาลานซ์ (White balance) เป็น Halogen และให้ความไวชัตเตอร์เป็น 1/30 สภาพแวดล้อมที่สองคือถ่ายภาพภายใต้แสงสว่างธรรมชาติ โดยกำหนดค่าไวท์บาลานซ์เป็น Daylight และให้ความไวชัตเตอร์เป็น 1/100

ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.10 จากนั้นทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพทั้งหมด ด้วยวิธีการค้นหาในการทดลองที่ 5.2.3 ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.11 ถึง 5.18



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.7 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.8 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1.5 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.9 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.10 ตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ ที่ระยะห่างจากรูปภาพเท่ากับ 1 เมตร (ก) มุมของการฉายเท่ากับ 5 (ข) มุมของการฉายเท่ากับ 10 องศา (ค) มุมของการฉายเท่ากับ 15 องศา

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดกึ่งไปทางด้านขวา			บิดกึ่งไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	2.17	2.34	2.28	1.61	1.84	2.34	2.10
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	7.84%	8.46%	8.24%	5.82%	6.65%	8.46%	7.58%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ(ค่าเฉลี่ย)	7.50	7.33	7.17	7.50	7.33	7.17	7.3333
จุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม(ค่าสูงสุด)	4	3	4	4	4	4	3.8333
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(ค่าเฉลี่ย)	7.8798	7.8316	7.5975	8.4824	8.4501	8.0133	8.0425
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(กำหนดจุด)	96.53%	94.75%	92.36%	96.53%	93.75%	91.33%	94.21%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(พิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่น)	93.06%	89.58%	86.81%	93.06%	88.89%	86.11%	89.59%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	92.36%	89.58%	86.11%	92.36%	88.19%	84.72%	88.89%

ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดก้องไปทางด้านขวา			บิดก้องไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	1.06	1.73	2.00	1.56	1.67	2.00	1.67
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	3.83%	6.25%	7.23%	5.64%	6.04%	7.23%	6.04%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ(ค่าเฉลี่ย)	7.33	7.33	7.17	7.33	7.17	7.17	7.2500
จุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม(ค่าสูงสุด)	4	3	3	4	4	4	3.6667
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(ค่าเฉลี่ย)	8.3507	7.9247	7.5941	8.9715	8.7459	8.2380	8.30415
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(กำหนดจุด)	97.22%	95.14%	95.83%	96.14%	92.36%	90.28%	94.50%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(พิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่น)	95.14%	91.67%	90.28%	93.75%	87.50%	85.42%	90.63%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	94.44%	91.67%	90.28%	93.06%	86.81%	84.72%	90.16%

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมหลอดไฟเรืองแสง

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดกล้องไปทางด้านขวา			บิดกล้องไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	2.45	2.50	3.23	1.95	2.23	3.39	2.625
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	8.86%	9.04%	11.67%	7.05%	8.06%	12.25%	9.49%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	7.33	7.17	7.00	7.33	7.17	7.00	7.1667
จุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	4	3	4	3	4	4	3.6667
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	5.6431	6.0552	4.8411	6.7684	6.9712	5.8609	6.0233
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	91.11%	89.92%	86.81%	90.97%	88.19%	86.81%	88.97%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่น)	86.11%	84.03%	80.56%	86.81%	82.64%	79.86%	83.34%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	85.42%	84.03%	79.86%	86.81%	81.94%	79.17%	82.87%

ตารางที่ 5.14 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความ
ละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมหลอดไฟเรียงแสง

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดก้องไปทางด้านขวา			บิดก้องไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่ หายไป(ค่าเฉลี่ย)	2.17	1.83	2.06	2.45	2.06	2.45	2.17
จุดที่มีลักษณะเด่นที่ หายไป	7.84%	6.61%	7.45%	8.86%	7.45%	8.86%	7.85%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	7.33	7.17	7.00	7.17	7.10	7.00	7.1667
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	3	3	4	3	3	4	3.3333
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	6.7074	6.5577	5.7478	6.9014	6.5963	6.4756	6.4977
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	92.44%	91.17%	88.11%	91.67%	90.97%	89.11%	90.58%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มี ลักษณะเด่น)	88.19%	86.81%	83.33%	87.50%	86.11%	83.33%	85.88%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่ พัฒนาขึ้น)	88.19%	86.81%	82.64%	87.50%	86.11%	82.64%	85.65%

ตารางที่ 5.15 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดก้องไปทางด้านขวา			บิดก้องไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	2.17	2.03	2.23	1.92	2.70	2.20	2.21
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	7.84%	7.34%	8.06%	6.94%	7.95%	9.76%	7.98%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	7.50	7.50	7.33	7.50	7.50	7.17	7.4200
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกล้อม (ค่าสูงสุด)	4	3	3	4	4	4	3.6667
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	7.6102	7.4288	7.3548	7.2361	6.9213	6.9749	7.2544
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	96.53%	97.22%	95.14%	98.61%	97.22%	95.14%	96.64%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มี ลักษณะเด่น)	92.36%	93.75%	93.06%	95.14%	92.36%	90.97%	92.94%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่ พัฒนาขึ้น)	90.97%	93.75%	93.06%	93.06%	90.28%	89.58%	91.78%

ตารางที่ 5.16 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดก้องไปทางด้านขวา			บิดก้องไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	1.75	1.59	2.48	1.59	1.95	2.14	1.92
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	5.75%	6.33%	8.96%	5.75%	6.87%	7.73%	6.83%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ(ค่าเฉลี่ย)	7.83	7.67	7.17	7.83	7.67	7.50	7.6117
จุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม(ค่าสูงสุด)	3	3	4	3	4	4	3.500
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(ค่าเฉลี่ย)	7.7580	7.1392	7.0005	7.0348	7.0595	6.7276	7.1199
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(กำหนดจุด)	98.61%	97.22%	95.83%	97.22%	95.14%	94.44%	96.41%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(พิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่น)	95.83%	95.14%	93.06%	95.14%	91.67%	90.28%	93.52%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้(วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	95.83%	95.14%	92.36%	95.14%	90.97%	88.89%	93.06%

ตารางที่ 5.17 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดกล้องไปทางด้านขวา			บิดกล้องไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	2.78	2.34	2.84	2.47	2.95	2.34	2.62
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป	10.27%	10.04%	8.46%	10.66%	8.93%	8.46%	9.47%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	7.50	7.33	7.17	7.33	7.17	7.17	7.2783
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกลบอม (ค่าสูงสุด)	4	3	4	4	4	3	3.6667
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	5.1877	5.0777	5.1724	6.0037	6.0522	5.9663	5.5767
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	90.97%	88.89%	88.19%	92.06%	90.53%	89.44%	90.01%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มี ลักษณะเด่น)	84.72%	84.03%	82.64%	86.11%	83.33%	84.03%	84.14%
พื้นที่สีเหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่ พัฒนาขึ้น)	83.33%	84.03%	81.25%	84.72%	81.94%	84.03%	82.23%

ตารางที่ 5.18 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยความ
ละเอียด 3 ล้านพิกเซล ที่ระยะห่าง 1.5 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	บิดกล้องไปทางด้านขวา			บิดกล้องไปทางด้านซ้าย			
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	
จุดที่มีลักษณะเด่นที่ หายไป(ค่าเฉลี่ย)	2.61	2.50	2.84	2.89	2.34	2.28	2.58
จุดที่มีลักษณะเด่นที่ หายไป	9.04%	9.43%	10.27%	8.24%	8.46%	10.45%	9.315%
พื้นที่ที่เสียหายที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	7.33	7.17	7.17	7.33	7.17	7.17	7.2233
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	4	3	4	4	3	3	3.500
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	5.1862	5.2643	5.1422	6.0834	6.2925	5.5403	5.5848
พื้นที่ที่เสียหายที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	91.67%	88.19%	90.97%	92.36%	90.44%	89.58%	90.54%
พื้นที่ที่เสียหายที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มี ลักษณะเด่น)	86.11%	83.33%	84.72%	86.11%	86.11%	84.72%	85.18%
พื้นที่ที่เสียหายที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่ พัฒนาขึ้น)	85.42%	83.33%	83.33%	84.03%	86.11%	84.72%	84.49%

จากผลการทดลองดังตารางที่ 5.11 ถึง 5.18 จะพบว่า การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่
ผ่านการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลด้วยความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ภายใต้สภาพแวดล้อมแสง

ธรรมชาติ ที่ระยะห่างจากรูปภาพ 1.5 เมตรจะมีความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลสูงที่สุดคือร้อยละ 93.06 โดยสรุปผลกระทบจากสภาพแวดล้อม

โดยที่ปัจจัยต่างๆ ในการถ่ายภาพต่อความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่ได้จากการทดลองเป็นดังนี้

- การคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล มีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลเช่นเดียวกับการทดลองต่างๆ ก่อนหน้า นอกจากนี้จุดที่มีลักษณะเด่นปลอมหรือจุดที่มีลักษณะเด่นอื่นๆ ที่ไม่ได้ถูกคัดแยกในขั้นตอนการฝังลายน้ำดิจิทัล แต่ถูกคัดแยกและแทรกระหว่างพื้นที่ที่สับสนที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัลในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล ยังมีผลต่อค่าความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล นั่นคือมีบางรูปที่มีจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นปลอมนี้มากเกินไปทำให้ไม่สามารถค้นหาพื้นที่ที่สับสนที่ฝังลายน้ำดิจิทัลได้

- ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ ด้วยความละเอียดในการถ่ายภาพ 5 ล้านพิกเซล จะมีค่ามากกว่าค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ ด้วยความละเอียดในการถ่ายภาพ 3 ล้านพิกเซล

- ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ จะมีค่ามากกว่าค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพภายใต้สภาพแวดล้อมแสงจากหลอดไฟเรืองแสง

- ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ ในระยะห่าง 1.5 เมตร จะมีค่ามากกว่าค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพในระยะ 1 เมตร

5.2.11 การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการแปลงเชิงภาพฉาย สำหรับรูปภาพอื่นๆ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อทดสอบผลการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนด้วยแปลงเชิงภาพฉาย โดยเป็นการทดลองกับรูปภาพที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาจำนวนตำแหน่งจุดศูนย์กลาง และจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดๆ กันเพื่อใช้ในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล
- เพื่อวิเคราะห์ว่าจำนวนตำแหน่งจุดศูนย์กลาง และจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดๆ กัน เพื่อใช้ในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่ใช้ในทุกๆ การทดลองนั้นสามารถใช้กับรูปภาพอื่นๆ ได้หรือไม่

โดยในการทดลองนี้จะใช้รูปภาพระดับสีเทาขนาดความกว้าง 512 พิกเซล และมีความสูง 512 พิกเซลจำนวน 10 รูป เพื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น โดยที่จำนวนจุด

ศูนย์กลางที่ใช้สร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ 3 จุด โดยใช้ค่าสัญญาสุ่มแบบเสมือนจำนวน 20 รูปแบบที่แตกต่างกันในการฝังลายน้ำดิจิทัล ค่ากำลังของลายน้ำดิจิทัลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 3 โดยในแต่ละตำแหน่งที่ทำการฝังลายน้ำดิจิทัล จะฝังลายน้ำดิจิทัลในบริเวณข้างเคียงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5x5 พิกเซล

จากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้จากรูปภาพมีค่าเท่ากับ 30.2จุด และค่าเฉลี่ยของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลมีจำนวนเท่ากับ 5.4 พื้นที่สำหรับค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติที่ตรวจจับได้ จากรูปภาพที่ยังไม่ได้บิดเบือนมีค่าเท่ากับ 10.5781

ทำการบิดเบือนรูปภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยการแปลงเชิงภาพฉาย ด้วยมุมของการฉายเท่ากับ 5, 10,15,20,25 และ 30 องศา จากนั้นทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล ด้วยวิธีการค้นหาในการทดลองที่ 5.2.3 ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือน โดยการแปลงเชิงภาพฉาย สำหรับรูปภาพอื่นๆ

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	
จุดที่มีลักษณะเด่น ที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	0.86	0.91	1.00	1.03	1.14	1.13	6.07
จุดที่มีลักษณะเด่น ที่หายไป	2.85%	3.01%	3.31%	3.41%	3.77%	3.74%	3.35%
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่พบ (ค่าเฉลี่ย)	5.06	5.05	5.01	5.02	4.97	4.98	5.02
จุดที่มีลักษณะเด่น แปลกปลอม (ค่าสูงสุด)	3	2	2	3	2	3	2.50
ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (ค่าเฉลี่ย)	10.361	10.015	9.892	9.613	9.443	9.150	9.7457
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ ตรวจจับลายน้ำได้ (กำหนดจุด)	97.96%	96.76%	95.56%	94.81%	94.35%	93.33%	95.46%

ตารางที่ 5.19(ต่อ) ผลการทดลองการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการบิดเบือนโดยการแปลงเชิงภาพฉาย สำหรับรูปภาพอื่นๆ

	มุมของการฉาย						รวม (ค่าเฉลี่ย)
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (พิจารณาจุดที่มีลักษณะเด่น)	95.19%	93.80%	92.87%	91.85%	91.30%	90.74%	92.62%
จุดที่มีลักษณะเด่นที่หายไป(ค่าเฉลี่ย)	29.29	29.20	29.34	29.17	29.06	29.07	29.18
พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ตรวจจับลายน้ำได้ (วิธีค้นหาที่พัฒนาขึ้น)	95.19%	93.80%	92.87%	91.85%	91.30%	90.74%	92.62%

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.19 จะพบว่าสามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ โดยที่สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลประกอบไปด้วย ความผิดพลาดของค่าความสว่าง และความผิดพลาดในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น โดยที่ไม่เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากจุดที่มีลักษณะเด่นแปลกปลอม นั่นคือค่าปัจจัยในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลคือจำนวนจุดศูนย์กลาง และจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดๆ กันเพื่อใช้ในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ติดๆ กันเพื่อใช้ในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่เลือกใช้นั้นสามารถนำไปใช้งานกับภาพอื่นๆ นอกเหนือจากกลุ่มรูปภาพที่ใช้ในการทดลองที่ 5.2.2 ได้

สำหรับในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นนั้นพบว่าไม่มีจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบปกติสูงกว่าค่าขีดแบ่งเท่ากับร้อยละ 0.057

5.2.12 การวิเคราะห์ความซับซ้อนในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัล

การทดลองนี้มีขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

- เปรียบเทียบความซับซ้อนในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลในกรณีแย่มากที่สุด (Worst case) นั่นคือสรุปได้ว่าไม่พบลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพเลย

สำหรับการวิเคราะห์ความซับซ้อน เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาพื้นที่ที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลที่ได้พัฒนาขึ้น ,การค้นหาแบบทั้งหมดนั้น และการค้นหาด้วยการใช้ตำแหน่งจุด

ศูนย์กลาง จะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องทำการตรวจจับปลายน้ำดิจิตอล เพื่อจะสรุปว่าในรูปภาพนั้นไม่มีการฝังปลายน้ำดิจิตอลอยู่ ซึ่งเป็นกรณีที่แย่ที่สุด นั่นคือ จำเป็นต้องใช้การค้นหาที่มากเพื่อจะตรวจจับปลายน้ำดิจิตอลจากทุกโอกาสที่เป็นไปได้ ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.2.9.1 ความซับซ้อนในการค้นหาแบบทั้งหมด

ในการค้นหาแบบทั้งหมดนั้นเป็นการค้นหาจากทุกๆ พื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นไปได้ที่สามารถสร้างขึ้นจากจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้ ซึ่งโอกาสที่จะพบปลายน้ำดิจิตอลของแต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมนั้นจะเท่าๆ กัน ดังนั้นสำหรับการตรวจจับปลายน้ำดิจิตอลเพื่อจะสรุปได้ว่ารูปภาพนี้ไม่มีปลายน้ำดิจิตอลฝังอยู่จำเป็นจะต้องทำการตรวจจับปลายน้ำดิจิตอลจากพื้นที่ทุกๆ พื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นไปได้

ถ้ากำหนดให้จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้เท่ากับ N_f จุด ดังนั้นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับการตรวจจับปลายน้ำดิจิตอลด้วยวิธีการค้นหาแบบทั้งหมด ถ้าหากว่าทุกๆ พื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นนั้นเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นรูปทรงแบบคอนเวกซ์ฮัลล์ นั้นจะ

เท่ากับ $\frac{N_f!}{(N_f - 4)!4!}$ สี่เหลี่ยม

5.2.9.2 ความซับซ้อนในการค้นหาด้วยการใช้ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง

สำหรับการค้นหาในวิธีนั้นจะเป็นการใช้จุดศูนย์กลางเป็นจุดหลัก ร่วมกับจุดที่มีลักษณะเด่นอื่น ๆ ทั้งหมดอีก 3 จุดเพื่อสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นไปได้ที่มีจุดศูนย์กลางเป็นจุดร่วมซึ่งถ้ากำหนดให้จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้เท่ากับ N_f จุด และจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ใช้เป็นจุดศูนย์กลางในค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ N_c จุด

ดังนั้นจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องทำการตรวจจับปลายน้ำดิจิตอลสำหรับวิธีการค้นหา

เท่ากับ $\left(N_c \times \frac{(N_f - N_c)!}{(N_f - N_c - 3)!3!} \right) + \left(\frac{N_c}{(N_c - 2)!2!} \times \frac{(N_f - N_c)!}{(N_f - N_c - 2)!2!} \right) + \left(\frac{N_c}{(N_c - 3)!3!} \times (N_f - N_c) \right) + \left(\frac{N_c}{(N_c - 4)!4!} \right)$ สี่เหลี่ยม

5.2.9.3 ความซับซ้อนในการค้นหาด้วยวิธีการที่พัฒนาขึ้น

ในการค้นหาด้วยวิธีการที่ได้พัฒนานั้นนั้น ปัจจัยที่จะบ่งบอกถึงจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องทำการค้นหาออกจากจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาจากรูปภาพได้แล้ว ยังต้อง

คำนึงถึงจำนวนจุดศูนย์กลางที่ใช้ในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม รวมทั้งจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กันที่ใช้ในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมด้วย

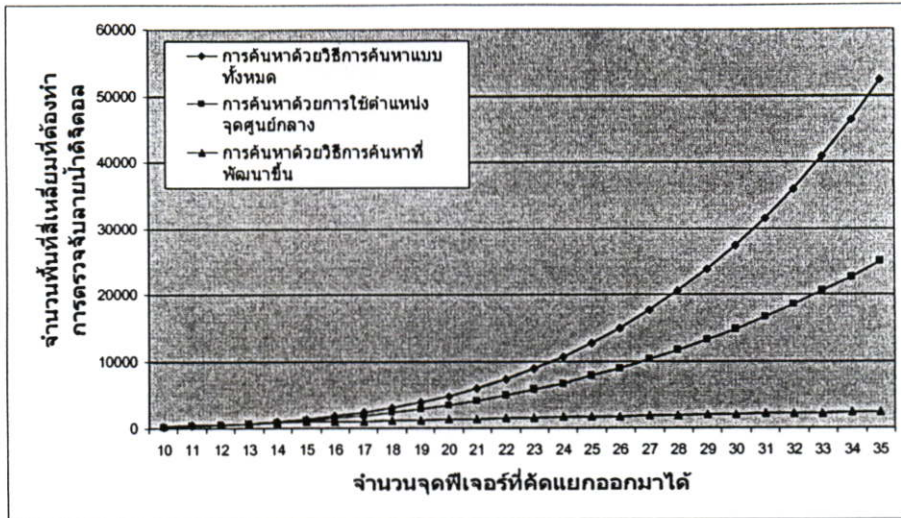
ดังนั้นถ้ากำหนดให้จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้เท่ากับ N_f จุด จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่ใช้เป็นจุดศูนย์กลางในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ N_c จุด และกำหนดให้จำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กันสำหรับการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ N_w จุด

สำหรับแต่ละจุดศูนย์กลางนั้น จะสามารถสรุปว่าไม่พบปลายน้ำดิจิตอลได้ก็ต่อเมื่อจุดที่มีลักษณะเด่นทุกจุดได้เป็นจุดเริ่มต้นในชุดการค้นหาของจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กัน ดังนั้นในแต่ละจุดศูนย์กลางจะต้องค้นหาโดยมาจุดเริ่มต้นในการค้นหา $N_f - 1$ จุด ในแต่ละชุดการค้นหา นั้นถ้าหาก ว่าทุกๆ พื้นที่สี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นนั้นเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นรูปทรงแบบคอนเวกซ์ฮัลแล้วจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องการค้นหาต่อหนึ่งจุดเริ่มต้นในการค้นหาจะเท่ากับ

$$\frac{(N_w - 1)!}{(N_w - 3)! \cdot 2!} \text{ พื้นที่สี่เหลี่ยม}$$

จำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องการตรวจนับปลายน้ำดิจิตอลสำหรับวิธีการค้นหาที่พัฒนาเท่ากับ $\left(N_c \times (N_f - 1) \times \frac{(N_w - 1)!}{(N_w - 3)! \cdot 2!} \right) - \left(\frac{N_c!}{(N_c - 2)! \cdot 2!} \times \frac{(N_w - 2)!}{(N_w - 4)! \cdot 2!} \right)$ สี่เหลี่ยม

จากการวิเคราะห์พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องการค้นหา เพื่อสรุปว่าไม่พบปลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพด้วยวิธีการค้นหาทั้งสามรูปแบบดังที่กล่าวไปแล้วนั้นสามารถนำมาเขียนกราฟเพื่อแสดงการเปรียบเทียบความซับซ้อนของทั้งสองวิธีได้ดังรูปที่ 5.11 โดยกำหนดให้ จำนวนจุดศูนย์กลางที่ใช้ในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการฝังปลายน้ำดิจิตอลเท่ากับ 3 จุด และจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กันที่ใช้ในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ 5 จุด (ข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการทดลองที่ 5.2.1)



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนพื้นที่ที่ต้องตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการแบบทั้งหมด, วิธีการค้นหาด้วยการใช้ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง และวิธีการค้นหาที่พัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 5.11 จะพบว่าวิธีการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นจะสามารถช่วยลดความซับซ้อนในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ ซึ่งสังเกตได้จากเมื่อจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่คัดแยกออกมาได้มีค่ามากขึ้นนั้น อัตราการเพิ่มของจำนวนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล สำหรับวิธีการค้นหาที่พัฒนาขึ้นนั้นมีน้อยกว่าวิธีการค้นหาแบบทั้งหมด และวิธีการค้นหาด้วยการใช้ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการแปลงภาพฉาย และการบิดเบือนเชิงเรขาคณิตอื่นๆ โดยที่พื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลนั้นสร้างขึ้นจากจุดที่มีลักษณะเด่นในรูปภาพ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอถึงวิธีการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น, การคัดเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นที่เหมาะสมแก่การเป็นจุดศูนย์กลางในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม, วิธีการคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสมต่อการฝังลายน้ำดิจิทัล รวมทั้งการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลในขั้นตอนของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากวิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัล และการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่พัฒนาขึ้น ในแง่ของความทนทานต่อการบิดเบือนรูปภาพในแบบต่างๆ กัน ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) จากการทดลองที่ 5.2.2 และ 5.2.3 จะพบว่าวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยการใช้จุดที่มีลักษณะเด่นเพื่อทำการสร้างพื้นที่สามเหลี่ยมด้วยวิธีการเทสเซลเลชันของเดอรัลออนซ์แล้วทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงไปในแต่ละพื้นที่สามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการประมาณการแปลงเชิงสัมพรรคระหว่างข้อมูลลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในรูปแบบสี่เหลี่ยมไปยังพื้นที่สามเหลี่ยมที่สร้างขึ้น นั้นจะมีความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลน้อยกว่าวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้น

2) จากการทดลองที่ 5.2.3 ถึงการทดลองที่ 5.2.5 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ถูกบิดเบือนด้วยการแปลงเชิงเรขาคณิต อันประกอบไปด้วยการแปลงเชิงภาพฉาย, การหมุนภาพ และการปรับขนาดภาพ โดยการบิดเบือนที่เกิดขึ้นนี้เป็นการจำลองการบิดเบือนอันเกิดจากความตั้งใจของผู้ที่ต้องการทำลายรูปภาพ จากผลการทดลองจะพบว่าโดยรวมแล้ววิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ถูกต้องสูงกว่าร้อยละ 97 ของจำนวนรูปภาพที่ทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

จากการทดลองทั้งสามจะพบว่าสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นเกิดจากปัจจัยสองปัจจัยที่สำคัญคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของรูปภาพอันเนื่องมาจากการบิดเบือนรูปภาพนั้น ๆ และปัจจัยที่สองคือความผิดพลาดในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น

จากการทดลองที่ 5.2.3 พบว่าเมื่อมุมของการฉายมีขนาดเพิ่มขึ้น อัตราความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลง เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.2.2 และ 5.2.3 ที่เมื่อ

ขนาดของมุมในการหมุน และอัตราในการปรับขนาดเพิ่มมากขึ้น อัตราความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นกัน

3) จากการทดลองที่ 5.2.6 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนจุดศูนย์กลางที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัล ต่อความทนทานของพื้นที่สีที่เสื่อมเมื่อรูปภาพผ่านการบิดเบือนด้วยการตัดแบ่งส่วนภาพ ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่า การฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยจำนวนจุดศูนย์กลางที่มากขึ้นจะส่งผลให้จำนวนพื้นที่สีที่เสื่อมที่สร้างขึ้นเพื่อฝังลายน้ำดิจิทัลเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อรูปภาพผ่านการตัดแบ่งส่วนภาพจำนวนพื้นที่สีที่เสื่อมที่เหลืออยู่หลังการตัดแบ่งส่วนภาพ ก็จะมีจำนวนมากกว่าการฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยจุดศูนย์กลางเพียงจุดเดียว จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่ารูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยจุดศูนย์กลางเพียงจุดเดียวเมื่อผ่านการตัดแบ่งส่วนภาพแล้ว จำนวนรูปภาพที่ไม่มีพื้นที่สีที่เสื่อมหลงเหลืออยู่มีจำนวนถึงร้อยละ 38 ของจำนวนรูปภาพทั้งหมดที่นำมาตรวจจับลายน้ำ ในขณะที่รูปภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลด้วยจุดศูนย์กลาง 3 จุดเมื่อผ่านการตัดแบ่งส่วนภาพแล้ว จำนวนรูปภาพที่ไม่มีพื้นที่สีที่เสื่อมหลงเหลืออยู่มีจำนวนเพียงร้อยละ 2 ของจำนวนรูปภาพทั้งหมดที่นำมาตรวจจับลายน้ำ

4) จากการทดลองที่ 5.2.7 ถึงการทดลองที่ 5.2.8 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ถูกบิดเบือนด้วยการปรับเปลี่ยนภาพ ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ ซึ่งได้ทดลองการโจมตีลายน้ำด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวน และการบีบอัดข้อมูลรูปภาพ จากผลการทดลองจะพบว่าโดยรวมแล้ววิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ถูกต้องสูงกว่าร้อยละ 98 ของจำนวนรูปภาพที่ทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

จากการทดลองทั้งสองจะพบว่าสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นเกิดจากปัจจัยสองปัจจัยก็คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของรูปภาพอันเนื่องมาจากการบิดเบือนรูปภาพนั้น ๆ และ ความผิดพลาดในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น และจากการทดลองพบว่าเมื่อมีการบิดเบือนรูปภาพมากขึ้น อัตราความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลง แต่ว่าผลกระทบจากการเพิ่มสัญญาณรบกวน และการบีบอัดรูปภาพนี้ไม่มากนัก

5) การทดลองที่ 5.2.9 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการพิมพ์ภาพ และนำภาพกลับเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยการกราดภาพ จากผลการทดลองจะพบว่าโดยรวมแล้ววิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้ถูกต้องสูงกว่าร้อยละ 93 ของจำนวนรูปภาพที่ทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

จากการทดลองทั้งสอง จะพบว่าสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้นเกิดจากปัจจัยสองปัจจัยก็คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของรูปภาพอันเนื่องมาจากการบิดเบือนรูปภาพนั้น ๆ และ ความผิดพลาดในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามุมของการหมุนภาพในการกราดภาพ และค่าความละเอียดที่ใช้ในการกราดภาพก็มีผลต่อค่าความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วยเช่นกันกล่าวคือ เมื่อมีการหมุนภาพค่าความถูกต้องของ

การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมุมมองของการหมุนภาพมากขึ้น และค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการกราดภาพด้วยความละเอียดที่ต่ำลง

6) การทดลองที่ 5.2.10 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการพิมพ์ภาพ และนำกลับเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยการถ่ายภาพ นอกจากนี้ยังเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของสภาพแวดล้อมและตำแหน่งในการถ่ายภาพ ต่อผลความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลด้วย

จากการทดลองพบว่า การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลด้วยความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ ที่ระยะห่างจากรูปภาพ 1.5 เมตรจะมีความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลสูงที่สุดคือร้อยละ 93.06 ของรูปภาพที่นำมาตรวจจับลายน้ำทั้งหมด โดยที่ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลด้วยความละเอียด 3 ล้านพิกเซล ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ ที่ระยะห่างจากรูปภาพ 1 เมตรจะมีความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลสูงที่สุดคือร้อยละ 82.23 ของรูปภาพที่นำมาตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

จากการทดลองทั้งสองจะพบว่าสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลนั้น เกิดจากปัจจัยสามปัจจัยที่คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของรูปภาพอันเนื่องมาจากการบิดเบือนรูปภาพนั้น ๆ , ความผิดพลาดในการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น และจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นจุดที่มีลักษณะเด่นปลอมหรือจุดที่มีลักษณะเด่นอื่นๆ ที่ไม่ได้ถูกคัดแยกในขั้นตอนการฝังลายน้ำดิจิทัล แต่ถูกคัดแยกและแทรกกระหว่างพื้นที่สีเหลี่ยมที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัลในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล

นอกจากนี้สามารถสรุปผลกระทบจากสภาพแวดล้อม และตำแหน่งของการถ่ายภาพต่อความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากการทดลองได้ดังนี้

- ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ ด้วยความละเอียดในการถ่ายภาพที่สูงจะมีผลให้ความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลดีขึ้น
- ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัล จากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ ภายใต้สภาพแวดล้อมแสงธรรมชาติ ซึ่งมีความสว่างของแสงมากจะมีผลให้ความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลดีขึ้น แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของกระดาษที่ใช้พิมพ์ภาพ กล่าวคือถ้ากระดาษที่ใช้พิมพ์ภาพเป็นแบบกระดาษมันสะท้อนแสง การถ่ายภาพที่บริเวณที่มีแสงสว่างมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสะท้อนของแสงเกิดเป็นเสมือนสัญญาณรบกวนในภาพได้
- ค่าความถูกต้องของการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพที่ผ่านการถ่ายภาพ ในระยะห่างที่ไกลจะเป็นการลดผลกระทบจากการฉายเชิงทัศนมิติลง ซึ่งส่งผลให้การตรวจจับลายน้ำดิจิทัลมีความถูกต้องมากขึ้น

7) การทดลองที่ 5.2.11 สรุปได้ว่าค่าปัจจัยต่างๆ สำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลอันประกอบไปด้วยจำนวนจุดศูนย์กลางและจำนวนจุดที่มีลักษณะเด่นที่อยู่ติดๆ กันสำหรับการตรวจจับลายน้ำซึ่งได้ถูกพิจารณาจากรูปภาพต้นฉบับ 50 รูปนั้น สามารถนำมาใช้กับรูปภาพอื่นๆ นอกเหนือจากกลุ่มรูปภาพต้นฉบับ 50 รูปนั้นได้

8) การทดลองที่ 5.2.12 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความซับซ้อนในการค้นหาพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลในกรณีที่แย่ที่สุด คือสรุปได้ว่าไม่พบลายน้ำดิจิทัลในรูปภาพนั้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัลกอริทึมการคัดเลือกจุดศูนย์กลางที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะช่วยลดปริมาณพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องทำการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคต

ในการพัฒนาต่อไปในอนาคตมีประเด็นที่ควรปรับปรุงแก้ไข 3 ประเด็นดังนี้คือ

- อัลกอริทึมการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่น : ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัลกอริทึมการตรวจจับจุดมูมภายในรูปภาพของแฮร์ริส มาปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการบิดเบือนในรูปแบบต่างๆ แต่เราก็ยังไม่มี ความทนทานที่เพียงพอ ซึ่งจะสังเกตได้จากการทดลองว่าสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถตรวจจับลายน้ำดิจิทัลได้นั้นมาจากสาเหตุของความไม่ทนทานของจุดที่มีลักษณะเด่น ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนาวิธีการคัดแยกจุดที่มีลักษณะเด่นที่มีความทนทานสูงขึ้นกว่านี้ จะส่งผลให้ความถูกต้องในการตรวจจับลายน้ำดิจิทัลดีขึ้น

- อัลกอริทึมการคัดเลือกจุดศูนย์กลาง : เนื่องจากว่าวิธีการคัดเลือกจุดศูนย์กลางที่พัฒนาขึ้นนั้นมีโอกาสที่จะเกิดปัญหาขึ้นได้เมื่อมีการตัดแบ่งส่วนภาพ ในกรณีที่มีการตัดแบ่งส่วนภาพในกรณีอื่นๆ นอกเหนือจากการตัดแบ่งส่วนภาพจากขอบของรูปภาพเข้ามาด้านละเท่าๆ กัน จึงควรมีการปรับปรุงให้มีการเลือกจุดศูนย์กลางที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

- อัลกอริทึมการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม : ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถสรุปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของมูมภายในกับมูมฉาก และขนาดของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสม สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบใด ๆ ได้ ดังนั้นจึงควรพัฒนาวิธีการคัดเลือกพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ดีขึ้นเพื่อให้ได้พื้นที่สี่เหลี่ยมที่เหมาะสมต่อการฝังลายน้ำดิจิทัลที่ดีขึ้นด้วย

- อัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัล : ควรมีการนำเอาการเข้ารหัสเพื่อตรวจจับหรือแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลมาใช้งาน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของข้อมูลลายน้ำดิจิทัล

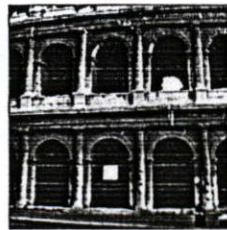
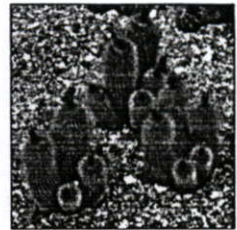
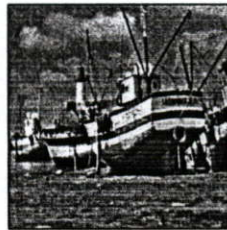
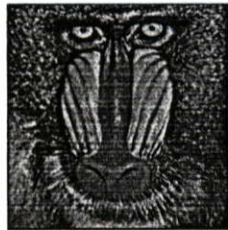
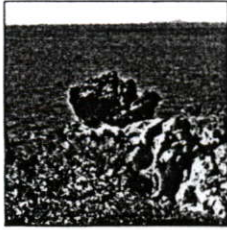
เอกสารอ้างอิง

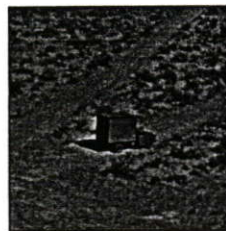
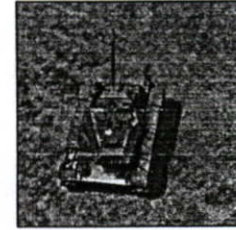
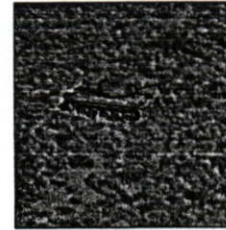
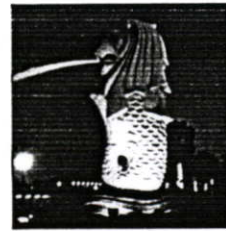
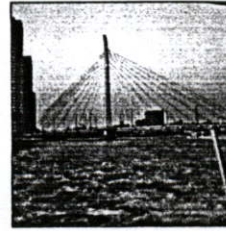
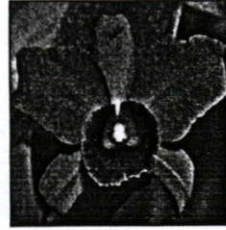
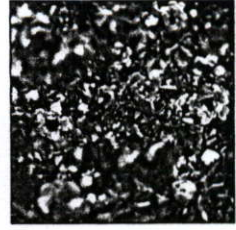
- [1] Cox, I. J., Miller, M. L. and Bloom, J. A., **Digital Watermarking**. London : Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [2] Langelaar G.C., Setyawan I., Lagendijk R.L., "Watermarking Digital Images and Video Data: A state-of-the-art overview.", **IEEE Signal Processing Magazine.**, vol. 17, 2000. pp. 20-46.
- [3] Hartung, F. and Kutter, M. "Multimedia Watermarking Techniques." **Proceedings of the IEEE.**, vol.87, 1999. pp. 1079-1107
- [4] Bender, W., Morimoto, N., and Gruhl, D. "Techniques for data hiding." **IBM System Journal.**, vol.25, 1996. pp. 313-335
- [5] Cox, I. J., Miller, "The first 50 years of electronic watermarking." **EURASIP Journal on Applied Signal Processing.**, vol.2, 2002. pp.126-132
- [6] Cox, I. J., Killian, J., Leighton, F.T. and Shamoon, T. "Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia." **IEEE Transactions on Image Processing.**, vol.6, 1997. pp. 1673-1687.
- [7] Angel E., **Interactive Computer Graphics A Top-Down Approach Using OpenGL™**. Pearson Education, 2003.
- [8] Mohr, R. and Morin, L., "Relative Positioning from Geometric Invariants." **Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.**, 1991. pp.139-144.
- [9] กลุ่มสาระการเรียนรู้วิชาศิลปะ โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย เพชรบุรี. "การพิมพ์ภาพ" [Online.] Available: <http://www.pccphet.ac.th/art/web1/pim.htm>
- [10] Grape. "รู้สัณนิท ก่อนเล่นกล้องดิจิทัล" [Online]. Available: <http://www.thaidigicam.com> 2001.
- [11] Alghoniemy M. and Tewfik A. H., "Geometric Distortion Correction through image normalization." **Proceeding of the International Conference on Multimedia and Expo.**, August 2000. pp. 1291-1294.
- [12] Dong P., and Galatsanos N. P., "Affine Transformation Resistant Watermarking Based on Image Normalization." **Proceeding of the International Conference on Image Processing.**, September 2002.

- [13] Ó Ruanaidh, J. J. K. and Pun, T., "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking." **Signal Processing, Special Issue on Copyright Protection and Control**, vol. 66, 1998. pp. 303-317.
- [14] Ni, Z., Sung, E. and Shi, Y. Q., "Enhancing robustness of digital watermarking against geometric attack based on fractal transform." **Proceeding of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo.**, vol.2, 2000, pp. 1033-1036.
- [15] Pereira,S. and Pun, T., "Robust Template Matching for Affine Resistant Image Watermarks." **IEEE Transactions on Image Processing**, vol.9, 2000. pp. 1123-1129.
- [16] Ó Ruanaidh, J. J. K. and Pun, T., "Template based recovery of Fourier-based watermarking using log-polar and log-log maps." **Proceeding of the International Conference on Multimedia Computing System, Special Session Multimedia Data Security Watermarking.**, vol.1, 1999. pp. 870-874.
- [17] Bas, P., Chassery, J-M. and Macq, B., "Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points." **IEEE Transactions on Image Processing.**, vol. 11, 2002. pp.1014-1028.
- [18] Kutter M., Bhattacharjee, S. K. and Ebranhimi T., "Toward Second Generation Watermarking Schemes." **Proceeding of the IEEE International Conference on Image Processing.**, vol. 1, 1999. pp. 24-28
- [19] Chotikakamthorn, N. and Yawai, W., "Digital Watermarking Technique for Images with Perspective Distortion." **Proceeding of the International Conference on Control, Automation and Systems.**, 2004.
- [20] Harris, C. and Stephen, M., "A combined corner and edge detector." **Proceeding of the 4th Alvey Vision Conference.**, 1988. pp. 147-151
- [21] Signal & Image Processing Institute. "The USC-Image Database" [Online.] Available: <http://sipi.usc.edu/database>
- [22] University of Washington Libraries. "Cities and Buildings Database" [Online.] Available: <http://content.lib.washington.edu/buildingsweb>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
รูปภาพที่ใช้ในการทดลอง





ภาคผนวก ข.

บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Natapon Pantuwong and Nopporn Chotikakamthorn, "Efficient Perspective-Invariant Digital Watermarking Algorithm." **Proceeding of the 20th Commemorative International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications.**, 4-7 July 2005. pp. 391-392

2005-06-05 13:27 FROM:

82-2-882-2725

TO:

P:01

ITC-CSCC 2005 The 20th Commemorative
International Technical Conference on
Circuits/Systems, Computers and Communications

July 4 - 7 2005

The Shilla Hotel, Jeju, Korea

<http://www.itc-cscc2005.org>

June 5, 2005

Invitation Letter for Author

Mr. Natapon Pantuwong

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Dear Mr. Natapon Pantuwong,

This is a certification that the paper entitled "Efficient Perspective-Invariant Digital Watermarking Algorithm" written by Mr. Natapon Pantuwong has been accepted for oral presentation at "The 20th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2005)" to be held in the Shilla Hotel, Jeju, Korea, from July 4-7, 2005, and publication in the Proceedings.

This letter is not a commitment on the part of ITC-CSCC 2005 organizers to provide financial assistance to you. Expenses incurred are of the sole responsibility of the participant.

We are looking forward to meeting you at the conference.

Sincerely,

Jin Woo Eo

Organizing Committee Chair, ITC-CSCC 2005

Professor, Dankook University

ITC-CSCC 2005
K.A. 0000

ITC-CSCC 2005 *The 20th Commemorative*
International Technical Conference
on Circuits/Systems, Computers and Communications

Proceedings Volume 1

Sponsored by
The Institute of Electronics Engineers of Korea (IEEEK)
The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE), The Engineering Sciences Society, Japan
The Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Association, Thailand

Co-Sponsored by
Ministry of Information and Communication
Samsung Electronics
KTF
SK Telecom
LG Electronics
Institute of Information Technology Assessment
The Korean Federation of Science and Technology Societies
Korea Research Foundation
◆ Korea National Tourism Organization
Jeju Provincial Government

In cooperation with
Technical Committee on Electronic Circuits, The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEEJ)

July 4-7, 2005
The Shilla Hotel, Jeju, Korea

Efficient Perspective-Invariant Digital Watermarking Algorithm

Natapon Pantuwong¹ and Nopporn Chotikakamthorn²

^{1,2} Faculty of Information Technology & Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand
Tel: +66-2-737-3000 Ext.3335
E-mail: s6066201@kmitl.ac.th

Abstract: Detection of a digital watermark in images distorted by perspective transform is very difficult. Based on a set of four coplanar points, a watermarking method can be developed to be perspective-invariant. A direct approach is to estimate the transformation matrix from four point correspondences between the original and distorted images. Alternatively, watermark embedding locations can be directly recovered from the perspective-distorted image through the cross ratio relationship of four collinear points, derived from a set of four coplanar points. The four coplanar points required by either of these two approaches may be obtained by choosing among feature points extracted from the possibly watermarked image. With many feature points to select, a search for an embedded watermark can be time-consuming. This paper compares the two approaches as mentioned in terms of computational requirement. It is shown that, in addition to a less demanding on computation of the second approach, the approach makes it possible to adopt an efficient two-stage watermarking scheme.

1. Introduction

Detection of distorted watermark image is very difficult by the synchronization problem. Many watermarking schemes have been developed to be robust against affine transform. Those methods are based on different approaches including image normalization [1], affine-invariant domain [2], template matching [3], and feature-based watermarking [4]. These methods were developed under the assumption that the image of interest is distorted by an affine transform. Therefore, they fail when the image is distorted by a more general perspective transform.

A straightforward approach to solve the problem in detecting a watermark in a perspective-distorted image is to perform an inverse transformation first. The transformation matrix can be obtained by using four point correspondences associating four feature points in the distorted image with the corresponding points in the original image. Alternatively, each watermark embedding location can be obtained through a cross-ratio relationship, derived from four collinear points [6]. The four coplanar points as required by both methods can be obtained by performing image feature point extraction. However, with a large number of candidate points, search for a right set of four coplanar points can be computing intensive. This paper first shows that the second method based on the cross-ratio principle requires less computation than a direct inverse transformation approach. Furthermore, it is shown that by adopting a two-stage watermarking search strategy further

reduction in computation requirement is achieved when the cross-ratio based method is used.

This paper is organized as follows: In Section 2, computational requirement of the direct method based on inverse transformation is summarized. In Section 3, complexity of the cross-ratio based method is described. Section 4 reports some experimental results. Conclusion is given in Section 5.

2. Inverse Transform Based Watermarking

The perspective transformation matrix can be estimated by using four point correspondences. Four image's featured points that form the quadrilateral area were chosen as registration points, to estimate the matrix.

By performing the so-obtained inverse matrix to the distorted image, watermark embedding locations can be recovered. This method needs to calculate the inverse matrix and perform inverse operation. The order of complexity requires is $14N + O(K^3)$ (N is the number of watermark bits. K is the number of coplanar points used to estimate the matrix, which is equal to 4 in this paper).

3. Cross-Ratio Based Watermarking

With many candidate sets of four coplanar points to perform watermark detection, the inverse matrix for each candidate set of four points needs to be computed. This section briefly describes an alternative method based on the cross-ratio relationship, first described in [6]. The algorithm is described below.

1. Define a set of cross-ratio values to be used in subsequent steps.
2. Find the intersection point of two diagonal lines, denoted as P_c (see Fig. 1 (a)).
3. Calculate the primary-level watermark embedding points (P_r, P_d, P_{br}, P_{bt}) those lie on the diagonal lines by using cross-ratio theory (see Fig. 1 (a)).
4. Finding the watermark embedding location for left triangle area of the quadrilateral area. By use the $p_1^f, p_2^f, P_d(t)$ and $P_M(t)$ as secondary-level four coplanar feature points. The watermark embedding points are then obtained by repeating Step 2-3 (See Fig 1(b)).
5. Repeat Step 4 to find watermark embedding points for the right, top and bottom triangle areas.

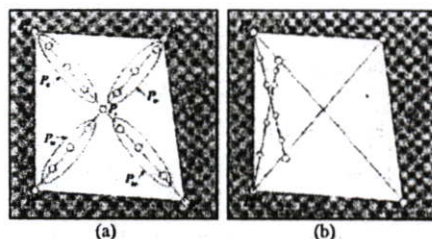


Figure 1: (a) A set of primary-level watermark embedding locations and (b) Watermark embedding locations, constructed from primary-level embedding locations.

The method as described requires $7N + o(N)$ operations to recover watermark embedding locations for each set of four coplanar points. However, by first detecting a watermark for areas defined by all candidate sets of four points, using only a subset of all embedding locations, and then performing refined detection using all embedding points, speed of detection process can be improved.

4. Experimental Result

The experiment was carried out to compare the amount of computation required by the two methods as described in Sections 2 and 3. Six 512x512 grayscale images were chosen for this experiment. Each image was separated into small rectangular areas (16, 36 and 64 areas). Watermark of length $N=1,600$ was embedded onto areas chosen randomly. All embedded images were distorted by a perspective transform with angles of projection varied from 1° to 20° . For the two-stage detection scheme, the first 320 watermark bits were used (20% of the watermark length).

From the experiment, all embedded quadrilateral areas yielded the normalized correlation coefficient values greater than 2. With the two-stage method, the number of candidate quadrilateral areas left for a full search was dropped to 35%. If there are M quadrilateral areas to be searched, by using the inverse transformation method, this method requires on average $0.5M$ times to detect the embedded quadrilateral area. By using the proposed method, the number of embedding area to search was dropped to $0.175M$. Fig. 2 compares the number of operations required by the two methods, using a watermark of length $N=1,600$.

In Fig. 3, the numbers of operations for each candidate quadrilateral area required the two methods, were compared. It is shown that the cross-ratio based method is less demanding than the direct inverse transformation method.

5. Conclusion

By using the cross-ratio relationship, the watermark embedding locations could be obtained and the number of operations required is less than that of the direct inverse transformation method. In addition, by adopting a two-stage watermark search scheme, complexity of the cross-ratio based method is greatly reduced.

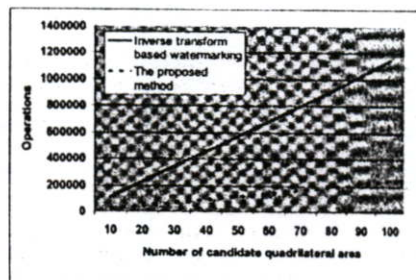


Figure 2: The averaged number of times required to evaluate candidate watermark embedding areas, by each of the two methods.

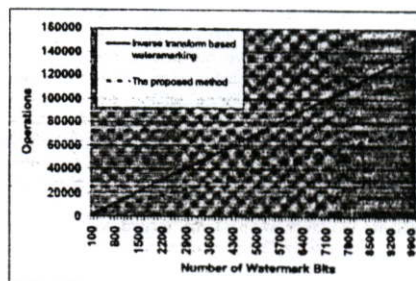


Figure 3: Comparison of operation counts required by the two methods for each candidate quadrilateral area.

References

- [1] Masoud Alghoniemy and Ahmed H. Tewfik, "Geometric Distortion Correction through image normalization," in *Proc. International Conference on Multimedia and Expo*, 2000.
- [2] J. J. K. Ó Ruanaidh and T. Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," *Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp.303-317, May 1998.
- [3] Shelby Pereira and Thierry Pun, "Robust Template Matching for Affine Resistant Image Watermarks", *IEEE Transactions on Image Processing*, pp.1123-1129, 2000.
- [4] P. Bas, J-M. Chassery and B. Macq, "Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 9, pp. 1014-1028, 2002
- [5] R. Mohr and L. Morin, "Relative Positioning from Geometric Invariants," *Proc. of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 139-144, 1991.
- [6] Nopporn Chotikakamthorn and Wiyada Yawai, "Digital Watermarking Technique for Perspective Image", in *Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2004*, 2004.

2. Natapon Pantuwong and Nopporn Chotikakamthorn, "Digital Watermarking Technique for Projective-Distorted Images Using Collinear Points." **Proceeding of the 13th European Signal Processing Conference.**, 4-8 September 2005.

T.C.
BOĞAZIÇI ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü



European Association
for Signal Processing



13th European Signal
Processing Conference
September 4-8, 2005
Antalya / Turkey

6 May 2005

Natapon Pantuwong, Wiyada Yawai, Nopporn Chotikakamthorn
Faculty of Information Technology
Research Center for Communications and Information Technology,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Bangkok 10520, Thailand
email: sb096620@kmitl.ac.th

Dear Natapon Pantuwong, Wiyada Yawai, Nopporn Chotikakamthorn,

On behalf of the Organizing Committee of EUSIPCO-2005, we would like to take this opportunity to inform you about the 13th European Signal Processing Conference, which will be held in Antalya, Turkey at September 4-8, 2005.

Your paper entitled as "Digital Watermark Technique for Projective-Distorted Images Using Collinear Points (Paper No : 1585)" is accepted for presentation at EUSIPCO-2005.

You are cordially invited to participate in this exciting program, either by presenting scientific data or taking part in the discussions and provide the Conference with a broader spectrum of research.

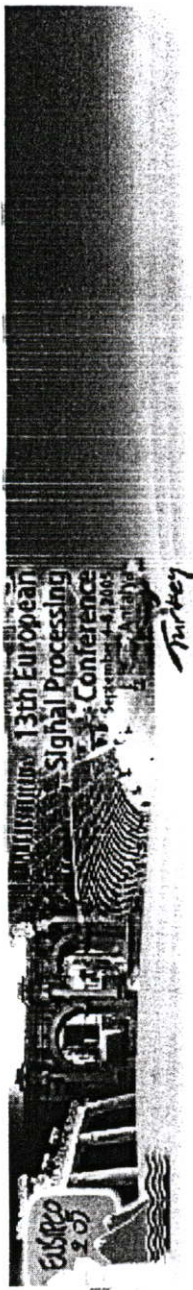
We sincerely hope that you will join us in making EUSIPCO-2005 a success. We look forward to meeting you in Antalya, Turkey.

Yours sincerely,

Enis Çetin
Technical Co-Chair

Murat Tekalp
Technical Co-Chair

Bülent Sankur
Chairman



Technical Support: for any problems or questions related to the usage of this CD please contact SuviSoft Oy Ltd., Tampere Finland. E-mail: support@suvisoft.fi
Fax: +358-3-3165490
Phone: +358-3-3165489.

CD edited by SuviSoft.
ISSN: 975-00189-3-X

Start

DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR PROJECTIVE-DISTORTED IMAGES USING COLLINEAR POINTS

Natapon Pantuwong, Wiyada Yawai, and Nopporn Chotikakanthorn

Faculty of Information Technology & Research Center for Communications and Information Technology,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Bangkok 10520, Thailand
phone: + (66) 1485-1457, email: s6066201@kmitl.ac.th
web: http://mvlab.reccit.kmitl.ac.th

ABSTRACT

Detection of a digital watermark in images distorted by geometric transforms is made difficult by the so-called synchronization problem. Many watermarking methods have been developed to be robust against an affine transform. Based on such assumption, those methods fail under a more general projective transform. In this paper, a method that is invariant to planar projective transform is presented. The method is based on a projective invariance property of the cross-ratio of four collinear points. Based on four coplanar points as obtained by extracting feature points from the host image, two sets of three collinear points are obtained. From each set of three collinear points, each watermark embedding location can be obtained through its cross-ratio relationship with those aforementioned three collinear points. A method to increase the number of embedding points in addition to those primarily derived from these sets of collinear points is also proposed. An algorithm to form a set of four coplanar points from feature points is also described.

1. INTRODUCTION

In recent works, many digital watermarking schemes have been developed to be robust against an affine transform [1-7]. Depending on their approaches, each of these methods falls roughly under one of the following categories: a normalization-based watermarking [1], invariant domain-based watermarking [2], template matching-based watermarking [3] and feature-based watermarking [4, 7].

These methods have been developed under the assumption that the watermarked image is geometrically distorted by an affine transform. They are thus not robust against projective distortion. In this paper, a watermarking method is developed to be robust against such distortion. The proposed scheme makes use of the projective invariant property of four collinear points. Based on a set of four coplanar feature points, watermark embedding locations are computed through the cross ratio relationship of each embedding point with three collinear points, which are in turn derived from the feature points. Perhaps use of the cross-ratio of collinear points under the context of digital watermarking was first investigated in [5]. However, there the theory is applied in the frequency domain, making it inapplicable for spatially distorted images (because a projective transform is non-linear). Use of the cross-ratio theory for projective-invariant

watermarking was first described in [8]. The method in [8] is, however, not robust against image cropping.

This paper is organized as follow. In section 2, a theory of four collinear points and their invariance against planar projection is briefly described. In section 3, detail of the proposed perspective-invariant digital watermarking scheme using four collinear points is described. In section 4, a method for constructing a set of collinear points from extracted image features is provided. Section 5 reports some experimental results. Conclusion is given in section 6.

2. INVARIANCE THEORY OF FOUR COLLINEAR POINTS

The cross-ratio theory of four collinear points is briefly explained in this section. From Fig. 1, A, B, C, and D are points that lie along a straight line. These points are said to be collinear points. The cross-ratio of these points are given by

$$r_{CR} = \frac{\overline{CA} \cdot \overline{DB}}{\overline{CB} \cdot \overline{DA}} \quad (1)$$

where \overline{ab} is the signed Euclidean distance of the line segment connecting two arbitrary points a and b . For example, in this particular point arrangement, with A as a reference point, \overline{CA} is positive while \overline{BD} is negative.



Figure 1: Example of four collinear points

3. DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE BASED ON THE CROSS-RATIO THEORY

Based on the cross-ratio theory as outlined in Section 2, an algorithm for embedding and detecting a watermark is described below. The algorithm assumes that four coplanar feature points on the image are given. This means no three of those points are collinear. How these points are obtained is deferred until Section 4.

3.1 Embedding Algorithm

1. Select a set of predefined cross-ratio values, to be used in subsequent steps.

2. Based on four coplanar feature points $P_i, i = 1, \dots, 4$, (see Fig. 2 where the four image corners are chosen as P_i), compute the intersection point of two lines which are constructed from these coplanar points. Denote the intersected point as P_c .
3. By using the predefined cross-ratios, and two sets of three collinear points, Eq. (1) is applied to calculate the primary watermark embedding points along each of the two lines in Step 2. For example, in Fig. 2 (a), points along the line connecting P_1 and P_3 are calculated using P_1, P_3 and P_c . Then, with P_c , the two intersected lines are divided into four line segments. This in turn, divides these primary embedding points into four sets, denoted by S_a, S_b, S_c , and S_d (see Fig. 2 (a)).
4. Compute the secondary watermark embedding points in the 'left' image segment as defined by the triangle $P_1 P_c P_3$. This is achieved by first constructing lines joining each point in S_a with P_4 . Then construct similar lines which join each point in S_d with P_1 . The secondary watermark embedding points are obtained as the intersection points between these lines (see Fig. 2 (b)).
5. Repeat Step 4 to calculate secondary watermark embedding points on each of the other three image segments ('right', 'top', and 'bottom') as defined by the triangles $P_2 P_3 P_c, P_1 P_c P_2$, and $P_3 P_2 P_c$. Fig 2 illustrates 1600 watermark embedding locations obtained using 40 primary-level watermark embedding points.
6. Embed a watermark pattern onto those embedding points obtained from Steps 4-5. Here a spread-spectrum based spatial watermarking method is assumed. Let $p_i^r, i = 1, 2, \dots, N$, be N watermark embedding points. Given a watermarking pattern bits $w_i \in \{-1, 1\}, i = 1, 2, \dots, N$, a watermarked image is obtained by using the following equation [6]

$$I_w(x_i, y_i) = I(x_i, y_i) + (\alpha \cdot w_i) \quad (2)$$

where $I(x_i, y_i)$ is the original image, (x_i, y_i) is the coordinate of p_i^r , and α is the modulation factor.

3.2 Detecting Algorithm

To detect the watermark from a possibly distorted image I'_e , watermark embedding locations must first be recovered. Those points are obtained by applying Steps 1-5 of the embedding algorithm to I'_e . By using a correlator as a watermark detector, detection is performed by computing the following correlation coefficient.

$$C(I'_e, w) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\tilde{I}'_e(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i) \cdot \tilde{w}(i)}{\sigma_{I'_e} \cdot \sigma_w} \quad (3)$$

where $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ are watermark embedding points estimated from I'_e , $\sigma_{I'_e}$ and σ_w are the standard deviations of $I'_e(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ and the watermark pattern, respectively. In addition, $\tilde{I}'_e(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ and $\tilde{w}(i)$ are zero-mean versions of $I'_e(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ and $w(i)$, respectively. The watermark is detected if the correlation value is above a predefined threshold. The threshold may be defined, for example, by using certain statistical criteria [6].

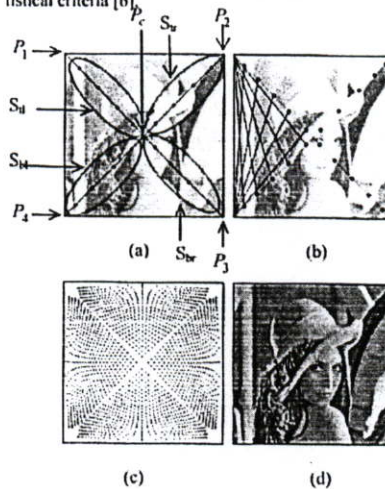


Figure 2: (a) Sets of primary watermark embedding points, (b) Secondary watermark embedding points obtained through line intersection, (c) Watermark embedding locations and (d) Watermarked image.

4. EXTRACTING COLLINEAR POINTS FROM IMAGE CONTENT

In the previous section, it is assumed that the four coplanar points are available. These points may be obtained, for example, by using four image corners. This method, however, is not applicable to a cropped image. In [7], image feature points are applied for normalization of an affine-transformed image. The method in [7] uses Delaunay tessellation to create triangles from a set of feature points. For each of the triangles formed in this manner, its three vertex points are used for image normalization, and thus watermark synchronization. Although for a particular set of points, Delaunay triangulation is unique, change in members of the point set as well as their coordinates may result in different set of triangles. Therefore, Delaunay triangulation does not guarantee that triangles formed during the embedding stage will be topologically the same as those computed during the detection stage. A set of feature points obtained from the possibly watermarked image may differ from that of the original one due to the following reasons.

1. A feature detector may produce different sets of feature points, when applied to the original and distorted images.
2. Change in relative locations of the feature points due to geometric distortion may result in different ways of triangle tessellation, to preserve the non co-circular rule of Delaunay tessellation. This problem arises due to the fact that the projective transform does not preserve length and angle.

To avoid these problems, a quadrilateral tessellation method is developed for our problem. Outline of the algorithms for the embedding and detecting stages is given below.

4.1 Feature extraction for the embedding stage

1. Use a detector of choice to detect a set of feature points. Let's K be the number of chosen points which represent salient features in the image. For instance, a 'score' obtained from a detector for each point may be used as a criterion for the selection.
2. Choose the center points among the points with highest feature scores, to be later used for quadrilateral tessellation. There should be more than one of such points to avoid the cropping attack. The points should also be well distributed and cover most of the image area. Denote these points as $p_i^c, k = 1, \dots, L$.
3. For each of p_i^c , form a quadrilateral with three other surrounding feature points. There can be many of such quadrilaterals. However, those with a large internal angle on any of its vertices are rejected, because they result in a small and dense embedding area.

Examples of quadrilaterals formed by the method is shown in Fig. 3 (a-b). In Fig 3(b), 3 sets of quadrilaterals are formed with center points located in different image parts. Such formation may be used to cope with image cropping.

4.2 Search algorithm for the detecting stage

The feature points extracted from the distorted image may differ from those of the original one. Some feature points appeared in the original image may not be detected, and vice versa. Exhaustive search is necessary to find a set of feature points corresponding to the watermark embedded area. To reduce computation required for direct search, a systematic algorithm is developed to search for a watermark. It is described below.

1. Select feature points with high scores as center point candidates. The number of candidate center points chosen should be slightly higher than the ones used at the embedding stage.
2. For each p_i^c , form a list of the surround feature points by sorting them according to their angular relationship with respect to p_i^c (see Fig. 3 (c) for the counter-clockwise arrangement).
3. Choose each of the points in the list as a starting point, denoted by p_i^s . From such point form a set of Q consecutive points in the sorted list. For example, in Fig.

3(b), the point p_i^s is chosen as p_i^c , and along with p_i^s to p_i^s , they form a set of $Q = 5$ consecutive points.

4. Use p_i^s and p_i^s to form all possible quadrilaterals with two of the other $Q - 1$ points. For each quadrilateral formed, a watermark detection algorithm is applied (see Fig. 3(c), for example).
5. If in Step 4 a watermark is found, a detector is now 'synchronized' and the third point of the quadrilateral containing a watermark is used as a starting point (p_i^s) of the next block. Step 4 of the algorithm is then repeated.
6. If in Step 4 a watermark is not found, from the list obtained by Step 2, choose the point next to the current p_i^s as a new starting point. Then repeat Step 4.

The choice of the search window size Q depends on how different the feature points of the original and distorted images are likely to be. If a large difference is likely to be, Q should be a high value. Based on empirical study, the choice of Q between 4 to 7 is sufficient.

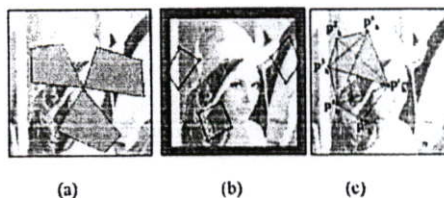


Figure 3: (a) Typical quadrilaterals formed by each reference point, (b) Using multiple center points to cope with image cropping, (c) Quadrilaterals formed at the detecting process.

5. EXPERIMENTAL RESULT

Experiment was performed to evaluate the performance of the proposed method. Six grayscale images of size 512×512 pixels were used in the experiment. Harris corner detector was employed to extract image features. Before applying the detector to extract feature points, a low-pass filter operator was first applied to each image.

In the first experiment, an affine-based method was tested to verify that a method based on the affine transform assumption fails under the projective transform. Four image corners were chosen as registration points, to estimate the affine transform parameters. Fifty different watermarks of length $N = 1,600$ each were embedded over the image area by the proposed method with three center points. The fixed modulation factor $\alpha = 3$ was used in all experiments. To reduce a problem due to local non-linear distortion, each watermark bit was embedded over an image area of size 3×3 . The watermarked images were distorted by planar projection in the manners as shown in Fig. 5, with angle of projection changing from 5° , 10° and 15° . The distance between the center of projection and the image object is two times the object size. In Fig. 4, the resulting normalized correlation coefficients

($= C(I_p, w) \cdot \sqrt{N}$) are shown for the proposed method, along with the values obtained by using the affine-based method. From the figure, deficiency of an affine-based method is evident.

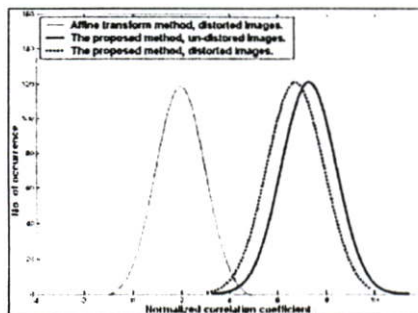


Figure 4: Distributions of the normalized correlation coefficients, obtained by an affine-based method and the proposed method.

By using the proposed detection scheme with the detection threshold of 4, the overall false positive detection rate was 0.11%, while the overall false negative rate was 1.21%. Percentages of correct detection for each projection direction are provided Table 1. In all cases, correct detection rate is above 98.00%.

In the second experiment, all embedded images were cropped at 80% and 90% of the original image area. In a separated experiment, they were scaled down by 80% and 90% of the original size. After cropping (scaling), images were projective distorted with the projection angle of 15°, both horizontally and vertically. By using the proposed method with the detection threshold of 4, the overall false positive detection rate was 0.15%, while the overall false negative rate was 2.15%. In all cases, correct detection rate is above 97.00%. See Table 2 for detailed results.

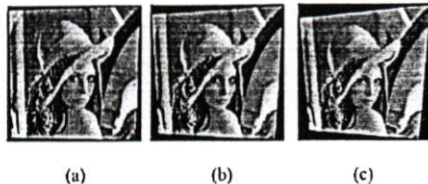


Figure 5: (a) Angle of projection = 5°, (b) Angle of projection = 10°, (c) Angle of projection = 15°.

6. CONCLUSION

In this paper, the watermarking method that is invariant to planar projective transform has been presented. The method makes use of the invariance property of the cross-ratio of

four collinear points. Watermark embedding locations are calculated from four co-planar feature points using a pre-defined set of cross ratios. A window-sliding algorithm has been provided to reduce watermark searching complexity.

Images	Angle of projection		
	5°	10°	15°
Lena	99.12	98.95	98.64
Pepper	99.21	98.83	98.59
Baboon	98.45	98.15	97.94
Cameraman	99.14	98.94	98.73
Plane	99.25	98.96	98.79
Boat	99.04	98.81	98.62
Total	99.04	98.77	98.56

Table 1: Experimental result for the first experiment

Images	Cropping		Scaling down	
	90%	80%	90%	80%
Lena	98.25	97.96	98.01	97.85
Pepper	97.94	97.63	97.94	97.67
Baboon	97.59	97.16	97.21	97.02
Cameraman	98.14	97.92	98.12	97.87
Plane	98.34	98.04	97.98	97.61
Boat	98.24	97.98	98.04	97.85
Total	98.08	97.10	97.88	97.65

Table 2: Experimental result for the second experiment

REFERENCES

- [1] Masoud Alghoniemy and Ahmed H. Tewfik, "Geometric Distortion Correction through image normalization," in *Proc. International Conference on Multimedia and Expo*, 2000.
- [2] J. J. K. Ó Ruanaidh and T. Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," *Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp.303-317, May 1998.
- [3] Shelby Pereira and Thierry Pun, "Robust Template Matching for Affine Resistant Image Watermarks", *IEEE Transactions on Image Processing*, pp.1123-1129, 2000.
- [4] M. Kutter, S. K. Bhattacharjee, and T. Ebrahimi, "Toward Second Generation Watermarking Schemes", in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Proces.*, vol. 1, 1999.
- [5] R. Caldelli, M. Barni, F. Bartolini, and A. Piva, "Geometric-invariant robust watermarking through constellation matching in the frequency domain," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing*, vol. 2, Sept. 2000, pp. 65-68.
- [6] I. J. Cox, N. L. Miller, and J. A. Bloom, *Digital Watermarking*. Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [7] P. Bas, J-M. Chassery and B. Macq, "Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 9, pp. 1014-1028, 2002.
- [8] Noppom Chotikakamthorn, and Wiyada Yawai, "Digital Watermarking Technique for Perspective Image", in *Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2004*, 2004.

- Natapon Pantuwong and Nopporn Chotikakamthorn, "Comparative Study of Two Projective-Invariant Digital Watermarking Methods Using Cross-Ratios and Line-Intersections." **Proceeding of the Fifth International Conference on Computer and Information Technology**, 21-23 September 2005. pp. 543-547



Comparative Study of Two Projective-Invariant Digital Watermarking Methods Using Cross-Ratios and Line Intersections

Natapon Pantuwong, and Nopporn Chotikakamthorn

Faculty of Information Technology &
Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Bangkok, Thailand
s6066201@kmitl.ac.th

Abstract

Recently, based on a set of four coplanar points, a projective-invariant digital watermarking has been developed. A combination of line intersection and the cross-ratio relationship of collinear points is used to calculate watermarking embedding locations. The four coplanar points used to derive embedding locations can be obtained from either the image corners or the feature points extracted from the image content. It is shown in this paper that based on the same principle, an alternative algorithm for calculating the watermark embedding locations improves computational efficiency. The proposed method heavily uses the cross-ratio relationship of collinear points, while minimizing the use of line intersection in obtaining embedding locations. This is in contrast with the original method, where embedding locations are mainly obtained from intersections of line pairs. Both analytical and experimental results are provided to demonstrate the improvement.

1. Introduction

Detection of a digital watermark in images distorted by affine as well as a more general projective transforms is very difficult due to the so-called synchronization problem. Nowadays, several approaches that counterattack the geometric distortions have been developed: normalization based watermarking [1], invariant domain based watermarking [2], template matching based watermarking [3] and featured-based watermarking [4]. These methods have been developed under the assumption that watermarked image is geometrically distorted by an affine transform. However these methods are not robust against a more general projective transform.

In [5], based on a set of four coplanar points, a watermarking method was developed to be projective-invariant. Watermark embedding locations can be directly recovered from the projective-distorted image through the cross ratio relationship of four collinear points, which are derived from a set of four coplanar points. The four coplanar points may be obtained by extracting feature points from image content, or by using the four image corners. With many set of four coplanar points that form the quadrilateral area to select, a searching for the embedding area is time consuming. In this paper, based on the same principle as in [5], the algorithm for calculating embedding locations is modified to improve computational efficiency. While the method in [5] makes heavy use of line intersections in obtaining the points, the method proposed here calculates embedding points mainly from the cross-ratio relationship of four collinear points. It is shown analytically and experimentally that the proposed modified method is more computationally efficient than the original algorithm.

This paper is organized as follow: In section 2, a theory of four collinear points and its invariance against projective transform is briefly describe. In Section 3, the method in [5] was briefly discussed and its computational complexity is also analyzed. In Section 4, detail of the proposed algorithm and analysis of its computational complexity are described. Section 5 reports some of experimental results. Conclusion is given in Section 6.

2. Invariance theory of four collinear points

It is a standard result [6] that the cross ratio of four collinear points does not change under a projective transform. The method to be described is based on this principle. This section briefly introduces the principle.



Figure 1: Four Collinear Points

From Fig. 1, A, B, C, D are four points that lie on a straight line. These points are said to be collinear. The cross ratio relationship of these four points can be computed from

$$Cr(A, B, C, D) = \frac{\overline{CA} \cdot \overline{DB}}{\overline{CB} \cdot \overline{DA}} \quad (1)$$

where \overline{CA} etc. is the Euclidean distance of segment CA. The cross ratio is preserved through a projective projection and also linear scaling, rotation and translation. Therefore, it is invariant against projective, as well as affine transforms.

3. Line-intersection oriented projective-invariant watermarking method

In [5], a digital image watermarking method which is invariant to a projective transform was proposed. Given four coplanar points on the image, the method uses a combination of a cross-ratio relationship of four collinear points, and an intersection of a line pair to obtain watermark embedding points. The points as obtained are the same for both the original and the projective-distorted image. Because the method makes heavy use of line intersections in calculating the embedding points, here it is referred to as the line-intersection oriented method to differentiate it from the proposed cross-ratio oriented method to be described later.

A brief summary of the method in [5] is described below.

3.1. Watermark embedding algorithm

1. Define a set of cross-ratio values to be used for subsequent steps.
2. Based on the given four coplanar feature points p_i^f , $i = 1, \dots, 4$, (which can be either four image corners as in Fig. 2 or the image features extracted from its content), compute the intersection point of two diagonal lines constructed from these four points. Denote the intersection point as p_c .
3. Compute the location of primary-level watermark embedding point, $P_{tl}, P_{tr}, P_{bl}, P_{br}$, that are located along the diagonal lines. They are computed by applying Eq. (1), using two coplanar feature points and p_c (see Fig. 2

(a)). For example, in Fig. 2 (a), points P_{tl} and P_{br} are obtained by using p_1^f, p_2^f and p_c .

4. Compute the watermark embedding points in the left triangle area of the image by first constructing lines connecting each point in P_{tl} with p_4^f . Then, construct lines connecting each point in P_{br} with p_1^f . Watermark embedding points are computed as intersections between these lines (see Fig. 2 (b)).
5. Repeat Step 4 to obtain embedding points in the right, top and bottom triangle areas.
6. Embed a watermark pattern on these watermark embedding points obtained from Steps 4-5. Assume that the spread spectrum-based algorithm is applied. Let $p_i^f, i = 1, \dots, N$, be N watermark embedding points. Given a watermarking pattern $w_i \in \{-1, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, watermark embedded image is obtained by using the following equation [7]

$$I_c(x_i, y_i) = I(x_i, y_i) + (\alpha \cdot w_i) \quad (2)$$

where $I(x_i, y_i)$ is the original image, (x_i, y_i) is the coordinate of p_i^f , and α is the modulation factor.

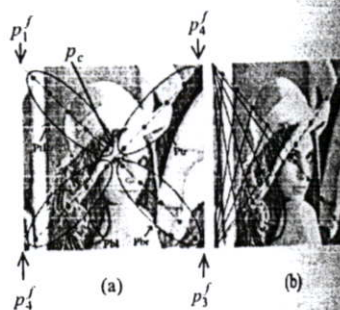


Figure 2: (a) Sets of primary-level watermark embedding points (b) Line intersection points used for embedding a watermark.

3.2 Watermark detecting scheme

To detect the watermark from the possibly distorted image I_c , the watermark embedding locations must first be recovered. Those points are obtained by repeating Steps 1-5 of the embedding algorithm. By using a correlator as a detector, detection is performed by computing the following correlation coefficient.

$$C(I_c, w) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{I}_c(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i) \cdot \tilde{w}(i))}{\sigma_{I_c} \cdot \sigma_w} \quad (3)$$

where $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ are watermark embedding points extracted from I_c . σ_{I_c} is the standard deviation of $I_c(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$, and σ_w is the standard deviation of the watermark pattern. $\tilde{I}_c(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ and $\tilde{w}(i)$ are the zero-mean version of $I_c(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ and $w(i)$, respectively. Watermark is detected if the above correlation value is above the predefined threshold. The threshold may be defined, for example, by using certain statistical criteria [7].

3.3 The algorithm complexity

The embedding point calculation part of the method as described in Section 3.2 can be divided into two stages. The first stage is to find the primary-level points on the two diagonal lines by using the cross-ratio relationship of collinear points (Steps 2-3 of Section 3.1). The second stage is to find the watermark embedding points by solving for line intersection points (Steps 4-5). Let N and \sqrt{N} be the numbers of total embedding points and primary-level embedding points on each diagonal line, respectively. Complexity of the method, measured in terms of the number of sequential arithmetic operations, is analyzed below.

First, there are two steps in the first stage. The first step is to find the intersection point of two diagonal lines. The two lines are described by the linear equation $ax+by=1$. The parameters a and b can be obtained by solving the two linear equation ($a_1+by_1=1$, $ax_2+by_2=1$ where (x_1, y_1) and (x_2, y_2) are the coordinate of two of the four coplanar points). This step requires 21 arithmetic operations. The second step is to find primary-level watermark embedding locations. This step uses a combination of two coplanar points and p_c . Let two coplanar points be denoted as A and D, the primary-level watermark embedding point is denoted as B and p_c is denoted as

C (see Fig 1). Let r_1 be the Euclidean distance of line section AB, r_2 be the distance of BD, w_1 be the distance of AC, and w_2 be the distance of CD. The coordinate of the point B can be calculated from

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} + \alpha \cdot \begin{bmatrix} x_D - x_A \\ y_D - y_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

where $\alpha = \frac{(r_1/r_2)}{1+(r_1/r_2)}$, (x_A, y_A) is a coordinate of A

and (x_B, y_B) is a coordinate of B.

According to the cross-ratio theory as described in section 2,

$$\frac{r_1}{r_2} = Cr \cdot \frac{w_1}{w_2} \quad (5)$$

where Cr is the pre-define cross-ratio value for each primary-level watermark embedding point.

From Eq. (4) and Eq. (5), the complexity in finding \sqrt{N} points for each of the two diagonal lines is $14\sqrt{N} + o(\sqrt{N})$.

The second stage of this algorithm is to find the watermark embedding points. There are $4\sqrt{N}$ lines and N intersection points to find. Therefore, this stage of the algorithm requires $7N + 28\sqrt{N}$ arithmetic operations.

By combining the complexity of the two stages, the line-intersection oriented method requires $7N + 42\sqrt{N} + o(\sqrt{N})$ arithmetic operations in calculating watermark embedding locations.

4. Cross-ratio oriented projective-invariant watermarking method

Although the watermark algorithm as described in section 3 can be applied to projective distorted images, the computational complexity for this algorithm can still be improved by heavy use of the cross-ratio principle in calculating watermark embedding locations. The proposed cross-ratio oriented algorithm is described below.

4.1. Watermark embedding algorithm

1. Define a set of cross-ratio values to be used in subsequent steps. To reduce computational complexity of subsequent steps, values of α

and $\frac{w_1}{w_2}$ (see Eqs. 4-5) for each selected

- cross-ratio are pre-computed.
2. Find the intersection point of two diagonal lines as in Step 2 of Section 3.1.
 3. Calculate the primary-level watermark embedding points as in Step 3 of Section 3.1.
 4. Finding the watermark embedding location for left triangle area of the image. By use the $p_1^f, p_4^f, P_{il}(i)$ and $P_r(i)$ as secondary-level four coplanar feature points. The watermark embedding points are then obtained by repeating Step 2-3 (See Fig 3.). The pre-define cross-ratios may be chosen on a line-by-line basis, if needed.
 5. Repeat Step 4 to find watermark embedding points for the right, top and bottom triangle areas.
 6. Embed the watermark pattern on those points that obtained from Steps 4-5.



Figure 3: Watermark embedding locations, constructed from primary-level embedding locations.

4.2. Watermark detecting algorithm

At the detection stage, the watermark embedding locations are obtained by repeating Steps 1-5 for the embedding algorithm in Section 4.1. Then, the correlator can be used for watermark detection as described in Section 3.2.

4.3. The algorithm complexity

Given N watermark embedding points and $\frac{\sqrt{N}}{2}$ primary-level watermark embedding points along each diagonal line. The part of the method that computes watermark embedding locations can be divided into two stages. The first stage is to find the primary-level

watermarking embedding location. The second stage is to find the watermark embedding locations.

The first stage of this method is the same as the first stage of the line-intersection oriented method. However, by using the pre-computed α and $\frac{w_1}{w_2}$, the overall complexity is reduced to $4\sqrt{N} + o(\sqrt{N})$ arithmetic operations.

In the second stage, there are $2\sqrt{N}$ lines, and \sqrt{N} intersection points to find. With two ends of each line in addition to an intersection point on that line, a cross-ratio principle is applied to obtain the watermark embedding points along that line. There are $\frac{\sqrt{N}}{2}$ watermark embedding points for each line. This stage thus requires $4N + 51\sqrt{N}$ arithmetic operations.

By combining the complexity of the two stages above, the proposed method requires $4N + 55\sqrt{N} + o(\sqrt{N})$ arithmetic operations.

5. Experimental result

Experiment was performed to evaluate the performance of the proposed method. Six grayscale images of size 512×512 pixels were used in the experiment. The four image corner points were selected as the four coplanar points. A watermark of length $N = 1,600$ was embedded over a whole image area.

First, the two watermarking methods were compared in terms of computational complexity. Based on the analysis result of Section 4, the graph that compares the computational complexity of both methods is shown in Fig. 4. The X axis is the number of watermark embedding points and the Y axis is the arithmetic operations, it is shown that the cross-ratio oriented projective-invariant watermarking method always has less complexity than line intersection oriented projective-invariant watermarking method.

Next, all test images were embedded with 20 different watermark patterns, each of length $N = 1,600$ by the proposed method. A fixed $\alpha = 3$ was chosen. To reduce synchronization problem due to local distortion, each watermark bit was embedded over an image area of size 3×3 . The watermarked images were distorted by planar projection in the manners as shown in Fig. 4, with angle of rotation changing from 1° to 20° . By using the detection threshold of 3, the overall

false positive detection rate was 0.16 %, while the overall false negative rate was 1.2 % (see Table 1). Percentages of correct detection for each projection direction are also provided Table 1. Result for the case of Fig. 5(b) is similar to the case of Fig. 5(a), and was omitted. In all cases, correct detection rate is above 98.80 %. Because the performance of the proposed method in terms of detection complexity is comparable to that of [5], the result for the method in [5] is omitted.

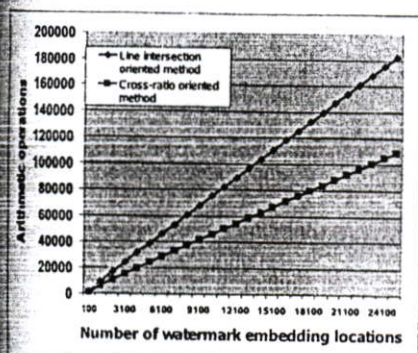


Figure 4: The comparative of the complexity of both methods in Section 4

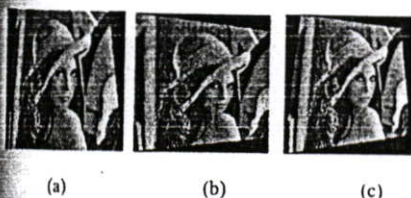


Figure 5: (a) Horizontally rotated image, (b) Vertically rotated image, (c) Image rotated about both axes

6. Conclusion

In this paper, an efficient algorithm for calculating projective-invariant watermarking embedding locations has been described. The method is based on the same cross-ratio principle of [5]. Unlike the method in [5], where calculating of embedding locations makes heavy use of line intersections, the proposed method makes more use of the cross-ratio principle. It has been shown analytically and experimentally that the proposed algorithm offers noticeable reduction in

computational complexity, as compared with the original algorithm. Performance of both methods, however, has been shown to be comparable.

Images	Vertical (a)	Both (c)	Total	False Positive	False Negative
Lena	99.3 %	98.9 %	98.9 %	0.15 %	0.9 %
Pepper	98.7 %	98.5 %	98.6 %	0.20 %	1.4 %
Baboon	98.4 %	98.7 %	98.5 %	0.18 %	1.5 %
Cameraman	99.5 %	99.2 %	99.3 %	0.16 %	0.7 %
Plane	99.5 %	99.1 %	99.3 %	0.12 %	0.7 %
Boat	98.4 %	98.6 %	98.5 %	0.14 %	1.5 %
Total	98.9 %	98.8 %	98.8 %	0.16 %	1.2 %

Table 1: Watermark detection result for the first experiment

7. Reference

- [1] Masoud Alghoniemy and Ahmed H. Tewfik, "Geometric Distortion Correction through image normalization," in *Proc. International Conference on Multimedia and Expo*, 2000.
- [2] J. J. K. Ó Ruanaidh and T. Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," *Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp.303-317, May 1998.
- [3] Shelby Pereira and Thierry Pun, "Robust Template Matching for Affine Resistant Image Watermarks", *IEEE Transactions on Image Processing*, pp.1123-1129, 2000.
- [4] P. Bas, J-M. Chassery and B. Macq, "Geometrically Invariant Watermarking Using Feature Points," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 9, pp. 1014-1028, 2002
- [5] Nopporn Chotikakamthorn and Wiyada Yawai, "Digital Watermarking Technique for Perspective Image", in *Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2004*, 2004.
- [6] R. Mohr and L. Morin, "Relative Positioning from Geometric Invariants," *Proc. of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 139-144, 1991.
- [7] I. J. Cox, M. L. Miller, and J. A. Bloom, *Digital Watermarking*, Morgan Kaufmann Publishers, 2002.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายณัฐพล พันธุวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2524
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม สารสนเทศ (เกียรตินิยมอันดับ 1)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2546
ประสบการณ์การทำงาน	พฤษภาคม 2548 – กุมภาพันธ์ 2549 ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย ประจำห้อง Multimedia and Virtual Research Lab. สำนักวิจัยการสื่อสาร และเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง