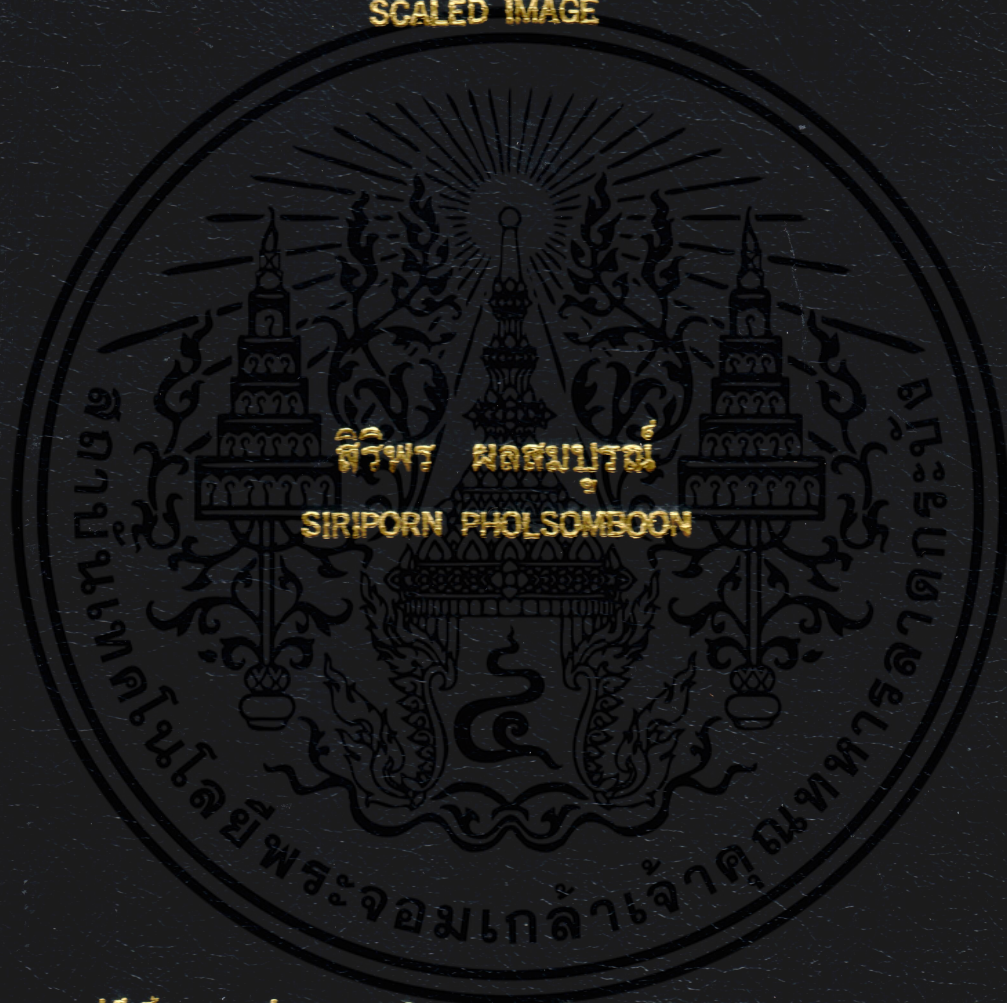


เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการ  
การหมุนและการปรับขนาด

DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR ROTATED AND  
SCALED IMAGE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-046-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการหมุนและการ  
ปรับขนาด

DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR ROTATED AND  
SCALED IMAGE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

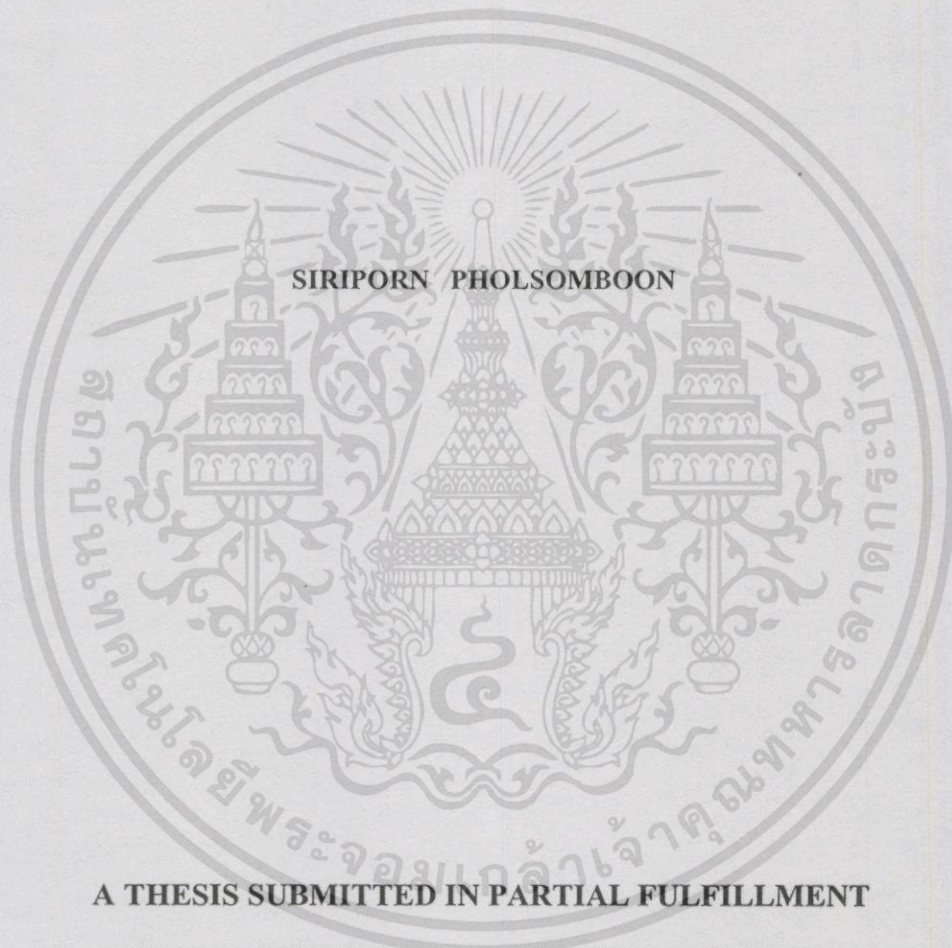
ISBN 974-648-046-4

เลขหมู่.....  
 เลขทะเบียน 39327  
 วัน, เดือน, ปี 24 ส.ค. 2544

.b.....

สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรณีใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR ROTATED AND  
SCALED IMAGE**



**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**

**2001**

**ISBN 974-648-046-4**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการหมุนและ  
การปรับขนาด

DIGITAL WATERMARKING TECHNIQUE FOR ROTATED AND  
SCALED IMAGE

ชื่อนักศึกษา ร.ต.หญิง สิริพร ผลสมบูรณ์

รหัสประจำตัว 40067018

ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีสารสนเทศ

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.นพพร โชติกคำธร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.นพพร	โชติกคำธร	
ผศ.ดร.สุรพันธ์	เอื้อไพบูรณ์	
รศ.ดร.วิเชียร	เปรมชัยสวัสดิ์	
ผศ.ดร.บุญธีร์	เกรือตราฐู	
ดร.วรพจน์	กวีสุระเดช	

วัน/เดือน/ปี 20 ธันวาคม 2543 เวลา 13.30 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ห้อง LAB 316 ชั้น 3 อาคารสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์



วันที่ ๒๑ เดือน ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๔๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการหมุนและการปรับขนาด
นักศึกษา	ว่าที่ร้อยตรีหญิง สิริพร ผลสมบูรณ์
รหัสประจำตัว	40067018
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศ
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.นพพร โชติภักดิ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพซึ่งใช้หลักการ Spread spectrum ที่กระทำในโดเมนรูปภาพ โดยอาศัยคุณสมบัติเฉพาะของฟังก์ชัน Cosine และ Complex exponential ซึ่งมีความทนทานต่อกระบวนการหมุนและกระบวนการปรับขนาด ตลอดจนการแปลงเชิงเส้นแบบต่างๆ โดยที่กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลสามารถกระทำได้โดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับใดๆ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแนวทางในการสร้างลายน้ำดิจิทัลในทางปฏิบัติ รวมทั้งการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมของรูปภาพที่จะซ่อนลายน้ำดิจิทัล ตลอดจนได้ทำการทดลองต่อกระบวนการแปลงเชิงเส้นแบบต่างๆ อันได้แก่กระบวนการหมุน การปรับขนาด และกระบวนการแปลงอื่นๆกับรูปภาพดิจิทัล โดยได้ใช้รูปภาพในการทดลองทั้งหมด 10 ภาพ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอนี้สามารถตรวจพบได้อย่างถูกต้อง โดยในกระบวนการหมุนสามารถถูกตรวจพบได้ถูกต้องทุกมุม และในกระบวนการปรับขนาดสามารถถูกตรวจพบได้ตั้งแต่ที่ระดับ 95% ไปจนถึง 105% ของขนาดเดิมของรูปภาพ

<b>Thesis Title</b>	Digital Watermarking Technique for Rotated and Scaled Image
<b>Student</b>	ACTING SUB. LT. Siriporn Pholsomboon
<b>Student ID.</b>	40067018
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Information Technology
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Nopporn Chotikakamthorn

### ABSTRACT

In this thesis we propose a digital image watermarking technique by using the pixel domain spread spectrum technique and the property of cosine and complex exponential function which is robust against common image transformations, particularly rotation and scaling. It is shown mathematically that the proposed watermark can be detectable in the presence of such transformations without the use of inverse operations. This thesis also describes a method for constructing and detecting the watermark in practice. Algorithm for determining of a suitable embedding location is also provided. Experiments with rotation, scaling and other common linear transformations using 10 sample digital images has been performed. The results show that the embedded watermark can be successfully detected. The watermark was detected at all angles of rotation and also at 95% to 105% of scaling factors.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยรับคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการประมวลผลรูปภาพดิจิทัลและหลักการซ่อนข้อมูลต่างๆจากคร. นพพร โชติกกำธร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนั้นผู้วิจัยขอขอบคุณและเอ่ยนามถึงบุคคลต่างๆที่ได้มีส่วนร่วมช่วยในการสร้างงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้นมาจนสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีสารสนเทศเป็นอย่างสูงที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้ข้อคิดแนวทาง ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาค้นสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ในการอำนวยความสะดวกต่างๆในการทำงานตั้งแต่ต้น รวมถึงพี่ๆเพื่อนๆนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขทฤษฎีและอื่นๆที่ผิดพลาดจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

อนึ่ง งานวิจัยที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ส่วนหนึ่งกระทำภายใต้ห้องปฏิบัติการ Multimedia and Virtual Research Laboratory ของสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคุณจันทร์พร พิศาลบุตร ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สิริพร ผลสมบูรณ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 การประมวลผลรูปภาพดิจิทัล.....	5
2.1 รูปภาพดิจิทัล (Digital image).....	5
2.2 การประมวลผลรูปภาพดิจิทัล (Digital image processing).....	6
2.2.1 การประมวลผลจุด (Point processing).....	6
2.2.1.1 การปรับความสว่างของรูปภาพ (Brightness adjustment).....	6
2.2.1.2 การปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ (Contrasting adjustment) .....	7
2.2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformation).....	7
2.2.2.1 การเคลื่อนย้ายรูปภาพ (Translation) .....	7
2.2.2.2 การปรับขนาดของรูปภาพ (Scaling) .....	7
2.2.2.3 การหมุนรูปภาพ (Rotation) .....	8
2.2.3 การปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพ (Image enhancement).....	8

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3.1 การปรับภาพให้นุ่มนวล (Smooth filtering) .....	8
2.2.3.2 การปรับภาพให้คมชัดขึ้น (Sharpening filtering) .....	8
2.2.4 การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression) .....	9
บทที่ 3 ลายน้ำดิจิทัล.....	11
3.1 หลักการซ่อนข้อมูลและลายน้ำดิจิทัล.....	11
3.1.1 หลักการซ่อนข้อมูล.....	11
3.1.2 ลายน้ำดิจิทัล.....	12
3.1.3 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล.....	13
3.1.4 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล.....	13
3.2 เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพที่ใช้ในปัจจุบัน.....	15
3.2.1 Least significant bit replacement.....	15
3.2.2 Patchwork.....	15
3.2.3 Texture block coding.....	16
3.2.4 Spread spectrum watermarking.....	16
3.3 เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพที่ไม่ผันแปรตามกระบวนการหมุน, การปรับขนาด และการเคลื่อนย้าย (RST invariant spread spectrum digital watermarking technique) .....	17
3.4 ปัญหาของลายน้ำดิจิทัล.....	19
3.4.1 ความไม่คงทนต่อกระบวนการประมวลผลรูปภาพของลายน้ำดิจิทัล...	19
3.4.2 แนวทางในการทำลายลายน้ำดิจิทัล.....	21
3.4.2.1 Jitter attack.....	21
3.4.2.2 Mosaic attack.....	21
3.4.2.3 Invalidating claims of ownership.....	22
3.4.3 แนวทางการป้องกันและการพิสูจน์ความถูกต้อง.....	23
3.4.3.1 การกำหนดโปรโตคอลของการซ่อนลายน้ำดิจิทัล.....	23
3.4.3.2 การกำหนดทิศทางการซ่อนลายน้ำดิจิทัล.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3.3 การกำหนดโครงร่างของลายน้ำดิจิทัลแบบไม่สามารถผันกลับ ได้.....	23
<b>บทที่ 4 เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลในโดเมนรูปภาพสำหรับภาพที่ผ่านกระบวนการ หมุนและการปรับขนาด.....</b>	<b>25</b>
4.1 ลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการหมุน.....	25
4.2 ลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการปรับขนาด.....	27
4.3 การสร้างลายน้ำดิจิทัลในทางปฏิบัติ.....	28
4.4 การซ่อนและการตรวจสอบพิสูจน์ลายน้ำดิจิทัล.....	30
4.4.1 การพิจารณาเลือกความเข้มของลายน้ำดิจิทัลที่จะทำการซ่อน.....	30
4.4.2 การพิจารณาเลือกตำแหน่งของรูปภาพที่จะทำการซ่อน.....	33
4.4.3 การตรวจหาลายน้ำดิจิทัลเพื่อพิสูจน์ความเป็นเจ้าของ.....	34
4.5 การตรวจสอบการปลอมแปลงรูปภาพโดยใช้ลายน้ำดิจิทัล.....	35
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง.....</b>	<b>37</b>
5.1 การทดสอบการซ่อนลายน้ำดิจิทัลและการตรวจหา.....	37
5.2 การทดสอบความทนทานต่อการหมุนของรูปภาพ.....	38
5.3 การทดสอบความทนทานต่อการปรับขนาดของรูปภาพ.....	40
5.4 การทดสอบความทนทานต่อการหมุนและการปรับขนาดของรูปภาพ.....	41
5.5 การทดสอบความทนทานต่อการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG.....	42
5.6 การทดสอบความทนทานต่อการปรับความสว่าง.....	43
5.7 การทดสอบความทนทานต่อการปรับการตัดกันของสี.....	44
5.8 การทดสอบความทนทานต่อการปรับคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์.....	44
5.9 การทดสอบความทนทานต่อสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพ.....	45
5.10 การทดสอบความทนทานภายหลังการพิมพ์และการสแกนรูปภาพ.....	46
5.11 การทดสอบความทนทานต่อการตัดรูปภาพ.....	47
5.11.1 การวางลายน้ำดิจิทัลโดยกำหนดลายน้ำดิจิทัลให้มีขนาดพอดีกับภาพ.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.11.2 การวางลายนํ้าดิจิตอลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วทั้ง ภาพ.....	48
5.11.3 การวางลายนํ้าดิจิตอลต่อเนื่องกัน โดยมีการซ้อนกัน.....	49
5.12 การตรวจสอบการถูกแก้ไขของรูปภาพ.....	49
5.12.1 การวางลายนํ้าดิจิตอลโดยกำหนดลายนํ้าดิจิตอลให้มีขนาดพอดีกับรูป ภาพ.....	50
5.12.2 การวางลายนํ้าดิจิตอลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วทั้ง ภาพ.....	50
5.12.3 การวางลายนํ้าดิจิตอลต่อเนื่องกัน โดยมีการซ้อนกัน.....	51
5.13 การทดสอบต่อรูปภาพอื่นๆ.....	52
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
6.2 บทวิเคราะห์.....	58
6.3 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก. รูปภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	63
ภาคผนวก ข. บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	80

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ความคงทนของลายน้ำดิจิทัลแต่ละวิธีเมื่อรูปภาพผ่านการประมวลผลแบบต่างๆ.....	21
5.1	ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลในรูปภาพต่างๆ.....	52
5.2	ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลในรูปภาพต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการพิมพ์และการสแกนรูปภาพ.....	56



# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการแปลงภาพจากธรรมชาติ (Continuous image) เป็นตัวเลข (Digital image) .....	5
2.2	ลำดับการเข้ารหัสในลักษณะฟีนปลาของขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG โดยใช้ AC Huffman coding.....	10
3.1	รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล.....	13
3.2	รูปแบบของกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล.....	14
3.3	โครงร่างของการซ่อนลายน้ำดิจิทัลและการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลด้วยเทคนิคที่ไม่แปรผันตามการหมุน, การปรับขนาด และการเคลื่อนที่.....	20
3.4	วิธีการสร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ก่อนแล้ว.....	22
3.5	วิธีการซ่อนลายน้ำดิจิทัลซ่อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่ก่อนแล้ว.....	22
4.1	แพดเทิร์นสมมาตรซึ่งใช้แก้ปัญหาในกระบวนการหมุนของรูปภาพ.....	25
4.2	แพดเทิร์นปรับปรุงเพื่อใช้แก้ปัญหการปรับขนาดของรูปภาพ.....	27
4.3	รูปแบบของการวางลายน้ำดิจิทัลแบบต่างๆเพื่อใช้ในการตรวจสอบการปลอมแปลงรูปภาพ.....	35
5.1	รูปภาพต้นฉบับ "Lenna" ก่อนและหลังการถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัล.....	37
5.2	ผลลัพธ์จากการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัลดังกล่าวกับแพดเทิร์นต้นแบบ.....	38
5.3	ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองหมุนรูปภาพตั้งแต่ 0 จนถึง 355 องศา.....	39
5.4	ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองนำรูปภาพมาหมุนซ้ำ ตั้งแต่ 0 จนถึง 355 องศา....	39
5.5	ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองปรับขนาดรูปภาพตั้งแต่ 80% จนถึง 120%.....	40
5.6	ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองหมุนรูปภาพตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศาพร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% จนถึง 120% ที่ทุกมุมของการทดลอง....	41
5.7	ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองบีบอัดรูปภาพด้วยคุณภาพที่ระดับต่างๆ.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองปรับความสว่างตั้งแต่ -50% จนถึง 50%.....	43
5.9 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองปรับการตัดกันของสีตั้งแต่ -50% จนถึง 50%.....	44
5.10 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองปรับคุณภาพของรูปภาพให้มัวและคมชัดขึ้น โดยใช้ฟิลเตอร์ที่ขนาดต่างๆ.....	45
5.11 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพตั้งแต่ 10% ไปจนถึง 50%.....	45
5.12 รูปภาพ “Lenna” ภายหลังจากที่ถูกพิมพ์และถูกสแกนกลับเข้ามา.....	46
5.13 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการพิมพ์และสแกนรูปภาพกลับมา...	46
5.14 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการพิมพ์และสแกนรูปภาพกลับเข้ามา โดยมีการจัดวางให้รูปภาพเฉียงทำมุมที่องศาต่างๆ.....	47
5.15 รูปภาพ “Lenna” ที่ถูกตัดให้เหลือขนาด 384×384 พิกเซล, 256×256 พิกเซล และ 128×128 พิกเซล.....	48
5.16 ค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพ ณ ตำแหน่งต่างๆของรูปภาพที่มีการจัดวางลายน้ำดิจิทัลอย่างต่อเนื่องภายหลังจากที่รูปภาพตัดเอาบางส่วนทิ้งไป.....	49
5.17 รูปภาพ “Lenna” ที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัลโดยการกำหนดลายน้ำดิจิทัลให้มีขนาดพอดีกับรูปภาพก่อนและหลังการปลอมแปลง.....	50
5.18 ค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ก่อนและหลังการปลอมแปลง.....	51
5.19 ค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ก่อนและหลังการปลอมแปลง.....	51
5.20 ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่มุมที่ 0 ไปจนถึง 355 องศา.....	53
5.21 ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆซ้ำ ตั้งแต่มุมที่ 0 ไปจนถึง 355 องศา.....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.22	ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยจากการทดลองปรับขนาดรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%.....	54
5.23	ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 355 องศาพร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%.....	54
5.24	ค่าสหสัมพันธ์สูงสุดจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 355 องศาพร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%.....	55
5.25	ค่าสหสัมพันธ์ต่ำสุดจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 355 องศาพร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%.....	55
ก.1	รูปภาพ “Baboon”.....	63
ก.2	รูปภาพ “Building”.....	63
ก.3	รูปภาพ “Camera man”.....	64
ก.4	รูปภาพ “Flowers”.....	64
ก.5	รูปภาพ “Gene”.....	65
ก.6	รูปภาพ “Honda racing”.....	65
ก.7	รูปภาพ “Kids”.....	66
ก.8	รูปภาพ “Kiss”.....	66
ก.9	รูปภาพ “Lenna”.....	67
ก.10	รูปภาพ “Trees”.....	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางการสื่อสารมีการพัฒนาเพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่กระจายของสื่อดิจิทัล รูปแบบต่างๆ ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีข้อดีคือสะดวกรวดเร็วและไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก แต่ข้อเสียที่ตามมาคือ สื่อดิจิทัลเหล่านั้นอาจถูกละเมิดลิขสิทธิ์ได้โดยง่าย ทำให้ปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนาวิธีการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ในสื่อเหล่านั้น หนึ่งในวิธีการเหล่านั้นอาศัยการซ่อนข้อมูลบางอย่างลงในสื่อที่เรียกว่าลายน้ำดิจิทัล (Digital watermark) อันเป็นรูปแบบหนึ่งของการซ่อนข้อมูล ซึ่งมักนิยมใช้กับรูปภาพเพื่อแสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ และด้วยจุดประสงค์ดังกล่าวนี้ลายน้ำดิจิทัลที่ใช้จำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือมีความคงทนสูงต่อกระบวนการแปลงต่างๆ ที่กระทำกับตัวสื่อ อันจะส่งผลให้ลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่นั้นถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขไปด้วย ทั้งโดยเจตนาและไม่เจตนา

กระบวนการหมุน (Rotation) และการปรับขนาด (Scaling) เป็นสองกระบวนการซึ่งมักเกิดขึ้นกับรูปภาพทั่วไป ซึ่งกระบวนการทั้งสองดังกล่าวในทางปฏิบัติอาจเกิดได้ทั้งจากกระบวนการในการสแกนภาพที่พิมพ์บนกระดาษเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ หรืออาจเกิดจากการคัดแปลงแก้ไขภาพโดยตรงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ถึงแม้ว่ากระบวนการทั้งสองดังกล่าวจะจัดเป็นการแปลงเชิงเส้นพื้นฐาน แต่เทคนิคลายน้ำดิจิทัลส่วนใหญ่ในปัจจุบันไม่สามารถใช้ในการตรวจสอบพิสูจน์ลายน้ำในรูปภาพที่ผ่านกระบวนการแปลงดังกล่าวได้โดยตรง โดยส่วนใหญ่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับ (Inverse operation) ทำให้เพิ่มความยุ่งยากและซับซ้อนในขั้นตอนการตรวจหาลายน้ำ ปัญหาดังกล่าวจะทวีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นหากรูปภาพนั้นผ่านกระบวนการแปลงมากกว่า 1 อย่าง นอกจากนี้แล้ว ในบางวิธีการยังจำเป็นจะต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาอีกด้วย ซึ่งจะทำให้เพิ่มความซับซ้อนมากขึ้นไปอีก เนื่องจากจะต้องมีการค้นหารูปภาพต้นฉบับจากฐานข้อมูล โดยเฉพาะในกรณีที่มีรูปภาพอยู่เป็นจำนวนมาก และยังเป็นการสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บอีกด้วย

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อศึกษาและพัฒนาลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพซึ่งมีคุณสมบัติในด้านความคงทนต่อกระบวนการหมุนที่มุมใดๆ และการปรับขนาดในช่วงแคบๆ (ประมาณ  $\pm 5\%$ ) ซึ่งกรณีดังกล่าวอาจเกิดจากการพิมพ์และการสแกนรูปภาพเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ ตลอดจนกระบวนการแปลงแบบอื่นๆ ที่กระทำกับรูปภาพอันมีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ เพื่อใช้พิสูจน์ลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ (Ownership identification) และตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขบนตัวสื่อ (Media authentication) โดยในวิทยานิพนธ์นี้เราจะพิจารณาเฉพาะสื่อรูปภาพเท่านั้น โดยพิจารณาวิธีการที่ไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับหรือต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจสอบ

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

การซ่อนข้อมูลลงในสื่อดิจิทัลเพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทางนั้นมีหลักการคล้ายคลึงกับการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยซึ่งมีการเข้ารหัสข้อมูลก่อนส่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเทคนิคการมอดูเลชันในระบบสื่อสารที่มีชื่อว่า Spread spectrum ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนต่างๆมาใช้ โดยการพิจารณารูปภาพที่ต้องการซ่อนเสมือนเป็นช่องสัญญาณที่สามารถจะทำการส่งได้ ในขณะที่มองลายน้ำดิจิทัลเสมือนเป็นสัญญาณที่จะทำการส่ง โดยการใช้เทคนิคดังกล่าวจะเป็นผลให้ลายน้ำดิจิทัลมีความคงทนต่อกระบวนการแปลงต่างๆที่กระทำกับรูปภาพซึ่งเปรียบได้กับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสาร

### 1.4 สมมติฐานของการศึกษา

ในการสร้างแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิทัลที่จะซ่อนลงในรูปภาพนั้น เพื่อให้แพตเทิร์นมีความคงทนต่อการหมุน แพตเทิร์นที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นวงแหวน ซึ่งจะเป็นผลให้ลายน้ำดิจิทัลจะยังคงมีลักษณะเดิมอยู่เสมอไม่ว่ารูปภาพที่เป็นสื่อจะถูกหมุนไปด้วยมุมใดๆก็ตาม โดยที่ภายในแพตเทิร์นดังกล่าวนี้จะประกอบไปด้วยวงกลมย่อยๆซ้อนกันในลักษณะวงแหวนแทนข้อมูลแต่ละตัวที่จะทำการซ่อน

สำหรับในกรณีของการปรับขนาดนั้น กระทำได้โดยการกำหนดขนาดของวงแหวนแต่ละวงของแพตเทิร์นที่ถูกซ่อนอยู่ในรูปภาพให้มีขนาดใหญ่กว่าแพตเทิร์นที่จะใช้ในการตรวจหาเล็กน้อย ซึ่งจะเป็นผลให้ลายน้ำดิจิทัลจะสามารถตรวจพบได้ภายหลังที่รูปภาพถูกปรับขนาดไปในช่วงแคบๆ (ประมาณ  $\pm 5\%$ ) ซึ่งจะทำให้ลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้โดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับแต่อย่างใด

### 1.5 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาลายน้ำดิจิทัลสำหรับซ่อนลงในสื่อประเภทรูปภาพเพื่อใช้พิสูจน์สิทธิความเป็นเจ้าของและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแก้ไขต่างๆบนตัวสื่อซึ่งรูปภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะป็นรูปภาพดิจิทัลที่ได้มาจากการถ่ายด้วยกล้องทั่วไปแล้วสแกนเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ โดยที่ลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะมีคุณสมบัติในด้านความทน

ทานต่อกระบวนการหมุนที่มุมใดๆ และกระบวนการปรับขนาดในช่วง  $\pm 5\%$  (ประมาณ 95% ถึง 105%) ตลอดจนกระบวนการแปลงทั่วไป เช่นการปรับความสว่าง (Brightness adjustment), การปรับการตัดกันของสี (Contrast adjustment), การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression), รวมทั้งการพิมพ์และการสแกนกลับ โดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับหรือต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลแต่อย่างใด

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ เป้าหมาย จุดประสงค์ และขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย
3. ศึกษาเทคนิคต่างๆที่มีอยู่ถึงแนวคิด หลักการ ข้อดี และข้อบกพร่องของแต่ละเทคนิค
4. ศึกษากระบวนการแปลงที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่การหมุนและการปรับขนาดของรูปภาพ กับแต่ละเทคนิค
5. พัฒนาวิธีการทำลายน้ำดิจิทัลซึ่งสามารถซ่อนข้อมูลได้ภายใต้กระบวนการข้างต้น
6. ทำการทดลอง ปรับปรุง และสรุปผล
7. จัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์

## 1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 1 จะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่ความเป็นมา จุดเริ่มต้นของปัญหา และความสำคัญของมัน ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษา โดยได้ระบุถึงหลักการหรือทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้ภายใต้สมมติฐานที่เรากำหนด โดยมีจุดมุ่งหมาย ขอบเขต และขั้นตอนในการศึกษาระบุไว้อย่างชัดเจน

สำหรับบทที่ 2 จะเป็นบทที่กล่าวถึงหลักการประมวลผลรูปภาพดิจิทัล (Digital image processing) ตั้งแต่โครงสร้างพื้นฐาน ไปจนถึงความหมายและสมการของการประมวลผลรูปภาพในลักษณะต่างๆ

บทที่ 3 เป็นบทที่อธิบายถึงความหมายและหลักการทั่วไปของการซ่อนข้อมูลและลายน้ำดิจิทัล ขั้นตอนของกระบวนการซ่อนและตรวจหาลายน้ำดิจิทัล, เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลรูปแบบต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งปัญหาต่างๆที่ส่งผลต่อความไม่คงทนของลายน้ำดิจิทัล ตลอดจนแนวทางป้องกันการพิสูจน์ความถูกต้องของกรณีเหล่านั้น

ส่วนของการพัฒนาจะกล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยในบทนี้ได้อธิบายถึงแนวคิด ความเป็นไปได้ และสมการต่างๆที่ใช้สำหรับการสร้างลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยในหัวข้อที่

4.1 จะกล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหาในกรณีของการหมุน และหัวข้อที่ 4.2 จะกล่าวถึงกรณีของการปรับ

ขนาด แต่เนื่องจากหลักการที่อธิบายไว้ในทั้งสองหัวข้อนั้นใช้สำหรับสร้างสัญญาณที่มีลักษณะต่อเนื่อง (Continuous) ซึ่งในทางปฏิบัติจำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงสมการให้สามารถนำไปใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำงานกับข้อมูลที่เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ดังนั้นในหัวข้อที่ 4.3 จึงได้กล่าวถึงวิธีการสร้างในทางปฏิบัติดังกล่าว โดยที่ในหัวข้อที่ 4.4 จะได้กล่าวถึงวิธีการซ่อนและการตรวจสอบพิสูจน์ลายน้ำดิจิทัลลงในรูปภาพ โดยได้พิจารณาเลือกค่าความเข้มของลายน้ำดิจิทัลที่จะทำการซ่อน และการวิเคราะห์หาตำแหน่งภายในรูปภาพที่เหมาะสมที่จะทำการซ่อน และในหัวข้อสุดท้ายคือหัวข้อที่ 4.5 จะได้กล่าวถึงการนำลายน้ำดิจิทัลไปประยุกต์เพื่อใช้ตรวจสอบการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขของรูปภาพ (Image authentication) โดยอาศัยวิธีการวางลายน้ำดิจิทัลในลักษณะต่างๆซึ่งยังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันปัญหาการคัดลอกภาพได้อีกด้วย

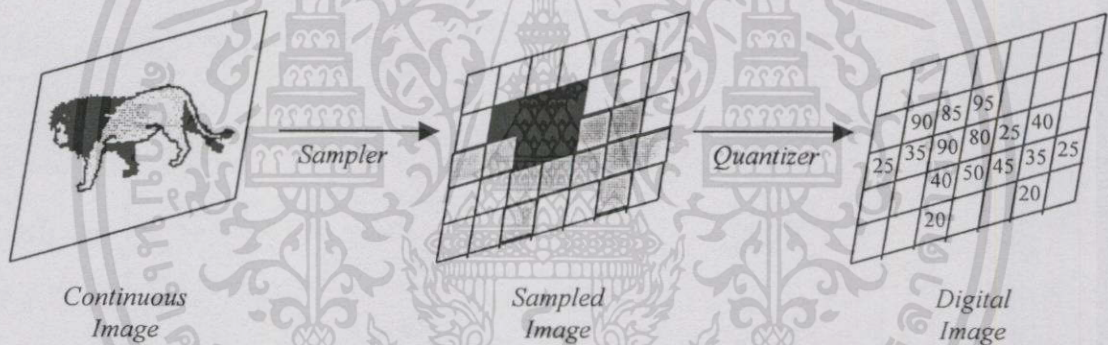
ในบทที่ 5 จะเป็นผลของการทดลองสร้างลายน้ำดิจิทัลเพื่อซ่อนลงในรูปภาพ และการทดสอบความทนทานต่อการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบต่างๆของรูปภาพ ได้แก่การหมุน, การหมุนซ้ำ, การปรับขนาด, การหมุนและการปรับขนาดไปพร้อมๆกัน, การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG, การปรับความสว่างของรูปภาพ, การปรับการตัดกันของสี, การปรับคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์, ความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของรูปภาพ, การตัดแต่งรูปภาพ ตลอดจนการทดสอบความทนทานภายหลังที่รูปภาพถูกพิมพ์และนำไปสแกนกลับเข้ามา รวมทั้งยังได้ทดสอบการนำลายน้ำดิจิทัลมาใช้เพื่อตรวจสอบว่ารูปภาพได้มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมาก่อนหรือไม่อีกด้วย

สำหรับในบทสุดท้าย คือบทที่ 6 เป็นบทสรุปถึงเนื้อหาทั้งหมดที่ได้กล่าวมา ผลในการสร้างลายน้ำดิจิทัลและการซ่อนลงในรูปภาพ ตลอดจนผลการทดลองต่างๆ

## การประมวลผลรูปภาพดิจิทัล

### 2.1 รูปภาพดิจิทัล (Digital image)

รูปภาพในธรรมชาติที่เรามองเห็น โดยทั่วไปนั้นเกิดจากการสะท้อนออกจากวัตถุของแสงอาทิตย์หรือแสงไฟมาตกกระทบเข้ามัยน์ตามนุษย์ ซึ่งเป็นภาพที่มีลักษณะต่อเนื่อง (Continuous) โดยมีองค์ประกอบต่างๆของภาพเป็นการเปลี่ยนแปลงของความสว่างและสี แต่สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งประมวลผลกับข้อมูลที่เป็นตัวเลข การที่จะนำรูปภาพในธรรมชาติเข้ามาประมวลผลในเครื่องคอมพิวเตอร์ได้นั้น จำเป็นจะต้องนำรูปภาพมาผ่านกระบวนการแปลงให้อยู่ในรูปของตัวเลข (Image digitization) เสียก่อน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือการแซมปลิง (Sampling) และการปรับในเชิงปริมาณ (Quantization) [1, 3] ดังภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการแปลงภาพจากธรรมชาติ (Continuous image) เป็นตัวเลข (Digital image)

ขั้นตอนแรกของการแปลงดังกล่าวคือการแซมปลิง โดยขั้นตอนนี้จะทำการเก็บค่าความสว่างจากตำแหน่งต่างๆที่กำหนดในรูปภาพต่อเนื่อง หลังจากนั้นค่าต่างๆเหล่านี้จะถูกนำไปแปลงให้อยู่ในรูปของตัวเลข ซึ่งเป็นขั้นตอนของการปรับในเชิงปริมาณ ค่าความสว่างของแต่ละตำแหน่งภายในภาพจะถูกพิจารณาให้อยู่ภายในขอบเขตของสี (Gray level หรือ Brightness intensity) ที่กำหนด กลายเป็นสีดำ เทา เรืองไปจนถึงขาว ซึ่งจากขั้นตอนนี้ข้อมูลที่ได้จะถูกจัดอยู่ในรูปของอาเรย์ 2 มิติ ซึ่งแต่ละตำแหน่งของอาเรย์นี้จะแทนแต่ละจุดภายในรูปภาพดิจิทัล เราเรียกแต่ละตำแหน่งดังกล่าวนี้ว่าพิกเซล (Picture element or Pixel)

จุดต่างๆภายในอาเรย์ 2 มิติสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของพิกัดเชิงเส้น (Cartesian coordinate) โดยกำหนดให้  $(x, y)$  แทนตำแหน่งใดๆในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับของรูปภาพดิจิทัลซึ่งสัมพันธ์กับรูปภาพต่อเนื่อง ซึ่งจากตำแหน่งต่างๆของอาเรย์ที่เก็บค่าความสว่าง ณ

ตำแหน่งต่างๆของรูปภาพที่ตรงกันนี้เอง ทำให้เมื่อประกอบกันขึ้นมาจะสามารถแสดงผลให้กลายเป็นรูปภาพขึ้นมาได้

องค์ประกอบที่สำคัญถัดมาของรูปภาพดิจิทัลคือคุณภาพ (Resolution) ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวจะส่งผลให้รูปภาพที่ได้มีความเหมือนจริงจากรูปภาพต้นฉบับมากน้อยแตกต่างกันไป คุณภาพของรูปภาพดิจิทัลนั้นสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนพิกเซลที่ประกอบกันเป็นรูปภาพ และขอบเขต (Range) ของความสว่าง หรือค่าของตัวเลขที่เป็นไปได้ของรูปภาพดิจิทัลนั้นๆ [1]

ในหัวข้อถัดไปจะได้กล่าวถึงการประมวลผลรูปภาพแบบต่างๆที่มักพบเห็นได้บ่อย อันได้แก่ การประมวลผลจุด (Point processing), การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformation), การปรับคุณภาพของรูปภาพ (Image enhancement) และการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression) ตามลำดับ โดยในที่นี้เรากำหนดให้

$I(x, y)$  = ค่าความสว่างของรูปภาพต้นฉบับที่ตำแหน่ง  $(x, y)$  ในพิกัดเชิงเส้น  
โดยที่  $1 \leq x \leq X$   
 $1 \leq y \leq Y$   
เมื่อ  $X, Y$  แทนขนาดตามแนวนอนและแนวตั้งของรูปภาพตามลำดับ

## 2.2 การประมวลผลรูปภาพดิจิทัล (Digital image processing)

การประมวลผลรูปภาพดิจิทัลหมายถึงกรรมวิธีใดๆที่กระทำกับรูปภาพดิจิทัล เพื่อทำการปรับปรุง, แก้ไข, หรือวิเคราะห์รูปภาพ ไม่ว่าจะเพื่อให้รูปภาพนั้นมีคุณภาพดีขึ้นหรือแย่ลงก็ตาม โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการกับรูปภาพในลักษณะต่างๆ อันได้แก่

### 2.2.1 การประมวลผลจุด (Point processing)

เป็นการประมวลผลพื้นฐานที่สุดของการประมวลผลรูปภาพทั้งหมด โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของรูปภาพทีละจุด ซึ่งได้แก่

#### 2.2.1.1 การปรับความสว่างของรูปภาพ (Brightness adjustment)

การปรับความสว่างของรูปภาพ กระทำโดยการเพิ่มหรือลดค่าความสว่างของรูปภาพ ณ ตำแหน่งใดๆที่กำหนดด้วยค่าเดียวกันทั้งหมด โดยอาจกระทำรูปภาพเพียงบริเวณใดบริเวณหนึ่งเท่านั้น หรืออาจกระทำกับทั้งรูปภาพก็ได้ โดยมีสมการคือ

$$I'(x, y) = I(x, y) + c \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I'(x, y)$  = ค่าความสว่างของรูปภาพที่ถูกเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่ง  $(x, y)$   
 $c$  = ระดับความสว่างที่เปลี่ยนแปลงไป

### 2.2.1.2 การปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ (Contrast adjustment)

การปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพเป็นการเพิ่มหรือลดความสว่างของรูปภาพเช่นเดียวกับการปรับความสว่าง แต่ในการปรับการตัดกันของสีนี้ แต่ละตำแหน่งของภาพอาจถูกเพิ่มหรือลดค่าด้วยค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้จะทำให้รูปภาพดูมีความแตกต่างกันของสีมากขึ้น โดยมีสมการคือ [9]

$$I'(x, y) = \begin{cases} I(x, y) + c & ; r_1 \leq x \leq r_2 \wedge s_1 \leq y \leq s_2 \\ I(x, y) & ; otherwise \end{cases} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $(r_1, s_1)$  = ตำแหน่งเริ่มต้นของการปรับ

$(r_2, s_2)$  = ตำแหน่งสุดท้ายของการปรับ

### 2.2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformation)

การแปลงเชิงเรขาคณิตเป็นการประมวลผลรูปภาพที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพิกเซลต่างๆจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งภายในรูปภาพ ตัวอย่างของการแปลงเชิงเรขาคณิตของรูปภาพได้แก่ การแปลงเชิงเส้นปกติ เช่นการหมุน, การปรับขนาด และการเคลื่อนย้ายส่วนของรูปภาพ ตลอดจนการแปลงไม่เชิงเส้น เช่นการม้วนหรือการบิดรูปภาพ (Wrapping) เป็นต้น [1]

#### 2.2.2.1 การเคลื่อนย้ายรูปภาพ (Translation)

คือการเคลื่อนย้ายบางส่วนของรูปภาพหรือทั้งหมด ไปไว้ยังตำแหน่งอื่นภายในรูปภาพเดียวกัน โดยมีสมการคือ

$$I'(x, y) = I(x + x_0, y + y_0) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $x_0, y_0$  = ระยะทางที่เคลื่อนย้ายไปในแนวแกนอนและตั้งตามลำดับ

#### 2.2.2.2 การปรับขนาดของรูปภาพ (Scaling)

คือการยืดหรือหดรูปภาพ ซึ่งเป็นผลให้รูปภาพมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยมีสมการคือ

$$I'(x, y) = I(x \cdot S_x, y \cdot S_y) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $S_x, S_y$  = ขนาดใหม่ของรูปภาพในแนวแกนอนและตั้งตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.3 การหมุนรูปภาพ (Rotation)

คือการหมุนรูปภาพ โดยยึดเอาจุดศูนย์กลางของภาพเป็นจุดหมุน มีสมการดังนี้

$$I'(x, y) = I(x \cos \theta + y \sin \theta, -x \sin \theta + y \cos \theta) \quad (2.5)$$

### 2.2.3 การปรับคุณภาพของรูปภาพ (Image enhancement)

เป็นการปรับคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ (Filter) ทำหน้าที่ตัวกรองสัญญาณ เพื่อตัดเอาบางองค์ประกอบของรูปภาพออกไป ทำให้รูปภาพที่ได้มีลักษณะนุ่มนวลลงหรือชัดเจนขึ้น ซึ่งมีสมการทั่วไปคือ

$$I'(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W(i, j) \cdot I\left(x + i - \left[\frac{N}{2}\right], y + j - \left[\frac{N}{2}\right]\right) \quad (2.6)$$

โดยที่  $W$  แทนฟิลเตอร์สำหรับกรองสัญญาณ ซึ่งมีขนาด  $N \times N$

#### 2.2.3.1 การปรับภาพให้นุ่มนวล (Smooth filtering)

เป็นการทำให้ภาพนุ่มนวล หรือเพื่อลดสัญญาณรบกวนภายในภาพ โดยแยกเอาองค์ประกอบที่มีความถี่สูงในฟูเรียร์ โดเมนออก ซึ่งได้แก่ขอบ และรายละเอียดที่คมชัดของรูปภาพ คงเหลือไว้เฉพาะองค์ประกอบที่มีความถี่ต่ำ ฟิลเตอร์ประเภทนี้จะมีสัมประสิทธิ์ทุกตัวเป็นบวก โดยมีผลรวมของสัมประสิทธิ์เหล่านั้นเท่ากับ 1 ตัวอย่างของฟิลเตอร์ลักษณะนี้คือ สัมประสิทธิ์ทุกตัวมีค่าเท่ากันหมด คือเท่ากับ  $\frac{1}{N^2}$  ในสมการที่ 2.6 ฟิลเตอร์  $W$  จะเป็น [1]

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}$$

(2.7)

#### 2.2.3.2 การปรับภาพให้คมชัดขึ้น (Sharpening filtering)

เป็นการทำให้ภาพคมชัดขึ้น โดยแยกเอาองค์ประกอบที่มีความถี่ต่ำออก ทำให้สามารถมองเห็นรายละเอียดภายในรูปภาพได้ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะบริเวณขอบ, เส้น, หรือจุดต่างๆ ฟิลเตอร์ประเภทนี้จะมีสัมประสิทธิ์ตัวกลางเท่านั้นที่เป็นบวก นอกนั้นที่เหลือทั้งหมดเป็นลบ โดยมี

ผลรวมของสัมประสิทธิ์เหล่านั้นเท่ากับ 1 ตัวอย่างของฟิลเตอร์ลักษณะนี้คือ สัมประสิทธิ์ตัวกลางเท่ากับ  $N^2$  นอกนั้นที่เหลือทั้งหมดเป็น 1 ในสมการที่ 2.6 ฟิลเตอร์  $W$  จะเป็น [1]

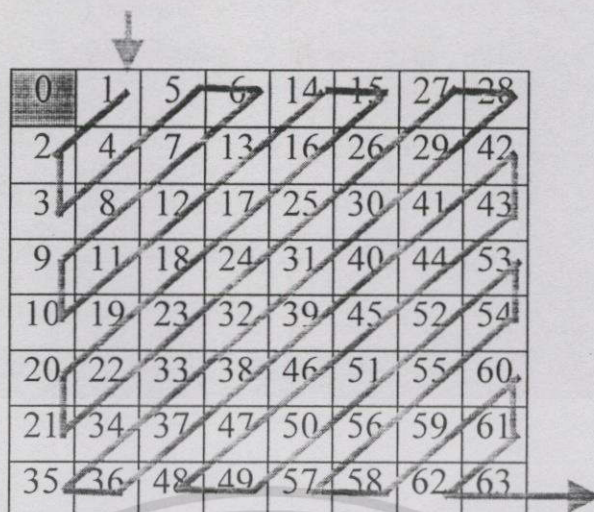
$$W = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

## 2.2.4 การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression)

การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG เป็นมาตรฐานของการบีบอัดรูปภาพที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งสามารถบีบอัดรูปภาพให้มีขนาดเล็กลงได้มากโดยไม่ทำให้คุณภาพของรูปภาพเสียไป โดยมาตรฐานแบบ JPEG นี้สามารถบีบอัดรูปภาพได้ในอัตราส่วนที่มากถึง 40 ต่อ 1 ซึ่งคุณภาพของรูปภาพจะสูญเสียไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [3] องค์กรที่คิด กรรมวิธีการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG นี้ยังสามารถกระทำได้โดยไม่ทำให้คุณภาพของรูปภาพสูญเสียไป ซึ่งก็จะทำให้ความสามารถของการบีบอัดลดลงไปด้วย [1]

มาตรฐานการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG นี้มีอัลกอริทึมในการคำนวณอยู่ 4 แบบ คือ Sequential, Progressive, Lossless, และแบบ Hierarchical โดยที่อัลกอริทึมแบบ Sequential จะถือเป็นแบบมาตรฐานที่ใช้กัน อัลกอริทึมดังกล่าวกระทำโดยแบ่งรูปภาพออกเป็นบล็อกๆ ให้มีขนาด  $8 \times 8$  ตลอดทั้งภาพ โดยที่แต่ละบล็อกจะถูกคำนวณตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ [11]

1. **การแปลงความถี่** แต่ละบล็อกของรูปภาพจะถูกคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันการแปลงความถี่ที่เรียกว่า DCT (Discrete Cosine Transform) ซึ่งจะทำให้ได้สัมประสิทธิ์ของความถี่ในแต่ละจุดของบล็อก
2. **การปรับในเชิงปริมาณ** สัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะถูกปรับให้อยู่ในช่วงที่กำหนด และกำจัดเอาองค์ประกอบที่มีความถี่สูงภายในบล็อกนั้นๆ ออก ส่วนอื่นๆที่เหลือก็จะถูกนำไปเข้ารหัสในขั้นตอนที่ 3 และ 4
3. **การเข้ารหัส DC Huffman** สัมประสิทธิ์ความถี่ที่มีความสูงไม่มากจะถูกนำมาเข้ารหัสโดยเทียบจากตารางรหัสของ Huffman
4. **การเข้ารหัส AC Huffman** ผลลัพธ์สุดท้ายจะถูกนำมาจัดใหม่จากที่อยู่ในรูปของอาเรย์ 2 มิติให้อยู่ในรูปของอาเรย์มิติเดียว โดยการไล่ค่าตามจุดต่างๆในลักษณะสลับฟันปลา (Zigzag) ดังรูปที่ 2.2 ค่าต่างๆที่ถูกนำมาเรียงนี้จะถูกเข้ารหัสให้อยู่ในรูปของเศษส่วนอีกครั้งจึงจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์



รูปที่ 2.2 ลำดับการเข้ารหัสในลักษณะฟันปลาของขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG โดยใช้ AC Huffman coding

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าในการบีบอัดด้วยอัตราส่วนมาก ๆ จะทำให้คุณภาพของรูปภาพสูญเสียไปบ้าง แต่กรรมวิธีแบบ JPEG ก็ยังสามารถทำการคืนกลับการบีบอัด (Decompression) เพื่อให้ได้รูปภาพที่มีคุณภาพใกล้เคียงเช่นเดิมได้อีกด้วย [1, 3, 9]

# บทที่ 3

## ลายน้ำดิจิทัล

### 3.1 หลักการซ่อนข้อมูลและลายน้ำดิจิทัล

#### 3.1.1 หลักการซ่อนข้อมูล

การซ่อนข้อมูล (Data hiding) ในปัจจุบันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท เราสามารถจำแนกประเภทของการซ่อนข้อมูลตามวัตถุประสงค์ได้เป็น 2 ลักษณะคือ [2]

- การซ่อนข้อมูลเพื่อบันทึกรายละเอียดหรือข้อความอธิบายลงไป การซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้มักต้องการบันทึกข้อมูลจำนวนมากลงบนสื่อ และด้วยเหตุผลที่ว่าข้อมูลที่ถูกรับบันทึกลงบนสื่อดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ดังนั้นการซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้จึงไม่ได้ต้องการความปลอดภัยต่อการถูกแก้ไขหรือทำลายแต่อย่างใด ตัวอย่างของการซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้ได้แก่ Feature location และ Embedded captions เป็นต้น
- การซ่อนข้อมูลที่ต้องการความปลอดภัยสูง เช่นการซ่อนข้อมูลที่เป็นความลับ (Secret message hiding), การซ่อนข้อมูลเพื่อใช้แสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของในสื่ออื่น (Digital watermarking), คลอดจนการซ่อนข้อมูลเพื่อตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงแก้ไข (Media authentication, Fingerprinting และ Tamper proofing) เป็นต้น ข้อมูลที่ถูกรับมาซ่อนในลักษณะนี้มักเป็นเพียงข้อความสั้นๆ หรือ สัญลักษณ์ (Signature) ขนาดเล็กๆ ซึ่งต้องการความคงทนต่อการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขในรูปแบบต่างๆที่เกิดขึ้นบนตัวสื่อ ทั้งโดยเจตนาและไม่เจตนา

โดยหลักการของการซ่อนข้อมูลนั้น ข้อมูลที่เลือกมาจะถูกทำการซ่อนลงในสื่อดิจิทัลประเภทใดประเภทหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ในลักษณะของพาหะ (Cover object) โดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสื่อให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะไม่ให้เป็นที่สังเกตเห็นของมนุษย์ได้ การซ่อนข้อมูลดังกล่าวอาจมีการใช้รหัสลับประกอบกับเทคนิคการเข้ารหัสเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้มากขึ้นก็ได้ โดยข้อมูลดังกล่าวจะสามารถดึงกลับมาได้โดยอัลกอริทึมเฉพาะเท่านั้น [8, 14] การซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้บางครั้งเรียกว่า Steganography สื่อที่สามารถใช้ในการซ่อนข้อมูลประกอบด้วย ภาพ ภาพเคลื่อนไหว เสียง เอกสาร เป็นต้น ซึ่งสื่อแต่ละประเภทอาจใช้เทคนิคที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสื่อต่างๆ ในส่วนของงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะสื่อประเภทรูปภาพ

### 3.1.2 ลายน้ำดิจิทัล

ลายน้ำดิจิทัล (Digital watermark) เป็นรูปแบบหนึ่งของการซ่อนข้อมูล ซึ่งมักนิยมใช้กับรูปภาพเพื่อซ่อนข้อมูลบางอย่างที่ใช้แสดงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ และด้วยจุดประสงค์ดังกล่าวนี้จึงทำให้ลายน้ำดิจิทัลจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือมีความคงทนสูงต่อกระบวนการแปลงต่างๆที่กระทำกับตัวสื่อ อันจะส่งผลให้ลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่นั้นถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขไปด้วยทั้งโดยเจตนาและไม่เจตนา ซึ่งได้แก่ [4]

- การประมวลผลสัญญาณทั่วไป (Common signal processing) ได้แก่ การแปลงสัญญาณภาพจากดิจิทัลไปเป็นอนาล็อก (Digital-to-Analog) หรือจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital), การแซมปลิง, การปรับในเชิงปริมาณ เช่น ไคเรอริง (Dithering) และการบีบอัดรูปภาพ, และการปรับคุณภาพของรูปภาพโดยทั่วไป เช่น การปรับความสว่างและการตัดกันของสีภายในรูปภาพ เป็นต้น
- ความบิดเบือนอันเกิดจากการประมวลผลรูปภาพในเชิงเรขาคณิต ได้แก่ การหมุน, การปรับขนาด, การเคลื่อนย้าย, และการตัดบางส่วนของรูปภาพ เป็นต้น
- เจตนาที่มุ่งจะทำลายหรือปลอมแปลงลายน้ำดิจิทัล (Subterfuge attacks) เช่น การทำลายลายน้ำดิจิทัลปลอมซ่อนลงบนรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่ก่อนแล้ว (Collusion and Forgery) เป็นต้น

อย่างไรก็ดี ในกรณีของความบิดเบือนอันเกิดจากการประมวลผลรูปภาพในเชิงเรขาคณิตนั้น เทคนิคลายน้ำดิจิทัลส่วนใหญ่จำเป็นจะต้องนำรูปวาดดังกล่าวมาผ่านกระบวนการผันกลับ (Inverse operation) เพื่อให้รูปภาพมีลักษณะใกล้เคียงกับต้นฉบับมากที่สุดก่อนจึงจะสามารถตรวจหาลายน้ำดิจิทัลได้ เช่น ในกรณีของภาพที่ผ่านกระบวนการหมุน จำเป็นต้องทำการคำนวณหาค่ามุมที่รูปภาพถูกหมุนไป เพื่อแปลงตำแหน่งต่างๆภายในรูปภาพให้กลับสู่แกนเดิมก่อนที่จะทำการตรวจสอบลายน้ำได้ ทำให้เพิ่มความยุ่งยากและซับซ้อนในการตรวจหาลายน้ำ ปัญหาดังกล่าวจะทวีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นหากรูปภาพนั้นผ่านกระบวนการแปลงมากกว่า 1 อย่าง (เช่น รูปภาพถูกหมุนและย่อส่วน) อีกทั้งเทคนิคเหล่านั้นยังจำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจสอบพิสูจน์อีกด้วย

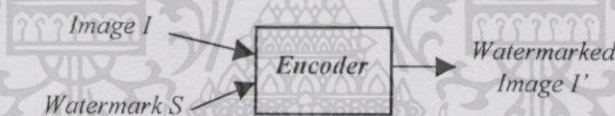
แม้ว่าปัจจุบันจะมีเทคนิคลายน้ำดิจิทัลที่มีคุณสมบัติไม่แปรผันตามกระบวนการแปลง โดยที่เทคนิคดังกล่าวอาศัยคุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transformation) ทำให้การซ่อนและตรวจสอบลายน้ำดิจิทัลในโดเมนของความถี่สามารถกระทำได้ดีกับภาพที่ผ่านการหมุนโดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับ [12] อย่างไรก็ดี เนื่องจากวิธีการดังกล่าวกระทำในโดเมนของความถี่ (Frequency domain) ทำให้ในบางกรณีเป็นการเพิ่มความซับซ้อนในกระบวนการตรวจสอบลายน้ำ เช่น ในกรณีที่รูปภาพถูกจัดเก็บในฟอร์แมตของไฟล์บางรูปแบบซึ่งอยู่ในโดเมนของรูปภาพ (Spatial domain) รวมทั้งในกรณีที่รูปภาพเป็นภาพพิมพ์ ทำให้ต้องมีการสแกนรูปภาพเข้าสู่เครื่อง

คอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลที่สแกนได้ในเบื้องต้นอยู่ในโดเมนของรูปภาพ วิธีการที่กระทำในโดเมนความถี่ดังกล่าวนี้จึงจำเป็นจะต้องนำรูปภาพมาผ่านกระบวนการแปลงความถี่ก่อนเพื่อเข้าสู่กระบวนการซ่อนหรือกระบวนการตรวจสอบลายน้ำดิจิทัลได้ อันจะเป็นผลทำให้มีการคำนวณที่ซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้แล้ววิธีการดังกล่าวยังมีข้อเสียอีกประการคือ ในการซ่อนลายน้ำดิจิทัลนั้นจะกระทำเฉพาะในส่วนแมกนิจูดในโดเมนความถี่ของรูปภาพ ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าข้อมูลต่างๆ (Information) ของภาพ (เช่น รูปร่าง ฯลฯ) ส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนของเฟส (Phase) มากกว่าส่วนของแมกนิจูด การซ่อนลายน้ำลงในส่วนแมกนิจูดที่ข้อมูลลักษณะของรูปภาพเก็บอยู่ในอัตราส่วนที่น้อยกว่าอาจเป็นผลทำให้การทำลายหรือสลายลายน้ำดิจิทัลสามารถกระทำได้ง่ายขึ้น โดยไม่ทำลายหรือลดคุณภาพของภาพลงไปมากนัก [15]

กระบวนการในการซ่อนข้อมูลหรือลายน้ำดิจิทัล ประกอบด้วย 2 ส่วน คือกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล, และกระบวนการตรวจสอบลายน้ำดิจิทัล [5, 6, 8] ซึ่งจะได้กล่าวถึงในส่วนถัดไป

### 3.1.3 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล

รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงในรูปภาพแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล

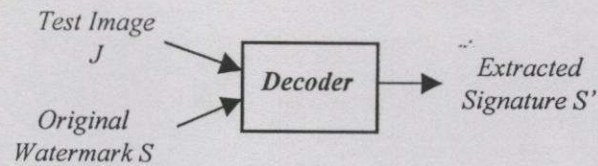
กำหนดให้  $(x_0, y_0)$  แทนตำแหน่งของรูปภาพต้นฉบับ  $I$  ที่จะใช้ซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $S$  รูปภาพที่ผ่านการซ่อนลายน้ำดิจิทัลแล้ว  $I'$  แสดงดังสมการที่ 3.1

$$I'(x_0 + m, y_0 + n) = I(x_0 + m, y_0 + n) + S(m, n) \quad (3.1)$$

โดยที่  $1 \leq m \leq M$  และ  $1 \leq n \leq N$  เมื่อ  $M, N$  แทนขนาดของลายน้ำดิจิทัลในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ

### 3.1.4 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล

รูปแบบของการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพใดๆ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบของกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล

กำหนดให้  $I'$  แทนรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $I$  ซึ่งอาจผ่านกระบวนการแปลงใดๆมาก่อน (ทำให้รูปภาพทั้งสองอาจมีความแตกต่างกันได้) การตรวจหาลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพดังกล่าวสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างส่วนต่างๆ ใน  $I'$  กับลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับ  $S$  โดยเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $(i, j)$  ใดๆ ในรูปภาพ กำหนดให้

$$J''(m, n) = I''(i + m, j + n) \quad (3.2)$$

$$\text{เมื่อ } 0 \leq i \leq X - M$$

$$0 \leq j \leq Y - N$$

การคำนวณค่าสหสัมพันธ์ ( $\text{sim}(J'', S)$ ) แสดงได้ดังสมการที่ 3.3 [4]

$$\text{sim}(J'', S) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J''(m, n) \cdot S(m, n)^*}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J''(m, n) \cdot J''(m, n)^*}} \quad (3.3)$$

โดยที่  $S(m, n)^*$  และ  $J''(m, n)^*$  หมายถึงคอนจูเกต (Conjugation) ของ  $S(m, n)$  และ  $J''(m, n)$  ตามลำดับ

จากสมมติฐานที่ว่าลายน้ำดิจิทัล  $S$  มีค่า  $\mu$  (ความสว่างเฉลี่ย) เท่ากับ 0 ภายใต้การกระจายแบบปกติ (Gaussian distribution) โดยการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์จะได้ว่าหาก  $J''$  และ  $S$  ไม่มีความสัมพันธ์กันแล้ว  $\text{sim}(J'', S)$  จะมีการกระจายแบบปกติ โดยมีค่า  $\mu$  เท่ากับ 0 และ  $\sigma$  (ความแปรปรวน) เท่ากับ 1 [4] ซึ่งจากข้อเท็จจริงดังกล่าวนี้ เราสามารถนำเอาวิธีการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis testing) มาใช้เพื่อพิสูจน์การมีอยู่ของลายน้ำดิจิทัลได้ โดยในกรณีที่ไม่มีลายน้ำอยู่ในรูปภาพ ผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ไม่ควรมีค่าเกิน Threshold  $\delta$  (ใน [4] กำหนดให้  $\delta = \mu + 6\sigma$  หรือเท่ากับ 6 ซึ่งทำให้มีค่าของเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 99.999999%) การกำหนดค่าของ  $\delta$  ดังกล่าวนี้นั้นขึ้นอยู่กับความต้องการระดับความน่าเชื่อถือ (Confidential interval) มากน้อยเพียงไร

## 3.2 เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพที่ใช้ในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีเทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบต่างๆจำนวนมาก เทคนิคที่สำคัญได้แก่

### 3.2.1. Least significant bit replacement

Least significant bit replacement เป็นวิธีการที่มีแนวคิดพื้นฐานที่สุด โดยการเข้าไปแก้ไขบิตต่ำสุด (LSB) ของแต่ละพิกเซลภายในรูปภาพโดยตรง ด้วยการแทนที่ด้วยแต่ละบิตของลายน้ำดิจิทัล [2, 4, 8, 14] ซึ่งนับว่าเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการการคำนวณมาก แต่ขณะเดียวกันความทนทานต่อการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขบนตัวรูปภาพของวิธีการนี้ก็มีน้อยหรือแทบไม่มีเลย ซึ่งในเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกๆส่วนใหญ่จะอาศัยแนวคิดดังกล่าวนี้

### 3.2.2. Patchwork

เป็นวิธีการเชิงสถิติ ภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่าแต่ละพิกเซลภายในรูปภาพมีค่าความสว่างใกล้เคียงกันและเป็นอิสระจากกัน ดังนั้นหากทำการเลือกพิกเซลขึ้นมาจำนวนสองกลุ่ม ( $a, b$ ) อย่างสุ่มแล้ว ผลต่างของค่าเฉลี่ยของความสว่างจากทั้งสองกลุ่มควรมีค่าเข้าใกล้ 0 ดังสมการด้านล่าง [2]

$$\bar{x}_a - \bar{x}_b = 0 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\bar{x}_a, \bar{x}_b$  แทนความสว่างเฉลี่ยของพิกเซลทั้งหมดที่เลือกจากบริเวณ  $a$  และ  $b$  ตามลำดับ

จากข้อเท็จจริงดังกล่าว ในวิธีการ Patchwork นี้จะทำการแก้ไขค่าความสว่างในแต่ละพิกเซลของทั้งสองกลุ่มให้แตกต่างกัน โดยทำการเพิ่มค่าของแต่ละพิกเซลในกลุ่ม  $a$  ด้วยค่า  $\alpha$  ซึ่งเป็นค่าน้อยๆ และในทำนองเดียวกันก็ลดค่าของแต่ละตำแหน่งในกลุ่ม  $b$  ด้วยค่าเดียวกัน ดังนั้นผลลัพธ์ที่คาดหวังจากสมการที่ (3.4) ควรเป็น

$$(\bar{x}_a + \alpha) - (\bar{x}_b - \alpha) = 2\alpha \quad (3.5)$$

ค่าและตำแหน่งต่างๆที่ทำการแก้ไขไปดังกล่าวก็จะกลายเป็นรหัสลับ (Secret key) ที่เจ้าของรูปภาพเก็บไว้เพื่อใช้พิสูจน์ลิขสิทธิ์บนตัวรูปภาพในภายหลัง ด้วยความซับซ้อนของวิธีการนี้เองจึงทำให้วิธีการนี้มีควาทนทานต่อกระบวนการแปลงต่างๆเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวไม่สามารถรองรับกับการแปลงเชิงเส้นอย่างการหมุนและการปรับขนาดได้

### 3.2.3 Texture block coding

วิธีการนี้กระทำโดยการเลือกเอาส่วนหนึ่งของภาพ ไปฝังไว้ในอีกส่วนหนึ่งของภาพที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งจะป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงใดๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพจะส่งผลให้บริเวณทั้งสองดังกล่าวได้รับผลกระทบในลักษณะเดียวกัน ซึ่งในกระบวนการตรวจหาลายน้ำกลับคืนนั้นสามารถกระทำได้โดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติ (Autocorrelation) [2] นับว่าเป็นวิธีการที่มีความทนทานค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังมีข้อเสียหลายประการ คือ

- ไม่มีการใช้รหัสลับหรืออัลกอริทึมพิเศษซึ่งแสดงถึงสิทธิของเจ้าของเฉพาะเจาะจง
- สามารถกระทำได้กับเฉพาะบางรูปภาพที่มีส่วนคล้ายคลึงกันเท่านั้น
- บางรูปภาพอาจมีส่วนที่คล้ายคลึงกันโดยบังเอิญ ซึ่งจะทำให้ผลการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลผิดพลาดได้
- ในขั้นตอนการพิจารณาเลือกพื้นที่ผิวที่ใกล้เคียงกันภายในรูปภาพนั้น ไม่สามารถกระทำโดยอัตโนมัติได้

### 3.2.4 Spread spectrum watermarking

การซ่อนลายน้ำดิจิตอลโดยใช้เทคนิค Spread spectrum เป็นวิธีการที่มีความทนทานสูง วิธีการดังกล่าวอาศัยทฤษฎีการมอดูเลชันในระบบสื่อสารที่เรียกว่า Spread spectrum technique โดยวิธีการดังกล่าวใช้ขนาดความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) ที่มากกว่าที่ใช้ในเทคนิคการมอดูเลชันแบบอื่น อันเป็นผลทำให้สามารถลดขนาดของสัญญาณที่ส่งในแต่ละช่วงความถี่ลงได้ ทำให้การส่งสัญญาณด้วยเทคนิคดังกล่าวตรวจจับได้ยากเนื่องจากระดับสัญญาณในแต่ละย่านความถี่มีระดับต่ำมาก (อยู่ในระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่โดยทั่วไปในช่องสัญญาณ) ซึ่งคุณสมบัติอันนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพได้เป็นอย่างดี โดยในกรณีของลายน้ำดิจิตอลนี้ รูปภาพที่ต้องการซ่อนเปรียบเสมือนช่องสัญญาณที่จะทำการส่งข้อมูล ในขณะที่แต่ละพิกเซลภายในรูปภาพเปรียบเสมือนสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร ซึ่งลายน้ำดิจิตอลจะเปรียบเสมือนกับสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง คุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคนี้คือ ลายน้ำดิจิตอลที่เป็นเสมือนข้อมูลที่จะส่งไปในช่องสัญญาณดังกล่าว จะต้องไม่ทำให้ภาพต้นฉบับเปลี่ยนแปลงไปจนเป็นที่สังเกตเห็นได้ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของเทคนิค Spread spectrum ดังกล่าวข้างต้น โดยการใช้เทคนิคดังกล่าว ทำให้ค่าความสว่างของลายน้ำดิจิตอลสามารถกำหนดให้อยู่ในระดับที่ต่ำเพียงพอที่จะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของเทคนิค Spread spectrum คือมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งในกรณีของการประยุกต์ใช้เพื่อการซ่อนลายน้ำดิจิตอล จะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิตอลมีความทนทานต่อกระบวนการประมวลผลภาพ ทั้งในกรณีที่กระทำโดยมีเจตนาเพื่อการทำลายตัวลายน้ำที่ซ่อนอยู่ และในกรณีอื่น ๆ อาทิเช่น เพื่อผลในด้านการปรับปรุงภาพ หรือเพื่อการลดขนาดของข้อมูล เป็นต้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซ่อนข้อมูล โดยวิธีการ Spread spectrum สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I'(x_0 + m, y_0 + n) = I(x_0 + m, y_0 + n) + \alpha \sum_{i=1}^Z w_i S_i(m, n) \quad (3.6)$$

- โดยที่  $\alpha$  = ค่ากำหนดความเข้มของลายน้ำดิจิทัล (Amplitude factor)  
 $Z$  = จำนวนของรหัส Spreading code  
 $w_i$  = ข้อมูลที่จะซ่อนลำดับที่  $i$   
 $S_i$  = Spreading code ลำดับที่  $i$

สำหรับการตรวจหาและดึงเอาข้อมูลกลับคืนมานั้น ข้อมูล  $w_i$  ใดๆจะสามารถดึงกลับมาได้โดยใช้สมการที่ 3.3 อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอใน [4] ยังมีข้อเสียในขั้นตอนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล ซึ่งในกรณีที่รูปภาพได้ผ่านกระบวนการแปลงบางอย่างมา จำเป็นจะต้องมีการผันกลับกระบวนการแปลงที่เกิดขึ้นกับรูปภาพนั้น (เช่น หมุนรูปภาพกลับด้วยมุม  $-\theta$  หากภาพดังกล่าวถูกหมุนไปจากแกนเดิมเป็นมุม  $\theta$  เป็นต้น) ซึ่งทำให้เพิ่มความซับซ้อนในการตรวจสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีทั่วไปที่เราไม่สามารถทราบค่าของการผันกลับที่แท้จริงได้ ในกรณีดังกล่าวจำเป็นต้องมีการคำนวณเป็นจำนวนมากเพื่อทำการประมาณค่าของกระบวนการผันกลับดังกล่าว นอกจากนี้แล้ว วิธีการดังกล่าวยังจำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการเปรียบเทียบเพื่อตรวจหาลายน้ำดิจิทัลอีกด้วย

### 3.3 เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพที่ไม่แปรผันตามกระบวนการหมุน, การปรับขนาด และการเคลื่อนย้าย (RST invariant spread spectrum digital watermarking)

วิธีการนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการเข้ารหัสแบบ Spread spectrum ร่วมกับการแปลงแบบไม่แปรผัน (Transform-based invariant) ซึ่งใน [12] ใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ในพิกัดลอการิทึมเชิงขั้ว (Log-Polar coordinate) พิจารณาสมการต่อไปนี้

$$F(h, k) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y I(x, y) \cdot e^{-j \left( \frac{2\pi xh}{N_1} + \frac{2\pi yk}{N_2} \right)} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $F(h, k)$  = สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform: DFT)

การเคลื่อนที่ใดๆของรูปภาพในโดเมนปกติจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในส่วนของเฟสในโดเมนความถี่ ดังสมการ

$$F(h, k) \cdot e^{-j(ah+\beta k)} \leftrightarrow I(x + \alpha, y + \beta) \quad (3.8)$$

การปรับขนาดในโดเมนของรูปภาพทำให้เกิดการผันกลับการปรับขนาด (Inverse scaling) ในโดเมนความถี่ ดังสมการ

$$\frac{1}{\rho} F\left(\frac{h}{\rho}, \frac{k}{\rho}\right) \leftrightarrow I(\rho x, \rho y) \quad (3.9)$$

การหมุนในโดเมนรูปภาพทำให้เกิดผลลัพธ์เช่นเดียวกันในโดเมนความถี่ ดังสมการ

$$F(h \cos \theta + k \sin \theta, -h \sin \theta + k \cos \theta) \leftrightarrow I(x \cos \theta + y \sin \theta, -x \sin \theta + y \cos \theta) \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ใดๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพในโดเมนปกติจะไม่ส่งใดๆต่อค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงในโดเมนความถี่ (จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในองค์ประกอบของเฟสในโดเมนความถี่เท่านั้น) ดังนั้นในเทคนิคที่มีการคำนวณหาหลายน้ำจืดจอลที่กระทำในโดเมนความถี่จึงมีลักษณะที่ไม่แปรผันตามการเคลื่อนที่ ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ใน [12] จึงได้เสนอถึงแนวทางในการสร้างหลายน้ำจืดจอลที่ไม่ผันแปรตามการหมุนและการปรับขนาด โดยการปรับรูปแบบของกระบวนการทั้งสองให้อยู่ในรูปแบบของการเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้

$$x = e^{\mu} \cos \theta \quad (3.11)$$

$$y = e^{\mu} \sin \theta \quad (3.12)$$

โดยที่  $(x, y) \in \mathcal{R}^2$ ,  $\mu \in \mathcal{R}$  และ  $0 \leq \theta < 2\pi$

ตำแหน่ง  $(x, y)$  ใดๆในพิกัดเชิงเส้นจะมีตำแหน่ง  $(\mu, \theta)$  ในพิกัดลอการิทึมเชิงขั้วที่ตรงกันเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น ดังนั้นกระบวนการปรับขนาดและการหมุนเมื่อแปลงให้อยู่ในระบบพิกัดลอการิทึมเชิงขั้วดังกล่าวจะได้ดังสมการที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

$$(\rho x, \rho y) \leftrightarrow (\mu + \log \rho, \theta) \quad (3.13)$$

$$(x \cos \delta + y \sin \delta, -x \sin \delta + y \cos \delta) \leftrightarrow (\mu, \theta + \delta) \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.13-14 จะเห็นได้ว่ากระบวนการปรับขนาดและการหมุนใดๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพในพิกัดเชิงเส้นปกติจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ในพิกัดลอการิทึมเชิงขั้ว และจากสมการที่ 3.8 ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ใดๆของรูปภาพจะไม่ส่งให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงในโดเมนความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นโดยการประยุกต์ใช้การแปลงแบบไม่แปรผันในระบบพิกัดลอการิทึมเชิงขั้วนี้จะทำให้ลายน้ำดิจิตอลสามารถถูกตรวจพบได้ในโดเมนความถี่โดยไม่ต้องมีกระบวนการผันกลับ ซึ่งในกรณีของการใช้การแปลงฟูเรียร์ในพิกัดดังกล่าวจะมีผลเท่ากับการใช้การแปลงฟูเรียร์-เมลลิน (Fourier-Mellin transformation) ดังสมการ

$$F_M(h, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} I(e^{\mu} \cos \theta, e^{\mu} \sin \theta) \cdot e^{j(h\mu + k\theta)} d\mu d\theta \quad (3.15)$$

เมื่อ  $F_M(h, k)$  = สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์-เมลลิน ซึ่งโมดูลัส (Modulus) ที่ได้จากการแปลงคือส่วนที่ไม่แปรผันของการปรับขนาดและการหมุน

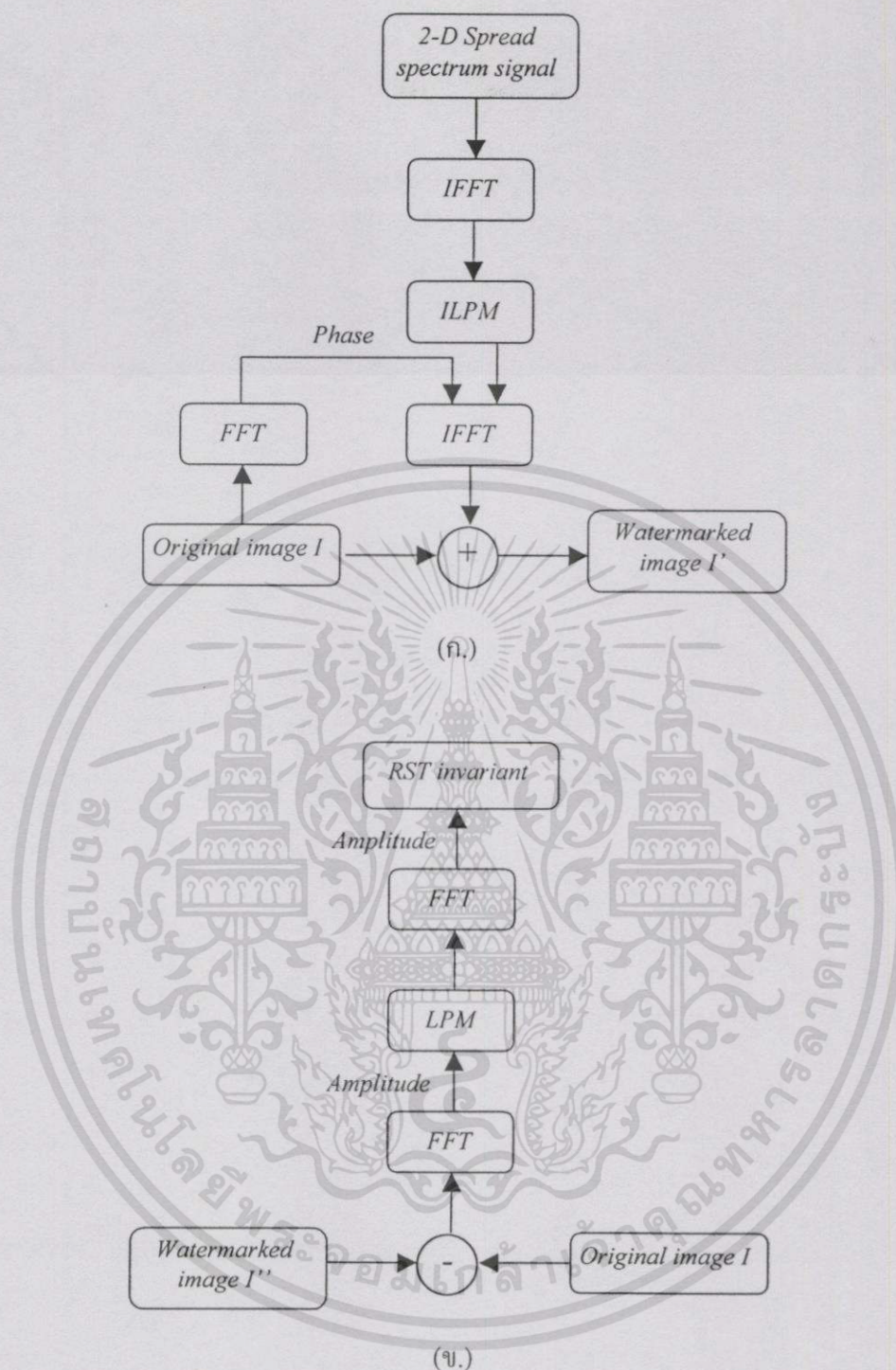
รูปที่ 3.3 แสดงโครงร่างของเทคนิคการทำลายน้ำดังกล่าว อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวในเชิงปฏิบัติมีข้อจำกัดบางประการ เนื่องจาก

- การแปลงฟูเรียร์-เมลลินในระบบพิกัดเชิงขั้วลอการิทึมดังกล่าวจะทำให้เกิดการคำนวณที่ซับซ้อนมาก
- การแปลงกลับไปกลับมาระหว่างพิกัดเชิงเส้นปกติกับพิกัดลอการิทึมเชิงขั้วจะทำให้คุณภาพของลายน้ำดิจิตอลเสียหายไปบางส่วน อันเกิดจากการประมาณค่าที่ขาดหาย (Interpolation)
- เนื่องจากวิธีการดังกล่าวซ่อนลายน้ำเฉพาะในส่วนแมกนิจูดของรูปภาพ ในขณะที่ข้อมูลที่สำคัญต่างๆของรูปภาพถูกเก็บอยู่ในส่วนของเฟส ดังนั้นการทำลายลายน้ำดิจิตอลจึงสามารถกระทำได้ง่ายโดยไม่ทำให้คุณภาพของรูปภาพเสียหายหรือลดลงไปมากนัก

### 3.4 ปัญหาของลายน้ำดิจิตอล

#### 3.4.1 ความไม่คงทนต่อการประมวลผลรูปภาพของลายน้ำดิจิตอล

เทคนิคลายน้ำดิจิตอลแบบต่างๆที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.2 มีคุณสมบัติในด้านความทนทานแตกต่างกัน ในกรณีของความคงทนต่อกระบวนการประมวลผลรูปภาพทั่วไปนั้นสามารถแจกแจงได้ดังตารางที่ 3.1 [2, 4, 8, 14]



รูปที่ 3.3 โครงร่างของการซ่อนลายน้ำดิจิทัล (ก.) และการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล (ข.) ด้วยเทคนิคที่ไม่แปรผันตามการหมุน, การปรับขนาด และการเคลื่อนที่

หมายเหตุ ในที่นี้ FFT และ IFFT หมายถึง Fast Fourier Transform และ Inverse Fast Fourier Transform ตามลำดับ ส่วน LPM และ ILPM หมายถึง Log-Polar Mapping และ Inverse Log-Polar Mapping ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ความคงทนของลายน้ำดิจิทัลแต่ละวิธีเมื่อรูปภาพผ่านการประมวลผลแบบต่างๆ

<i>Techniques</i> <i>Attacks</i>	<i>LSB</i> <i>Replacement</i>	<i>Patchwork</i>	<i>Texture</i>	<i>Spread spectrum</i> <i>based</i>
<i>Brightness adjustment</i>	√	√	√	√
<i>Contrast adjustment</i>	√	√	√	√
<i>Translation</i>	×	√	√	√
<i>Scaling</i>	×	√	√	√
<i>Rotation</i>	×	×	√	√
<i>Cropping</i>	×	×	√	√
<i>Blur filtering</i>	×	×	√	√
<i>Sharpening filtering</i>	×	×	√	√
<i>Noise adding</i>	×	×	√	√

### 3.4.2 แนวทางการทำลายลายน้ำดิจิทัล

นอกจากการประมวลผลรูปภาพต่างๆที่ส่งผลต่อความทนทานของลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพแล้ว การสูญหายของลายน้ำดิจิทัลยังอาจเกิดได้จากความตั้งใจในการทำลายลายน้ำดิจิทัล (Subterfuge attacks) ของบุคคลที่ 3 อีกด้วย ตัวอย่างของวิธีการเหล่านั้นได้แก่

#### 3.4.2.1 Jitter attack

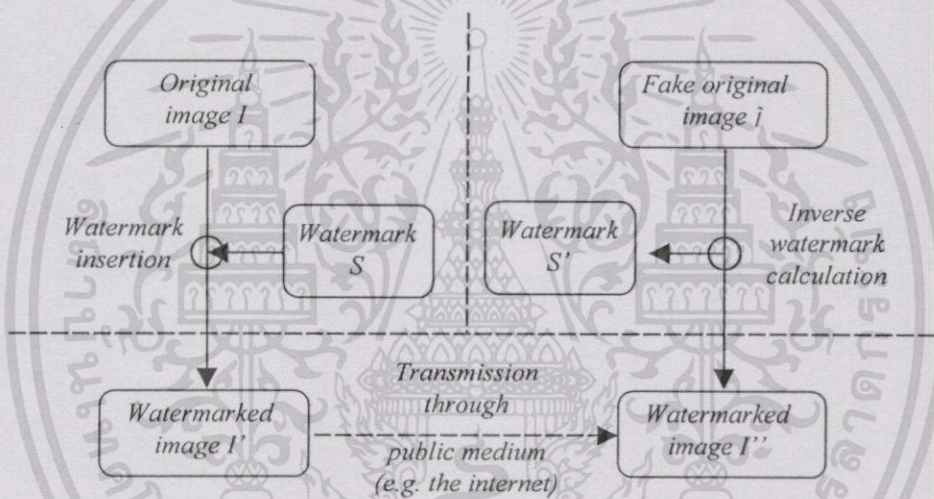
วิธีการนี้แม้จะมักพบเห็นได้ในลายน้ำดิจิทัลบนสื่อประเภทเสียง แต่สำหรับรูปภาพนั้นก็สามารถกระทำได้โดยการก๊อปปี้เอาส่วนอื่นของภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงมาทับส่วนของรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลซึ่งถูกซ่อนอยู่ในบริเวณดังกล่าวถูกทำลายไปอย่างสิ้นเชิง อีกทั้งรูปภาพที่ถูกแก้ไขดังกล่าวนี้ยังมีลักษณะใกล้เคียงของเดิม ซึ่งทำให้พิสูจน์ได้ยากมากขึ้นว่ามีการแก้ไขรูปภาพมาก่อนหรือไม่ [14]

#### 3.4.2.2 Mosaic attack

วิธีการนี้เป็นการกระทำเพื่อหลบเลี่ยงการถูกตรวจพบลิขสิทธิ์ของรูปภาพบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์จากโปรแกรมสืบค้นข้อมูล (เช่น Searching robot หรือ Web crawler เป็นต้น) ที่ทำการสืบหารูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลของเจ้าของลิขสิทธิ์ซ่อนอยู่ตามเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆ วิธีการดังกล่าวนี้กระทำโดยการแตกรูปภาพออกเป็นส่วนย่อยๆจำนวนมาก ซึ่งก็จะทำให้ลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพถูกแยกออกเป็นส่วนๆเช่นเดียวกัน อันจะเป็นผลทำให้โปรแกรมสืบค้นข้อมูลไม่สามารถตรวจหาลายน้ำดิจิทัลพบได้ ซึ่งการแตกรูปภาพออกเป็นส่วนย่อยๆดังกล่าวนี้มีได้ส่งผลให้รูปภาพสูญเสียคุณภาพไปเมื่อนำส่วนของรูปภาพเหล่านั้นมาประกอบกัน [14]

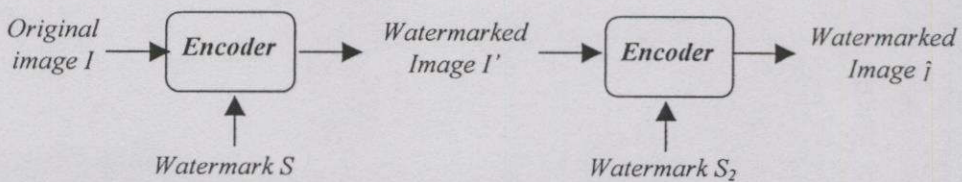
3.4.2.3 Invalidating claims of ownership

เป็นวิธีการที่สร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมขึ้นมาจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัล ซ่อนอยู่ก่อนแล้ว วิธีการดังกล่าวกระทำโดยผู้ละเมิดลิขสิทธิ์ทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล  $S'$  ที่อยู่ในรูปภาพ  $I''$  แล้วดึงเอาส่วนประกอบเหล่านั้นออกมาบางส่วนหรือทั้งหมด ทำให้ได้รูปภาพต้นฉบับปลอม  $\hat{I}$  (รูปภาพ  $I''$  ที่ไม่มีลายน้ำดิจิทัล  $S'$ ) พร้อมทั้งลายน้ำดิจิทัลปลอม  $S'$  ที่สามารถนำมาใช้พิสูจน์ความเป็นเจ้าของได้ [5, 6] (พิจารณารูปที่ 3.4 ประกอบ) ในกรณีที่ดึงเอาส่วนประกอบอื่นภายในรูปภาพออกมาด้วยนอกเหนือจากลายน้ำดิจิทัลนั้น จะกลายเป็นการทำให้รูปภาพต้นฉบับที่แท้จริง  $I$  มีบางส่วนของลายน้ำดิจิทัลปลอม  $S'$  ติดอยู่ด้วย ซึ่งจากเหตุการณ์ข้างต้นทำให้ทั้งเจ้าของลิขสิทธิ์ตัวจริงและบุคคลที่ทำการละเมิดลิขสิทธิ์ต่างมีรูปภาพต้นฉบับและลายน้ำดิจิทัลเป็นของตนเอง ทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าฝ่ายใดคือเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริง



รูปที่ 3.4 วิธีการสร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ก่อนแล้ว

นอกจากวิธีการดังกล่าวแล้ว ในกรณีที่มีการตรวจสอบลิขสิทธิ์ของรูปภาพโดยบุคคลที่ทำการละเมิดเพียงฝ่ายเดียวอาจสามารถกระทำได้ง่ายมากขึ้น โดยการซ่อนลายน้ำดิจิทัลอีกตัวหนึ่ง ( $S_2$ ) ซ่อนลงในรูปภาพที่ลายน้ำดิจิทัลอยู่ก่อนแล้ว  $I'$  ซึ่งในการพิสูจน์นั้นผู้ที่ทำการละเมิดจะใช้รูปภาพ  $I'$  ดังกล่าวเสมือนเป็นรูปภาพต้นฉบับในการตรวจสอบ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วิธีการซ่อนลายน้ำดิจิทัลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่ก่อนแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 แนวทางการป้องกันและการพิสูจน์ความถูกต้อง

เทคนิคต่างๆที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.2 มีความทนทานต่อการคุกคามในรูปแบบต่างๆมากน้อยแตกต่างกัน ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีการใดที่สามารถรองรับปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยลำพัง ในหัวข้อนี้จึงเป็นการเสนอการนำแนวทางอื่นมาใช้ร่วมกับเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลแบบปกติ ซึ่งจะสามารถเพิ่มความทนทานให้กับลายน้ำดิจิทัลต่อการคุกคามได้

#### 3.4.3.1 การกำหนดโปรโตคอลของการซ่อนลายน้ำดิจิทัล

นอกจากการออกแบบลายน้ำดิจิทัลให้มีความคงทนต่อกระบวนการแปลงรูปแบบต่างๆแล้ว เรายังควรคำนึงถึงความปลอดภัยของลายน้ำดิจิทัลต่อการคุกคามของบุคคลที่ต้องการจะละเมิดลิขสิทธิ์ด้วย เช่นในกรณีของการซ่อนลายน้ำดิจิทัลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่ก่อนแล้วนั้น เทคนิคลายน้ำดิจิทัลที่ดีควรจะต้องมีมาตรการป้องกันไม่ให้ซ่อนลายน้ำดิจิทัลซ้อนกันได้มากกว่าหนึ่งชั้น ซึ่งหากมีกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นจะต้องมีวิธีที่สามารถพิสูจน์ลำดับของการซ่อนได้ (เฉพาะลายน้ำดิจิทัลตัวที่ถูกซ่อนเป็นตัวแรกเท่านั้นที่เป็นของเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริง) ซึ่งแนวทางของการป้องกันปัญหาดังกล่าวได้แก่การบันทึกเวลา (Time-stamping) ตลอดจนการลงนามรับรองเอกสารโดยผู้ที่มีอำนาจบนลงรูปภาพเป็นต้น [14] ตัวอย่างอื่นของการควบคุมความปลอดภัยได้แก่ การเข้ารหัสลายน้ำดิจิทัลก่อนที่จะทำการซ่อนลงบนตัวสื่อโดยใช้คีย์สาธารณะ (Public-key encryption) [8] ซึ่งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับลายน้ำดิจิทัลมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม เทคนิคลายน้ำดิจิทัลที่มีในปัจจุบันยังไม่มีการรองรับปัญหาตรงจุดนี้

#### 3.4.3.2 การกำหนดทิศทางในการซ่อนลายน้ำดิจิทัล

แม้ว่าจะมีการกำหนดแบบแผนต่างๆในการซ่อนลายน้ำดิจิทัลซึ่งทำให้ข้อมูลมีความปลอดภัยมากขึ้นก็ตาม แต่แนวทางดังกล่าวยังไม่สามารถรับรองความปลอดภัยได้เต็มที่ เนื่องจากปัจจุบันมีโปรแกรมหรือเครื่องมือต่างๆจำนวนมากที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับนักเจาะระบบคอมพิวเตอร์ (Hacker) ให้สามารถทำให้โปรแกรมละเลยมาตรการดังกล่าวได้ ดังนั้นตราใบใดที่ยังไม่มีเทคนิคหรือแนวทางใดที่ให้ความปลอดภัยได้เพียงพอ เราอาจจำเป็นต้องทำการปกป้องลิขสิทธิ์โดยการกำหนดให้การประมวลผลลายน้ำดิจิทัลใดๆกระทำที่ที่แห่งใดแห่งหนึ่งเพียงแห่งเดียวเหมือนกันทั้งหมด เพื่อป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของบุคคลอื่นที่ไม่มีสิทธิ์ [14]

#### 3.4.3.3 การกำหนดโครงสร้างของลายน้ำดิจิทัลแบบไม่สามารถผันกลับได้

ตัวอย่างของวิธีการสร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ก่อนแล้วดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2.3 นั้น โครงร่างของเทคนิคลายน้ำดิจิทัลประเภทดังกล่าวจะมีลักษณะที่สามารถผันกลับขั้นตอนของกระบวนการสร้างได้ (Invertible) ทำให้สามารถดึง

เอาองค์ประกอบบางส่วนของลายน้ำดิจิทัลออกมาได้ ดังนั้นแนวทางในการป้องกันปัญหาดังกล่าวคือการใช้โครงสร้างของลายน้ำดิจิทัลให้เป็นแบบไม่สามารถผันกลับกระบวนการสร้างได้ (Non-invertible) แนวทางดังกล่าวอาจกระทำได้โดยการใช้ลายน้ำดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันแบบทิศทางเดียว (One-way function) ซึ่งแม้จะทำการผันกลับกระบวนการสร้างลายน้ำดิจิทัลได้ แต่ก็ไม่สามารถดึงเอาลายน้ำดิจิทัลออกมาได้ หรือไม่เช่นนั้นแล้ว ในกรณีที่สามารถดึงเอาลายน้ำดิจิทัลออกมาได้ การกระทำดังกล่าวจะต้องเป็นผลทำให้รูปภาพมีคุณภาพเสียหายไปอย่างมาก [5, 6]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลในโดเมนรูปภาพสำหรับภาพที่ผ่าน กระบวนการหมุนและการปรับขนาด

### 4.1 ลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการหมุน

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงลายน้ำดิจิทัลที่มีโครงสร้างเฉพาะ โดยใช้เทคนิค Spread spectrum watermarking ซึ่งแก้ปัญหาคือความจำเป็นที่ต้องมีการฝึกลับกระบวนการสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการหมุนมาก่อน โดยในเทคนิคที่นำเสนอนี้ แพตเทิร์นที่ใช้สำหรับซ่อนข้อมูลของเจ้าของลิขสิทธิ์จะมีลักษณะเป็นวงแหวน โดยที่แต่ละรหัสของสัญญาณ (Spreading code) ของแพตเทิร์นนี้ จะถูกแทนด้วยวงกลมย่อยๆ ซ้อนกัน ในลักษณะวงแหวนดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แพตเทิร์นวงแหวนซึ่งใช้แก้ปัญหาในกระบวนการหมุนของรูปภาพ

แพตเทิร์นที่ใช้ในวิธีการนี้จะประกอบไปด้วย 2 แพตเทิร์น คือ  $A$  แทนแพตเทิร์นที่ใช้สำหรับซ่อนข้อมูลลงในรูปภาพ และ  $B$  แทนแพตเทิร์นต้นแบบสำหรับใช้ตรวจหาลายน้ำดิจิทัลในรูปภาพ กำหนดให้  $(r, \theta)$  แทนตำแหน่งใดๆของแพตเทิร์นในพิกัดเชิงขั้ว และ  $R$  แทนขนาดของรัศมีของวงกลมวงนอกสุดภายในแพตเทิร์นแล้ว แพตเทิร์นทั้งสองจะถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$A(r, \theta) = \cos(\omega\theta + \phi_r) \quad (4.1)$$

$$B(r, \theta) = e^{j(\omega\theta + \phi_r)} \quad (4.2)$$

โดยที่  $\omega$  = ค่าความถี่เชิงมุม

$\phi_r$  = เฟสที่เลือกขึ้นมาอย่างสุ่มสำหรับรัศมี  $r$

$$1 \leq r \leq R$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

กำหนดให้  $(r_0, \theta_0)$  แทนตำแหน่งใดๆภายในรูปภาพที่จะใช้ซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $I$  ในพิกัดเชิงขั้วแล้ว รูปภาพ  $I'$  จะได้จากการซ่อนแพตเทิร์น  $A$  ลงในรูปภาพ  $I$  ตามสมการ

$$I'(r_0 + r, \theta_0 + \theta) = I(r_0 + r, \theta_0 + \theta) + \alpha A(r, \theta) \quad (4.3)$$

โดยที่  $\alpha =$  ค่ากำหนดความเข้มของลายน้ำดิจิทัล (Amplitude factor)

กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลสามารถกระทำได้โดยการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแพตเทิร์นต้นแบบ  $B$  กับรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $I'$  สำหรับในกรณีรูปภาพดังกล่าวถูกหมุนไปด้วยมุมใดๆ ซึ่งมีผลทำให้แพตเทิร์น  $A$  ที่ถูกซ่อนอยู่ในรูปภาพดังกล่าวถูกหมุนไปด้วยมุมที่เท่ากัน กำหนดให้  $A'_\varepsilon$  แทนแพตเทิร์นที่ถูกซ่อนอยู่ในรูปภาพซึ่งผ่านกระบวนการหมุนด้วยมุม  $\varepsilon$  ดังสมการ

$$A'_\varepsilon(r, \theta') = \cos(\omega(\theta + \varepsilon) + \phi_r) \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นลายน้ำดิจิทัล ( $A'_\varepsilon$ ) ที่อยู่ภายในรูปภาพ ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแพตเทิร์น  $A'_\varepsilon$  และ  $B$  สำหรับตำแหน่งที่รัศมี  $r$  ใดๆจะนิยามได้ดังต่อไปนี้

$$C_{A'_\varepsilon, B}(r) = \frac{\Delta}{2\pi} \left| \int_{\theta=0}^{2\pi} A'_\varepsilon(r, \theta') \cdot B(r, \theta) d\theta \right| \quad (4.5)$$

จากนิยามที่ 4.5 และสมการที่ 4.1-2 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} C_{A'_\varepsilon, B}(r) &= \left| \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos(\omega(\theta + \varepsilon) + \phi_r) \cdot e^{j(\omega\theta + \phi_r)} d\theta \right| \\ &= \left| \int_{\theta=0}^{2\pi} \left( \frac{e^{j(\omega(\theta + \varepsilon) + \phi_r)} + e^{-j(\omega(\theta + \varepsilon) + \phi_r)}}{2} \right) \cdot e^{j(\omega\theta + \phi_r)} d\theta \right| \\ &= \frac{1}{2} \left| \int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j(2\omega\theta + \omega\varepsilon + 2\phi_r)} + e^{-j\omega\varepsilon} d\theta \right| \\ &= \frac{1}{2} \left| e^{j(\omega\varepsilon + 2\phi_r)} \int_{\theta=0}^{2\pi} e^{2j\omega\theta} d\theta + \int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j\omega\varepsilon} d\theta \right| \\ &= \frac{1}{2} \left| 0 + e^{-j\omega\varepsilon} (2\pi - 0) \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2\pi}{2} |e^{-j\omega\epsilon}| \\
 &= \pi
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

จากสมการที่ 4.5-6 จะเห็นได้ว่าโดยการสร้างแพตเทิร์นตามสมการข้างต้น ทำให้ผลการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล (ค่าสหสัมพันธ์) ที่ได้มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับมุมของรูปภาพที่ถูกหมุนไปจากตำแหน่งแกนเดิม ซึ่งจะเป็นผลทำให้การตรวจสอบลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องทราบค่าของมุมที่รูปภาพถูกหมุนไป จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผันกลับใดๆ

#### 4.2 ลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการปรับขนาด

สำหรับแพตเทิร์นที่ใช้ในการซ่อนข้อมูลลงในรูปภาพที่ไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับการปรับขนาดนั้น จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับแพตเทิร์นที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว แต่จะมีข้อแตกต่างกันคือขนาดความหนาของวงแหวนแต่ละวงในแพตเทิร์น A จะมีขนาดใหญ่กว่าในแพตเทิร์น B เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แพตเทิร์นปรับปรุงเพื่อใช้แก้ปัญหาการปรับขนาดของรูปภาพ (ก.) แพตเทิร์น A และ (ข.) แพตเทิร์น B

โดยการกำหนดคุณสมบัติดังกล่าวจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลสามารถตรวจสอบพบได้เมื่อรูปภาพผ่านกระบวนการลดขนาดหรือเพิ่มขนาดเล็กน้อย (พิจารณาเฉพาะการปรับขนาดในช่วงแคบๆ ที่ ประมาณ  $\pm 5\%$ ) ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการพิมพ์และการสแกนรูปภาพ โดยแพตเทิร์นในสมการที่ 4.1-2 จะถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$A(\gamma + p_A, \theta) = \cos(\omega\theta + \phi_\gamma), \tag{4.7}$$

$$B(\gamma + p_B, \theta) = e^{j(\omega\theta + \phi_\gamma)}, \tag{4.8}$$

โดยที่  $\gamma = R - P_A, R - 3P_A - Q_A, R - 5P_A - 2Q_A, \dots, P_A$

$P_A, P_B =$  ความกว้างครึ่งหนึ่งของแต่ละวงแหวนในแพดเทิร์น  $A$  และ  $B$  ตาม

ลำดับ โดยที่

$$-P_A \leq p_A \leq P_A \text{ และ}$$

$$-P_B \leq p_B \leq P_B$$

$Q_A =$  ระยะห่างระหว่างขอบของแต่ละวงแหวนในแพดเทิร์น  $A$  โดยที่

$$P_A > P_B$$

### 4.3 การสร้างลายน้ำดิจิทัลในทางปฏิบัติ

จากทฤษฎีที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการอธิบายถึงแพดเทิร์นของลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันต่อเนื่อง แต่ในทางปฏิบัตินั้นการซ่อนและตรวจสอบลายน้ำดิจิทัลจะถูกกระทำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งประมวลผลกับสัญญาณดิจิทัล ทำให้ต้องมีการแซมปลิงเพื่อประมาณค่าของสัญญาณต่อเนื่องดังกล่าวด้วยฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง [13] ซึ่งในทางทฤษฎีนั้น การแซมปลิงจำเป็นต้องมีการกรองสัญญาณบางส่วนเพื่อให้ความกว้างของช่องสัญญาณไม่เกินครึ่งหนึ่งของอัตราการแซมปลิง เพื่อแก้ปัญหาของการที่สัญญาณมีความถี่เกินจริง (Aliasing effect) ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายถึงการสร้างลายน้ำดิจิทัลบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยนำฟังก์ชันในสมการที่ 4.7-8 มาผ่านกระบวนการตัดย่านความถี่สูงออกโดยใช้ฟิลเตอร์ (Low-pass filtering) ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันซิงค์จำกัดเขต (Truncated Sinc function)  $Sinc_T(r)$  เป็นตัวกรองสัญญาณดังกล่าว

$$Sinc_T(r) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi r)}{\pi r} & ; r \leq R_s \\ 0 & ; else \end{cases} \quad (4.9)$$

โดยที่  $R_s =$  ค่าคงที่ที่เป็นตัวกำหนดขอบเขตของฟังก์ชัน  $Sinc_T(r)$

โดยฟังก์ชันดังกล่าวที่ใช้ในการกรองสัญญาณของแพดเทิร์น  $A$  และ  $B$  สามารถสร้างขึ้นในพิกัดเชิงเส้น ณ ตำแหน่ง  $(x_0, y_0)$  ได้ตามสมการต่อไปนี้

กำหนดให้สมการวงกลมของแพดเทิร์นแทนด้วย

$$x^2 + y^2 = \rho^2 \quad (4.10)$$

$$x^2 = \rho^2 - y^2 \quad (4.11)$$

และสมการวงกลมของฟังก์ชัน  $Sinc_T(r)$  แทนด้วย

$$(x - \rho \cos \theta)^2 + (y - \rho \sin \theta)^2 = R_s^2 \quad (4.12)$$

$$(x^2 - 2x\rho \cos \theta + \rho^2 \cos^2 \theta) + (y^2 - 2y\rho \sin \theta + \rho^2 \sin^2 \theta) = R_s^2$$

$$x^2 - 2x\rho \cos \theta + y^2 - 2y\rho \sin \theta + \rho^2 = R_s^2$$

$$x^2 = 2x\rho \cos \theta - y^2 + 2y\rho \sin \theta - \rho^2 + R_s^2 \quad (4.13)$$

แทน (4.11) = (4.13) จะได้เป็น

$$2x\rho \cos \theta - y^2 + 2y\rho \sin \theta - \rho^2 + R_s^2 = \rho^2 - y^2 \quad (4.14)$$

$$y = \frac{2\rho^2 - R_s^2 - 2x\rho \cos \theta}{2\rho \sin \theta} \quad (4.15)$$

นำ (4.15) ไปแทนใน (4.11) จะได้เป็น

$$x^2 = \rho^2 - \left( \frac{(2\rho^2 - R_s^2) - 2x\rho \cos \theta}{2\rho \sin \theta} \right)^2$$

$$x^2 = \rho^2 - \left( \frac{(2\rho^2 - R_s^2)^2 - 4x\rho \cos \theta(2\rho^2 - R_s^2) + 4x^2\rho^2 \cos^2 \theta}{4\rho^2 \sin^2 \theta} \right)$$

$$x^2 = \left( \rho^2 - \frac{(2\rho^2 - R_s^2)^2}{4\rho^2 \sin^2 \theta} \right) + \frac{x \cos \theta (2\rho^2 - R_s^2)}{\rho \sin^2 \theta} - x^2 \cot^2 \theta$$

$$x^2 (\cot^2 \theta + 1) - \frac{x \cos \theta (2\rho^2 - R_s^2)}{\rho \sin^2 \theta} - \left( \rho^2 - \frac{(2\rho^2 - R_s^2)^2}{4\rho^2 \sin^2 \theta} \right) = 0$$

แล้วจุดตัดกันของวงกลมทั้งสองจะเป็น

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left( \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a\rho} \right) \quad (4.16)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a\rho} \right) \quad (4.17)$$

โดยที่  $a = \frac{y_0^2}{x_0^2} + 1$

$$b = -\frac{y_0(2\rho^2 - R_s^2)}{\rho x_0^2}$$

$$c = \frac{(2\rho^2 - R_s^2)^2}{4y_0^2} - \rho^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ตำแหน่ง  $(x_0, y_0)$  ใดๆของแพตเทิร์นในทางปฏิบัติจะได้จากการกรองสัญญาณความถี่ด้วยฟังก์ชัน  $Sinc_T(r)$  ที่รัศมี  $r \pm R_s$  จากมุม  $\theta_1$  ไปถึงมุม  $\theta_2$  ของแพตเทิร์นดังสมการ

$$A(x_0, y_0) = \sum_{\rho=r_1}^{r_2} \sum_{\beta=0}^K \cos(\omega(\theta_1 + \beta\Delta_\theta) + \phi_{R_\rho}) \cdot Sinc_T(s) \cdot \Delta_\theta \quad (4.18)$$

$$B(x_0, y_0) = \sum_{\rho=r_1}^{r_2} \sum_{\beta=0}^K e^{j(\omega(\theta_1 + \beta\Delta_\theta) + \phi_{R_\rho})} \cdot Sinc_T(s) \cdot \Delta_\theta \quad (4.19)$$

โดยที่

$$r_1 = \min_r R_r, R_r > \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - R_s$$

$$r_2 = \max_r R_r, R_r < \sqrt{x_0^2 + y_0^2} + R_s$$

$$K = \text{เลขจำนวนเต็มที่ทำให้ } |(\theta_1 + K\Delta_\theta) - \theta_2| \text{ มีค่าน้อยที่สุด}$$

$$s = \sqrt{(x_0 - R_\rho \cos \beta)^2 + (y_0 - R_\rho \sin \beta)^2}$$

อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติพบว่าสัญญาณที่กรองด้วยฟังก์ชัน  $Sinc_T(r)$  ยังคงมีย่านความถี่สูงอยู่ในระดับที่ทำให้ปัญหาของสัญญาณที่มีความถี่สูงเกินจริงยังมีอยู่ ดังนั้นภายหลังจากผ่านฟังก์ชัน  $Sinc_T(r)$  ดังกล่าวแล้ว จำเป็นจะต้องนำลายน้ำดิจิตอลมาผ่านกระบวนการตัดย่านสัญญาณความถี่สูงโดยใช้ฟิลเตอร์ซ้ำอีกครั้ง ซึ่งฟิลเตอร์ดังกล่าวนี้อาจใช้ฟิลเตอร์ที่ทำการปรับภาพให้นุ่มนวลลง (Smooth filtering) ที่ใช้ในการประมวลผลรูปภาพทั่วไป เช่นการกำหนดให้สัมประสิทธิ์ทุกตัวของฟิลเตอร์มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{N^2}$  สำหรับฟิลเตอร์ที่มีขนาด  $N \times N$  (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.3.1)

#### 4.4 การซ่อนและการตรวจสอบที่สัญญาณน้ำดิจิตอล

ในการซ่อนลายน้ำดิจิตอลเพื่อให้การซ่อนดังกล่าวเป็นที่สังเกตเห็นได้น้อยที่สุดนั้น เราจำเป็นต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือการเลือกความเข้มของลายน้ำดิจิตอลและตำแหน่งของรูปภาพที่จะทำการซ่อน ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1 และ 4.4.2 ตามลำดับ

##### 4.4.1 การพิจารณาเลือกความเข้มของลายน้ำดิจิตอลที่จะทำการซ่อน

ภายใต้สมมติฐานที่ว่าแพตเทิร์นที่ใช้ซ่อนลงในรูปภาพ  $A$  มีค่าความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 0 และแพตเทิร์นต้นแบบสำหรับตรวจสอบ  $B$  มีค่าความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 0 ภายใต้การกระจายแบบปกติที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 (ในทางปฏิบัติ แพตเทิร์นทั้งสองจะถูกลบด้วยค่าเฉลี่ยออกก่อน) หากรูปภาพ  $I$  มีลายน้ำดิจิตอล  $A$  ซ่อนอยู่จะทำให้ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 3.3 มีค่ามากกว่าค่า  $\delta$  (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1.4)

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้} \quad J(m, n) &= I(i + m, j + n) \\ J'(m, n) &= J(m, n) + \alpha A(m, n) \\ \overline{J'(m, n)} &= \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.3 จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{sim}(J', B) &= \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ (J'(m, n) - \overline{J'(m, n)}) \cdot B(m, n)^* \right\}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ (J'(m, n) - \overline{J'(m, n)})^2 \right\}}} \quad (4.20) \\ &= \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ J'(m, n) \cdot B(m, n)^* - \overline{J'(m, n)} \cdot B(m, n)^* \right\}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ J'(m, n)^2 - 2\overline{J'(m, n)} J'(m, n) + \overline{J'(m, n)}^2 \right\}}} \\ &= \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ (J(m, n) + \alpha A(m, n)) \cdot B(m, n)^* \right\}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ (J(m, n) + \alpha A(m, n))^2 + \overline{J'(m, n)}^2 \right. \\ &\quad \left. - 2\overline{J'(m, n)} (J(m, n) + \alpha A(m, n)) \right\}}} \\ &= \frac{\alpha \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ A(m, n) \cdot B(m, n)^* \right\} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ J(m, n) \cdot B(m, n)^* \right\}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( J(m, n)^2 + 2\alpha J(m, n) A(m, n) + \alpha^2 A(m, n)^2 \right) \\ &\quad - 2\overline{J'(m, n)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \overline{J'(m, n)}^2}} \\ &= \frac{\alpha \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ A(m, n) \cdot B(m, n)^* \right\} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ J(m, n) \cdot B(m, n)^* \right\}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n)^2 + 2\alpha \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) \cdot A(m, n) + \alpha^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A(m, n)^2 \\ &\quad - \frac{2}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) + MN \left[ \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) \right]^2}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\alpha \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{A(m,n) \cdot B(m,n)^*\} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{J(m,n) \cdot B(m,n)^*\}}{\sqrt{\alpha^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A(m,n)^2 + \alpha \left( 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m,n) \cdot A(m,n) \right) + \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m,n)^2 - \frac{1}{MN} \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m,n) \right)^2 \right]}}$$

$$= \frac{\alpha a + b}{\sqrt{\alpha^2 c + \alpha d + e}}$$

โดยที่  $a = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (A(m,n) \cdot B(m,n)^*)$

$$b = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (J(m,n) \cdot B(m,n)^*)$$

$$c = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A(m,n)^2$$

$$d = 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (J(m,n) \cdot A(m,n))$$

$$e = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m,n)^2 - \frac{1}{MN} \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m,n) \right)^2$$

ถ้ารับส่วนของรูปภาพใดๆที่มีลายน้ำดิจิทัลซ้อนอยู่ ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จะมีค่าเกินค่า  $\delta$  (ใน [4] กำหนดให้  $\delta = 6$ ) ดังนี้

$$\left| \frac{\alpha a + b}{\sqrt{\alpha^2 c + \alpha d + e}} \right| > \delta \quad (4.21)$$

$$\frac{|\alpha a + b|}{\sqrt{\alpha^2 c + \alpha d + e}} > \delta$$

$$\left( \frac{|\alpha a + b|}{\delta} \right)^2 > \alpha^2 c + \alpha d + e$$

$$\frac{1}{\delta^2} (\alpha a + b) \cdot (\alpha a + b)^* > \alpha^2 c + \alpha d + e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{\delta^2}(\alpha^2 a \cdot a^* + \alpha a \cdot b^* + \alpha a^* \cdot b + b \cdot b^*) > \alpha^2 c + \alpha d + e$$

$$\alpha^2 \left( c - \frac{a \cdot a^*}{\delta^2} \right) + \alpha \left( d - \frac{a \cdot b^* + a^* \cdot b}{\delta^2} \right) + \left( e - \frac{b \cdot b^*}{\delta^2} \right) < 0$$

ดังนั้น ความเข้มของลายน้ำดิจิทัล ( $\alpha$ ) ที่ตำแหน่ง  $(i, j)$  ใดๆภายในรูปภาพจะสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ 4.14

$$\dots \quad \alpha < \alpha_1 \text{ หรือ } \alpha > \alpha_2 \quad (4.22)$$

โดยที่

$$\alpha_1 = \frac{-\left(d - \frac{a \cdot b^* + a^* \cdot b}{\delta^2}\right) + \sqrt{\left(d - \frac{a \cdot b^* + a^* \cdot b}{\delta^2}\right)^2 - 4\left(c - \frac{a \cdot a^*}{\delta^2}\right)\left(e - \frac{b \cdot b^*}{\delta^2}\right)}}{2\left(c - \frac{a \cdot a^*}{\delta^2}\right)}$$

$$\alpha_2 = \frac{-\left(d - \frac{a \cdot b^* + a^* \cdot b}{\delta^2}\right) - \sqrt{\left(d - \frac{a \cdot b^* + a^* \cdot b}{\delta^2}\right)^2 - 4\left(c - \frac{a \cdot a^*}{\delta^2}\right)\left(e - \frac{b \cdot b^*}{\delta^2}\right)}}{2\left(c - \frac{a \cdot a^*}{\delta^2}\right)}$$

อย่างไรก็ดี ในการพิจารณาเลือกความเข้มของลายน้ำดิจิทัลที่จะซ่อนลงในรูปภาพดังกล่าวนั้น การกำหนดความเข้มของลายน้ำดิจิทัล ( $\alpha$ ) ที่มีค่ามากจะมีข้อดีตรงที่ทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความทนทานต่อการถูกรบกวนได้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็มีผลเสียคือทำให้เป็นที่สังเกตเห็นได้ง่ายมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งในกรณีหลังนี้ การพิจารณาความสามารถในการอำพรางตัวของลายน้ำดิจิทัลนั้นสามารถกระทำได้โดยการพิจารณาแมกนิจูดของลายน้ำดิจิทัลเทียบกับแมกนิจูดของรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่ตรงกัน ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4.2

#### 4.4.2 การพิจารณาเลือกตำแหน่งของรูปภาพที่จะทำการซ่อน

ในการพิจารณาเลือกตำแหน่งของรูปภาพที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงไปในนั้น เราสามารถกระทำได้โดยใช้การแปลงเชิงความถี่ของรูปภาพ ซึ่งผลจากการแปลงดังกล่าวนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะเป็นค่าแมกนิจูด (Magnitude) ของสัญญาณรูปภาพซึ่งบ่งบอกถึงความถี่ในระดับต่างๆภายในรูปภาพ ซึ่งในทางทฤษฎีนั้น หากสัญญาณ  $a$  มีขนาดของแมกนิจูดต่ำกว่าขนาดแมกนิจูดของสัญญาณ  $b$  แล้ว สัญญาณ  $a$  จะสามารถซ่อนตัวอยู่ในสัญญาณ  $b$  ได้โดย

ไม่ทำให้เป็นที่สังเกตเห็นได้ [7, 21] ซึ่งจากทฤษฎีดังกล่าวนี้ เราสามารถพิจารณาเลือกตำแหน่งใดๆ ภายในรูปภาพที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัล โดยการแบ่งรูปภาพออกเป็นบล็อกๆ ให้มีขนาดเท่ากับขนาดของลายน้ำดิจิทัลอย่างต่อเนื่องซ้อนๆกัน แล้วคำนวณหาค่าแมกนิจูดของแต่ละบล็อกโดยใช้การแปลงเชิงความถี่ โดยลายน้ำดิจิทัลจะสามารถซ่อนตัวได้ดีที่สุดในตำแหน่งที่ทุกๆค่าแมกนิจูดของลายน้ำดิจิทัลซึ่งถูกปรับความเข้มแล้วมีค่าน้อยกว่าค่าแมกนิจูดของรูปภาพที่ตำแหน่งนั้นๆ (ในทางปฏิบัติหากไม่สามารถกำหนดตำแหน่งดังกล่าวภายในรูปภาพได้ อาจเลือกตำแหน่งของรูปภาพที่มีจำนวนของค่าแมกนิจูดที่สูงกว่าค่าแมกนิจูดของลายน้ำดิจิทัลซึ่งถูกปรับความเข้มแล้วที่มากที่สุดแทน) ดังสมการที่ 4.15

กำหนดให้  $\Psi(\psi_1, \psi_2)$  เป็นฟังก์ชันแทนจำนวนของตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงด้วยฟังก์ชัน Discrete Cosine Transform (DCT) ของ  $\psi_1$  มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงด้วย DCT ของ  $\psi_2$  แล้ว

$$(p, q) = \max_{i, j} \Psi(I(m, n), \alpha A(m, n)) \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad & i+1 \leq m \leq i+M \\ & j+1 \leq n \leq j+N \\ & 0 \leq i \leq X-M \\ & 0 \leq j \leq Y-N \end{aligned}$$

ตำแหน่ง  $(p, q)$  ที่ได้คือตำแหน่งภายในรูปภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $A$  โดยการกำหนดตำแหน่งในลักษณะดังกล่าวนี้ จะทำให้ลายน้ำดิจิทัลสามารถซ่อนตัวอยู่ในลายน้ำดิจิทัลได้โดยไม่ทำให้เป็นที่สังเกตเห็นได้

#### 4.4.3 การตรวจหาลายน้ำดิจิทัลเพื่อพิสูจน์ความเป็นเจ้าของ

ในกรณีของการซ่อนลายน้ำดิจิทัลเพื่อพิสูจน์ความเป็นเจ้าของบนสื่อรูปภาพนั้น กระทำได้โดยการพิจารณาเลือกตำแหน่งของรูปภาพและความเข้มของลายน้ำดิจิทัลที่เหมาะสม อันจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลสามารถซ่อนตัวอยู่ในรูปภาพได้โดยไม่เป็นที่สังเกตเห็นได้ อย่างไรก็ตาม การซ่อนลายน้ำดิจิทัลในลักษณะดังกล่าวนี้อาจทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัลมากกว่า 1 ตัวได้ เพื่อเพิ่มความคงทนต่อกระบวนการแปลงรูปแบบอื่นๆ เช่นการตัดเอาบางส่วนของรูปภาพทิ้งไป เป็นต้น และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบการปลอมแปลงรูปภาพได้อีกด้วย ดังจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

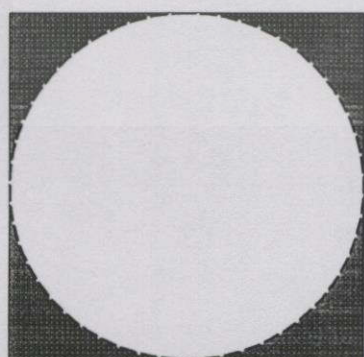
#### 4.5 การตรวจสอบการปลอมแปลงรูปภาพโดยใช้ลายน้ำดิจิทัล

นอกจากปัญหาของกระบวนการประมวลผลรูปภาพแบบต่างๆที่มีผลต่อความคงทนของลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพเช่นการหมุนและการปรับขนาดแล้ว การคุกคามที่เจตนาจะปลอมแปลงหรือทำลายลายน้ำดิจิทัลโดยบุคคลอื่นนับว่าเป็นปัญหาที่ยากต่อการตรวจสอบพิสูจน์ ตัวอย่างเช่นการตัด (Cropping) เอาบางส่วนของรูปภาพซึ่งมีลายน้ำดิจิทัลอยู่ทิ้งไป (ดูหัวข้อที่ 3.4.2.1) ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถตรวจหาลายน้ำดิจิทัลพบได้ และการปลอมแปลงรูปภาพ (Forgery) ที่มีให้เห็นกันบ่อยในปัจจุบัน เช่นการปลอมแปลงหน้าคราดด้วยภาพอนาจาร หรือการตัดแต่งรูปทิวทัศน์ด้วยวัตถุต่างๆ เป็นต้น ซึ่งในกรณีหลังนี้แม้ว่าจะสามารถพิสูจน์ลิขสิทธิ์บนตัวรูปภาพได้ แต่การตรวจสอบดังกล่าวไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมาหรือไม่ (Image authentication)

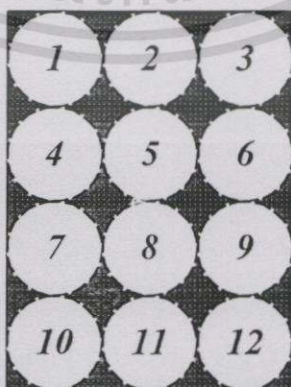
ในการซ่อนลายน้ำดิจิทัลเพื่อใช้พิสูจน์ลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของบนตัวรูปภาพแบบปกตินั้น การซ่อนลายน้ำดิจิทัลเพียงตัวเดียว โดยมีการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดรวมทั้งความเข้มของลายน้ำดิจิทัลที่จะซ่อน ณ ตำแหน่งนั้นๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการซ่อนที่ดีที่สุด ดังนั้นในการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลจะทำให้ได้ค่าสหสัมพันธ์ที่มีค่าเกิน  $\delta$  เพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งจากประเด็นข้างต้นทั้งสองข้างต้นนั้นจะสามารถตรวจสอบได้เฉพาะลิขสิทธิ์บนตัวรูปภาพเท่านั้น แต่ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมาหรือไม่ ในวิธีการของการพัฒนาลายน้ำดิจิทัลในโดเมนของรูปภาพนั้น เราสามารถประยุกต์เอาลายน้ำดิจิทัลดังกล่าวมาใช้ในการตรวจสอบว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขภายหลังจากที่ทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัลไปแล้วหรือไม่ โดยการซ่อนลายน้ำดิจิทัลให้กระจายไปทั่วตลอดทั้งภาพในลักษณะใดลักษณะหนึ่งดังต่อไปนี้

1. กำหนดลายน้ำดิจิทัลให้มีขนาดพอดีกับภาพ
2. วางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วตลอดทั้งภาพ
3. วางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันโดยมีการซ้อนกันเพื่อลดช่องว่างที่เกิดขึ้น

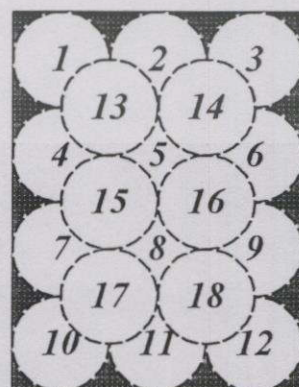
รูปแบบของการวางลายน้ำดิจิทัลทั้ง 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก.), (ข.) และ (ค.) ตามลำดับ



(ก.)



(ข.)



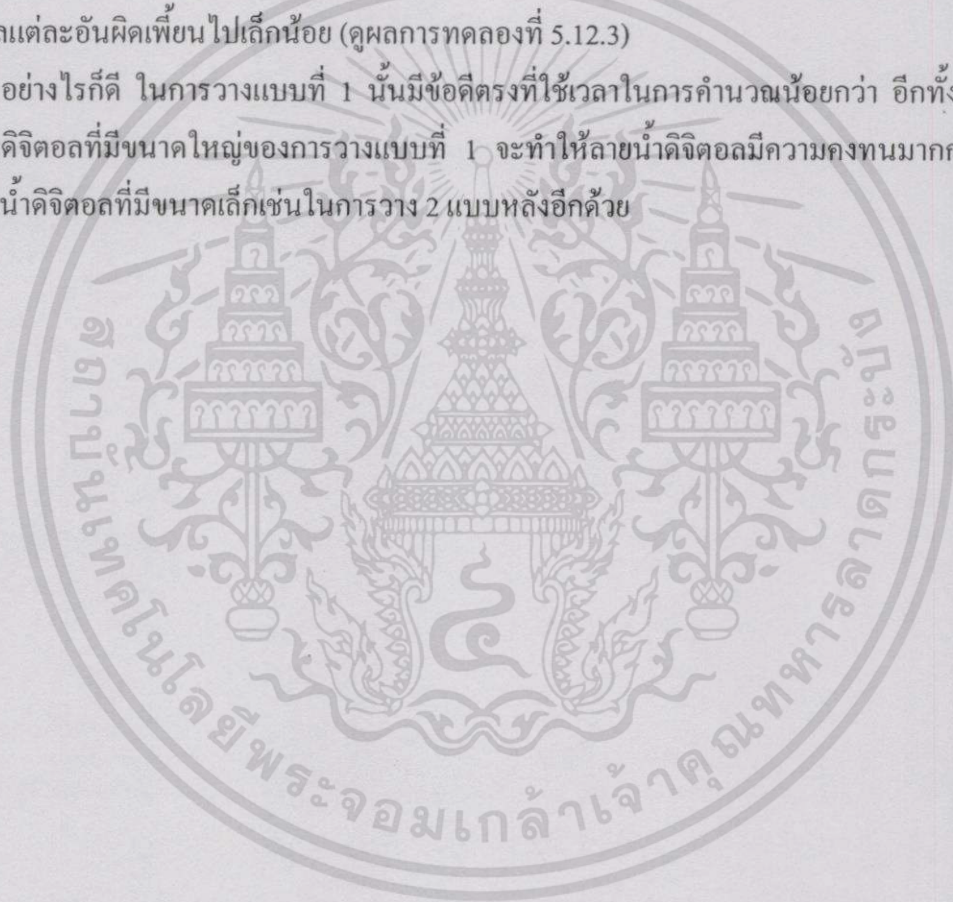
(ค.)

รูปที่ 4.3 รูปแบบของการวางลายน้ำดิจิทัลต่างๆเพื่อใช้ในการตรวจสอบการปลอมแปลงรูปภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสามแบบของการวางจะทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความคงทนต่อการตัดเอาบางส่วนของรูปภาพทิ้งไป โดยลายน้ำดิจิทัลจะยังคงสามารถถูกตรวจพบได้ สำหรับในกรณีของการปลอมแปลงรูปภาพนั้น การวางแบบที่ 1 จะสามารถพิสูจน์ได้ว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมาหรือไม่เท่านั้น แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นได้ ต่างจากการวางแบบที่ 2 และ 3 ซึ่งนอกจากจะสามารถพิสูจน์ได้ว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมาหรือไม่แล้ว ยังสามารถระบุตำแหน่งดังกล่าวได้โดยการพิจารณาดำแหน่งที่ค่าสหสัมพันธ์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ปรากฏในตำแหน่งอื่นๆมาก ซึ่งในกรณีของการวางแบบที่ 3 นั้นจะสามารถอุดช่องว่างระหว่างรอยต่อของลายน้ำดิจิทัลได้มากกว่าการวางแบบที่ 2 อย่งไรก็ดี ส่วนของลายน้ำดิจิทัลที่ซ้อนทับลายน้ำดิจิทัลตัวอื่นๆเปรียบเสมือนสัญญาณรบกวนรูปแบบหนึ่งในรูปภาพ ซึ่งจะทำให้ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ของลายน้ำดิจิทัลแต่ละอันผิดเพี้ยนไปเล็กน้อย (คู่มือการทดลองที่ 5.12.3)

อย่างไรก็ดี ในการวางแบบที่ 1 นั้นมีข้อดีตรงที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า อีกทั้งการใช้ลายน้ำดิจิทัลที่มีขนาดใหญ่ของการวางแบบที่ 1 จะทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความคงทนมากกว่าการใช้ลายน้ำดิจิทัลที่มีขนาดเล็กเช่นในการวาง 2 แบบหลังอีกด้วย



## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 การทดสอบการซ่อนลายน้ำดิจิทัลและการตรวจหา

ในหัวข้อนี้เราได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ต่อกระบวนการหมุนและการปรับขนาด ตลอดจนกระบวนการแปลงแบบต่างๆ โดยสร้างแพตเทิร์น ของลายน้ำดิจิทัล  $A_1$  และ  $B_1$  ซึ่งกำหนดให้  $R=64$ ,  $P_A=7$ ,  $P_B=5$ ,  $Q_A=6$ ,  $\omega=32$  และ  $R_S=3$  เพื่อซ่อนลงบนรูปภาพขาว-ดำ “Lenna”<sup>1</sup> ที่มีขนาด  $512 \times 512$  พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล ดังปรากฏในรูปที่ 5.1 (ก.) ซึ่งโดยการวิเคราะห์เชิงความถี่พบว่า บริเวณของรูปภาพภายในกรอบสี่เหลี่ยมดังปรากฏในรูปที่ 5.1 (ข.) เป็นบริเวณที่เหมาะสมที่สุดในการซ่อน และโดยการคำนวณหาความเข้มที่เหมาะสมของลายน้ำดิจิทัลทำให้ได้ค่า  $\alpha = 0.025$  (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 4.4.1)



(ก.)

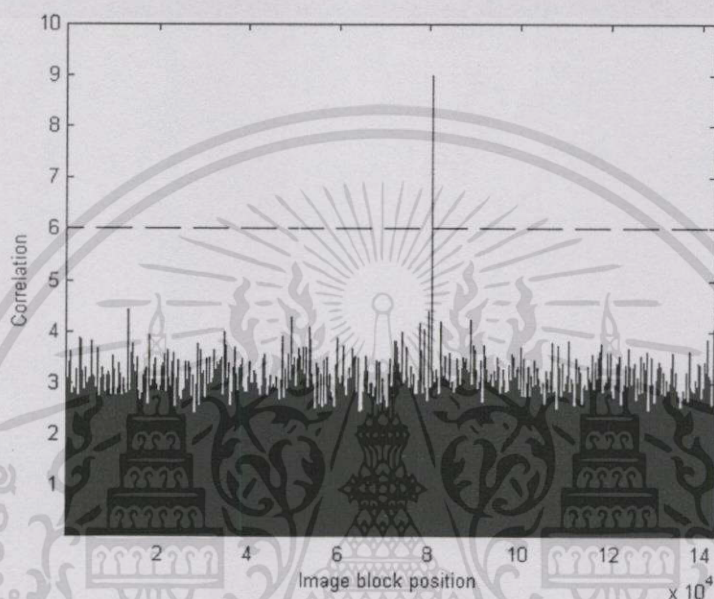
(ข.)

รูปที่ 5.1 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ “Lenna” (ข.) รูปภาพ “Lenna” ภายหลังจากที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัลแล้ว (ในกรอบสี่เหลี่ยมคือบริเวณที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัล)

ภายหลังจากที่ทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงไปในรูปแบบแล้ว ปรากฏว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบดังกล่าวจนเป็นที่สังเกตเห็นได้ จากนั้นได้ทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลโดยการ

<sup>1</sup> ลิขสิทธิ์ของนิตยสาร Playboy © 1972

คำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรูปภาพกับแพตเทิร์นต้นแบบ โดยทำการแบ่งรูปภาพออกเป็น บล็อกๆ ให้มีขนาดเท่ากับขนาดของลายน้ำดิจิทัล โดยเลื่อนตำแหน่งไปที่ละ 1 พิกเซลตามแนวนอนและแนวตั้ง ผลที่ได้จึงแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าสหสัมพันธ์ของบริเวณที่ไม่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่จะมีระดับต่ำ โดยจะมีเฉพาะบริเวณที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่เท่านั้นที่มีค่าสูงเกินค่า  $\delta$  (ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 6)



รูปที่ 5.2 ผลลัพธ์จากการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัลดังกล่าวกับแพตเทิร์นต้นแบบ

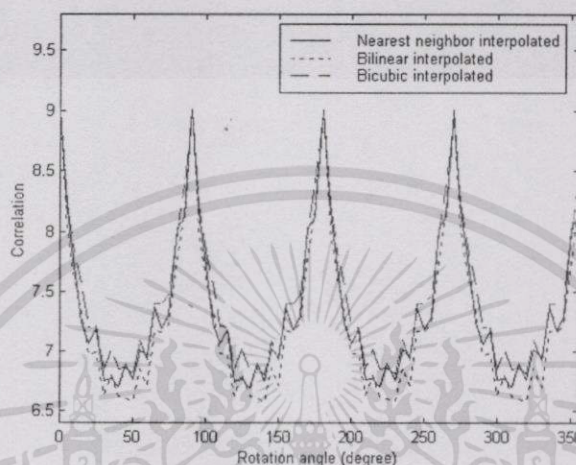
จากนั้นได้ทำการทดสอบความทนทานของรูปภาพต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆ อันได้แก่ การหมุน, การปรับขนาด, การหมุนและการปรับขนาดไปพร้อมๆกัน, การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG, การปรับความสว่าง, การปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ, การปรับคุณภาพโดยใช้ฟิลเตอร์, การพิมพ์และการสแกนกลับ, การตัดเอาบางส่วนของรูปภาพทิ้งไป ตลอดจนการตรวจสอบการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขของรูปภาพ โดยจะแสดงรายละเอียดในส่วนถัดไป

## 5.2 การทดสอบความทนทานต่อการหมุนของรูปภาพ

ในการทดลองนี้ได้ทำการหมุนรูปภาพที่มุมต่างๆ โดยได้ทำการทดลองหมุนไปที่ละ 5 องศา นับจากมุมที่ 0 องศา ไปจนถึง 355 องศา โดยใช้อัลกอริธึมในการประมาณค่าที่ขาดหาย (Interpolation) 3 แบบ [3, 9, 10, 16, 17, 19] คือ Nearest neighbor interpolation, Bilinear interpolation และ Bicubic interpolation จากนั้นทำการทดสอบตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ภายในรูปภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในหัวข้อนี้เราได้กระทำใน 2 ลักษณะ คือในการทดลองแรกทำการหมุนรูปภาพในลักษณะข้างต้น โดยที่แต่ละครั้งของการหมุนเป็นอิสระจากกัน ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละองศา โดยที่ลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ถูกต้องในทุกการทดลองข้างต้น

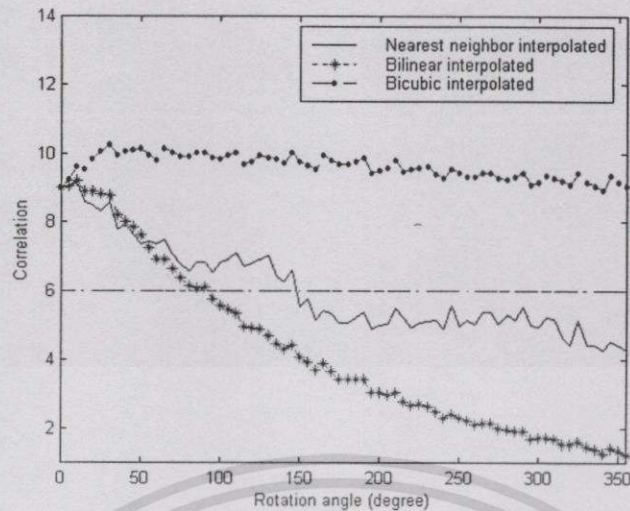


รูปที่ 5.3 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองหมุนภาพตั้งแต่ 0 จนถึง 355 องศา

**หมายเหตุ** ผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ปรากฏในกราฟไม่ได้มีลักษณะเป็นค่าคงที่หรือเส้นตรงตามที่พิสูจน์ไว้ในสมการที่ 4.5-4.6 (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.1) เนื่องจากการหมุนของรูปภาพที่เกิดขึ้นในเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องจะทำให้ตำแหน่งใหม่ที่ได้จากการหมุนนี้เป็นค่าที่ได้จากการประมาณ ดังนั้นผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จึงมีค่าบิดเบือนไปจากค่าที่ได้ในทางทฤษฎี

ในการทดลองที่สองได้ทำการหมุนรูปภาพไปครั้งละ 5 องศา แล้วนำรูปภาพดังกล่าวนี้มาหมุนซ้ำไปอีกเรื่อยๆตั้งแต่มุมที่ 0 ไปจนถึง 355 องศา รูปที่ 5.4 แสดงค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลในแต่ละองศา

จากผลลัพธ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากกรณีที่ใช้การประมาณค่าขาดหายแบบ Bicubic interpolation นั้นมีค่าไม่ลดลงไปมากนัก โดยลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ทั้ง 72 ครั้งของการหมุน ในขณะที่การประมาณค่าขาดหายอีก 2 แบบนั้น ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จะค่อยๆลดลงจนต่ำกว่าค่า  $\delta$  ซึ่งในการประมาณค่าขาดหายแบบ Nearest neighbor interpolation นั้นลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ในการหมุน 30 ครั้งแรก (มุมที่ 0 ถึง 145 องศา) และสำหรับการประมาณค่าขาดหายแบบ Bilinear interpolation จะสามารถตรวจหาลายน้ำดิจิทัลพบได้ในการหมุน 19 ครั้งแรกเท่านั้น (0 ถึง 90 องศา)

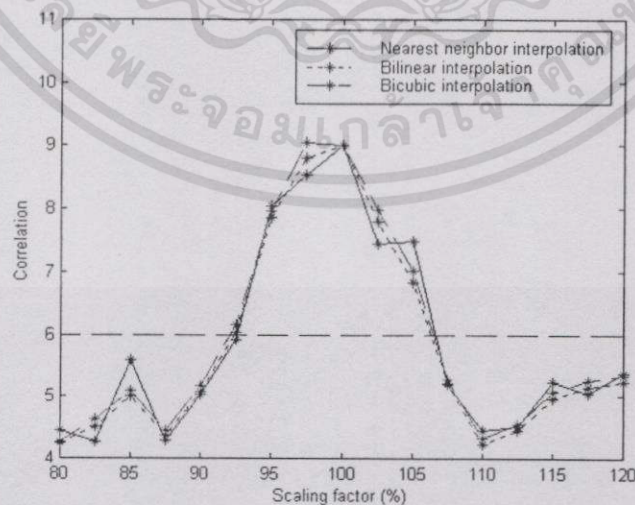


รูปที่ 5.4 ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองนำรูปภาพมาหมุนซ้ำ ตั้งแต่ 0 จนถึง 355 องศา

### 5.3 การทดสอบความทนทานต่อการปรับขนาดของรูปภาพ

ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับขนาดของรูปภาพที่ขนาดต่างๆ โดยได้ทำการทดลองปรับขนาดไปครั้งละ 2.5% ตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120% โดยใช้วิธีการประมาณค่าทั้ง 3 แบบ เช่นเดียวกัน จากนั้นทำการทดสอบตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ภายในรูปภาพ

รูปที่ 5.5 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละขนาด โดยที่ลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ถูกต้องในช่วง  $\pm 5\%$  (ประมาณ 95% ถึง 105%) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดในช่วงแคบๆดังกล่าวในทางปฏิบัติอาจเกิดขึ้นได้จากความบิดเบือนอันเนื่องมาจากการกระบวนกรพิมพ์และกระบวนการสแกน

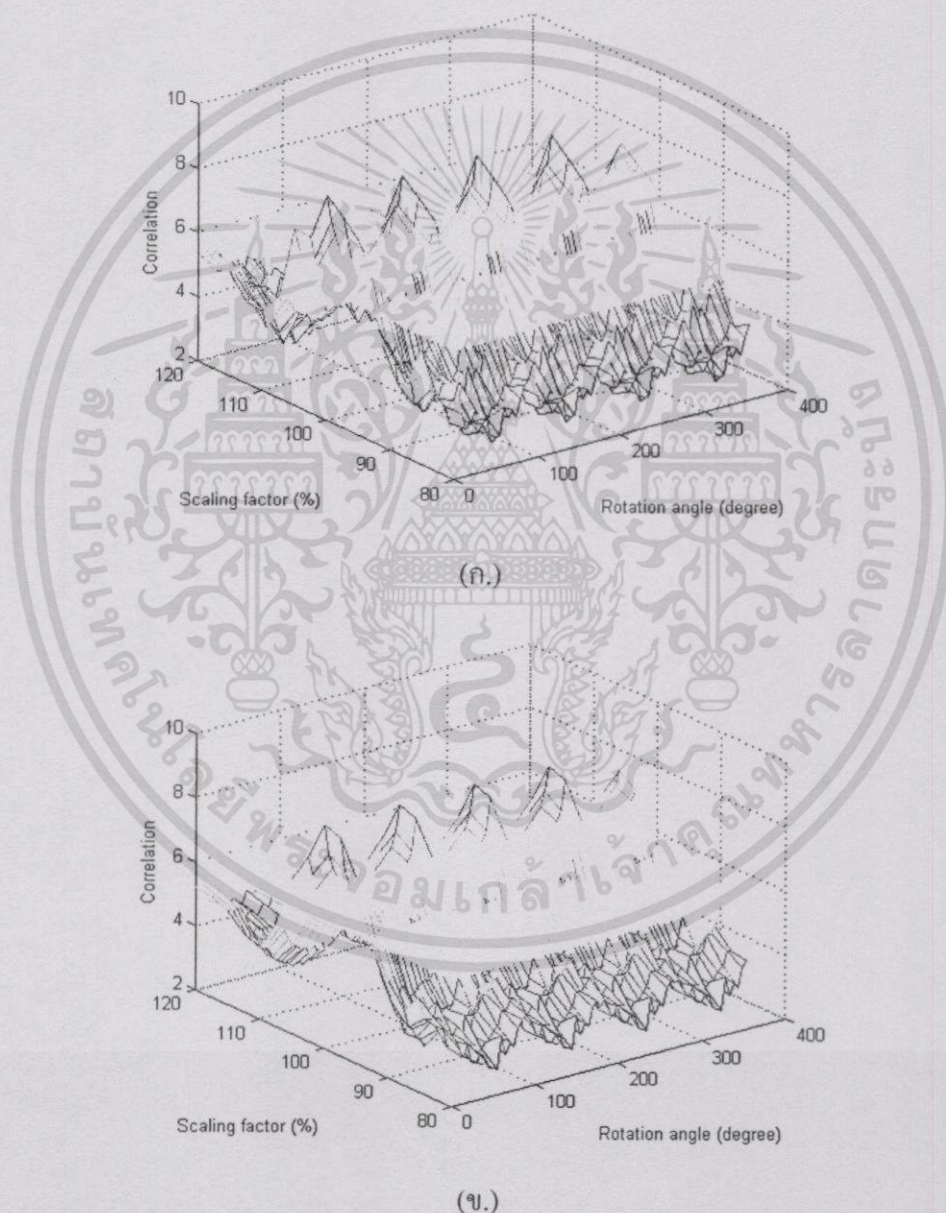


รูปที่ 5.5 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองปรับขนาดรูปภาพตั้งแต่ 80% จนถึง 120%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

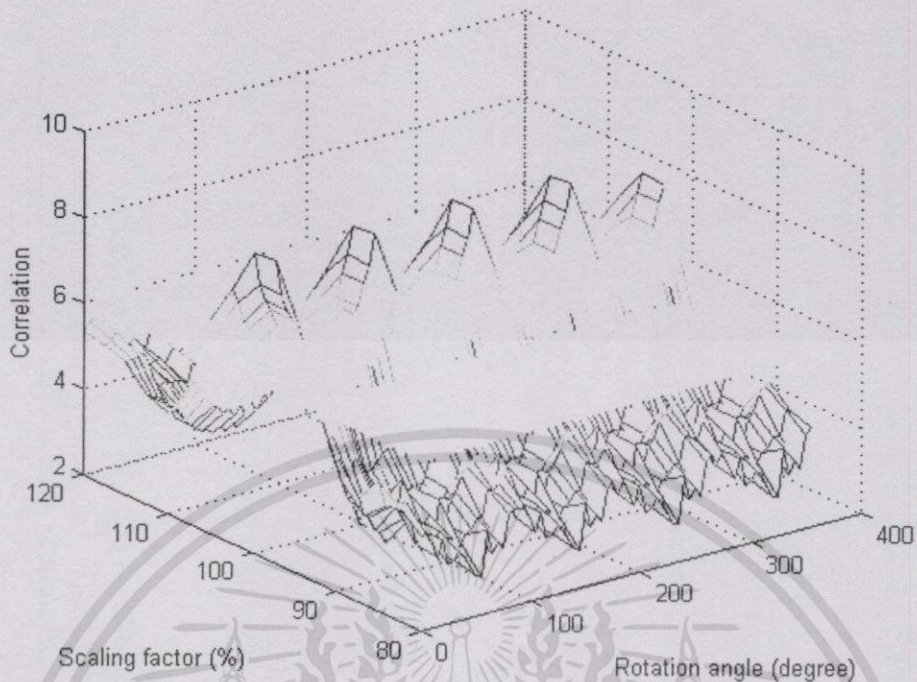
## 5.4 การทดสอบความทนทานต่อการหมุนและการปรับขนาดของรูปภาพ

การทดลองนี้เป็น การทดสอบความทนทานของลายน้ำดิจิทัลต่อกระบวนการหมุนและการปรับขนาดของรูปภาพพร้อมๆกัน โดยได้ทำการหมุนรูปภาพไปครั้งละ 5 องศา ตั้งแต่ 0 จนถึง 355 องศา ซึ่งแต่ละมุมที่ทำการหมุนไปนั้นก็ ได้ทำการปรับขนาดรูปภาพไปพร้อมๆกันครั้งละ 2.5% ตั้งแต่ 80% จนถึง 120% โดยมีการประมาณเพื่อหาค่าที่ขาดหายโดยใช้อัลกอริทึม 3 แบบข้างต้น จากนั้นทำการตรวจสอบลายน้ำดิจิทัลที่ปรากฏอยู่ในรูปภาพ รูปที่ 5.6 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองดังกล่าว



รูปที่ 5.6 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองหมุนรูปภาพตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศาพร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% จนถึง 120% ที่ทุกมุมของการทดลอง โดยใช้การประมาณค่าขาดหาย (ก.) Nearest neighbor interpolation (ข.) Bilinear interpolation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



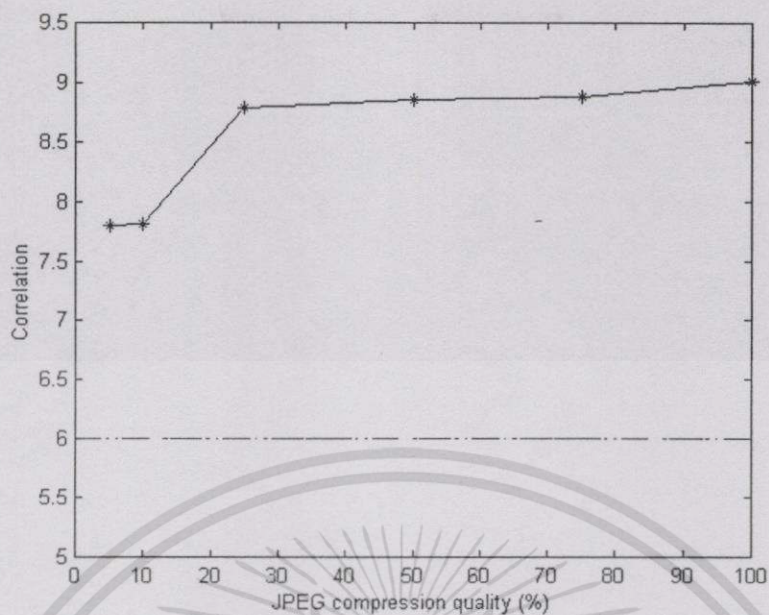
(ก.)

รูปที่ 5.6 (ต่อ) (ก.) ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองหมุนรูปภาพตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศาพร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% จนถึง 120% ที่ทุกมุมของการทดลอง โดยใช้การประมาณค่าขาดหาย (ค.) Bicubic interpolation

จากผลลัพธ์ดังกล่าวพบว่ากราฟของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกับกราฟของการหมุนรูปภาพในรูปที่ 5.3 และการปรับขนาดของรูปภาพในรูปที่ 5.5 ตัวอย่างเช่น กรณีของการปรับขนาดของรูปภาพไป 95% ที่มุม 0 องศาจะได้ค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 8.0385 โดยเมื่อเทียบกับรูปภาพที่มุมเดียวกันก่อนที่จะทำการปรับขนาดซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.0106 ค่าสหสัมพันธ์จะลดลงมาเหลือประมาณ 89.21% ในขณะที่การทดลองนี้ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการปรับขนาดที่ 95% ด้วยมุม 45 องศา มีค่าเท่ากับ 6.0812 โดยเมื่อเทียบกับรูปภาพที่มุมเดียวกันก่อนทำการหมุนซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.7561 ค่าสหสัมพันธ์จะลดลงมาเหลือประมาณ 90.01%

## 5.5 การทดสอบความทนทานต่อการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG

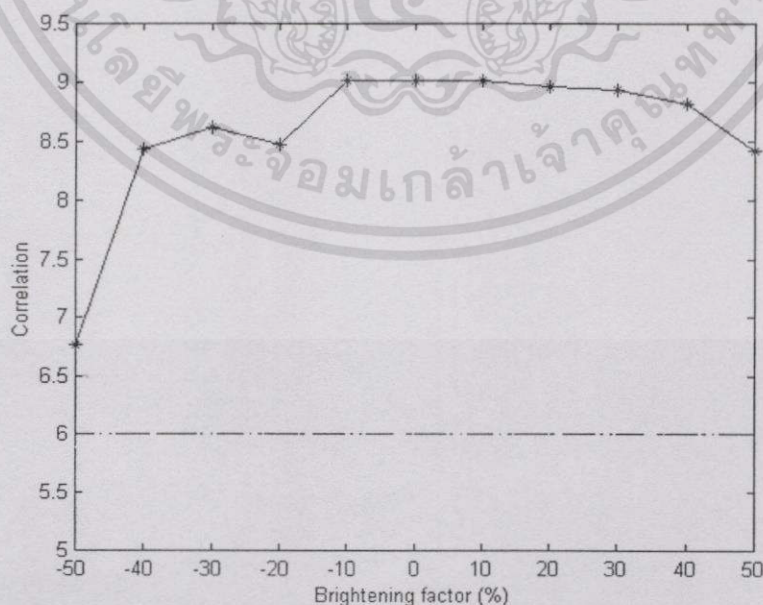
ในการทดลองนี้ได้ทำการบีบอัดรูปภาพด้วยอัลกอริทึมของ JPEG ที่ระดับคุณภาพที่ 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, และ 100% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ รูปที่ 5.7 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับคุณภาพ พบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลได้อย่างถูกต้องทุกระดับคุณภาพ



รูปที่ 5.7 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองบีบอัดรูปด้วยคุณภาพที่ระดับต่างๆ

### 5.6 การทดสอบความทนทานต่อการปรับความสว่าง

ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับความสว่างของรูปภาพ ตั้งแต่ -50% ไปจนถึง 50% โดยปรับความสว่างไปครั้งละ 10% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ รูปที่ 5.8 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับความสว่าง พบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลได้อย่างถูกต้องทุกการทดลองข้างต้น

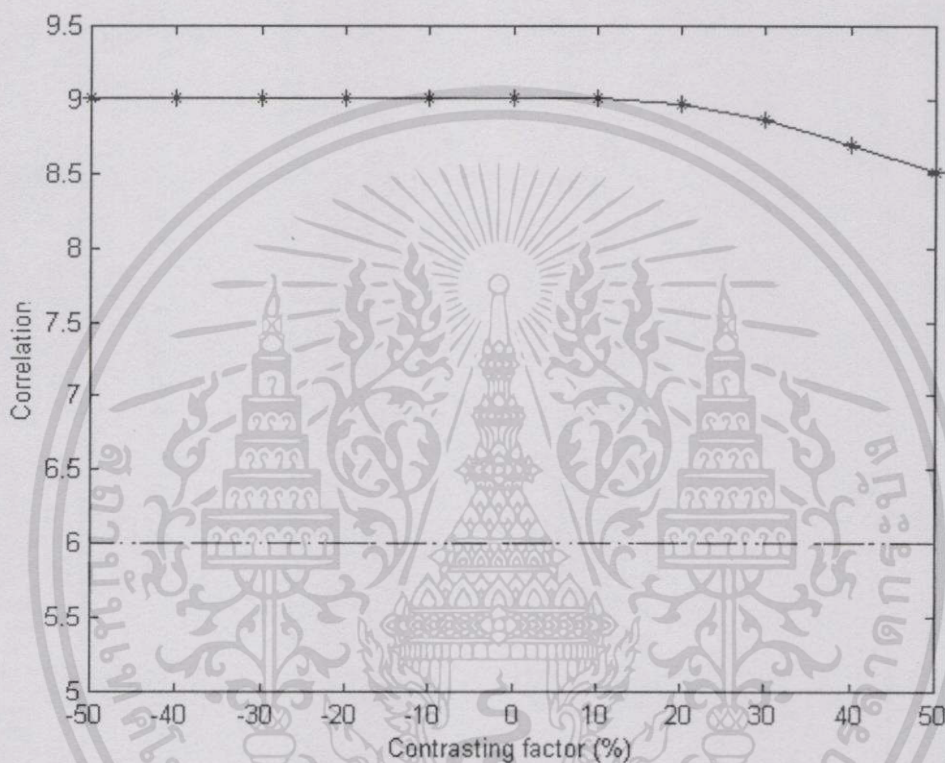


รูปที่ 5.8 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการปรับความสว่างตั้งแต่ -50% จนถึง 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.7 การทดสอบความทนทานต่อการปรับการตัดกันของสี

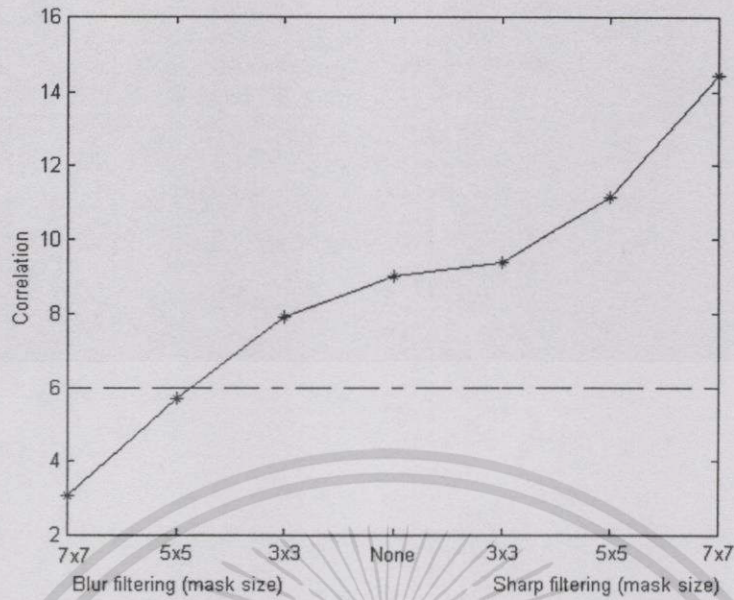
ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับการตัดกันของสี (Contrast adjustment) ภายในรูปภาพตั้งแต่ -50% ไปจนถึง 50% โดยปรับไปครั้งละ 10% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพรูปที่ 5.9 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับการตัดกันของสี พบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลได้อย่างถูกต้องทุกการทดลองข้างต้น



รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองปรับการตัดกันของสีตั้งแต่ -50% จนถึง 50%

### 5.8 การทดสอบความทนทานต่อการปรับคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์

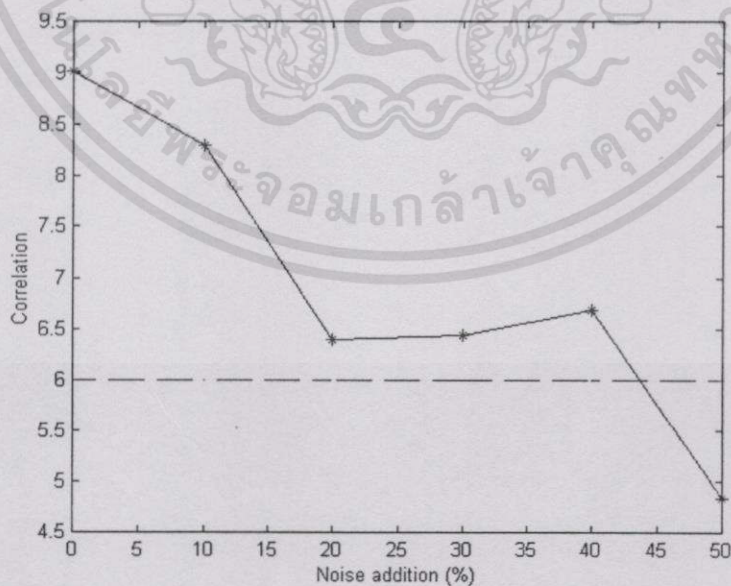
การทดลองนี้เป็นการทดสอบความทนทานของลายน้ำดิจิทัลต่อกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ โดยได้ทำการทดลองใน 2 ลักษณะ คือทำการปรับรูปภาพให้มัว และทำการปรับรูปภาพให้คมชัดขึ้น [1] โดยใช้ฟิลเตอร์ที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.2.3 ซึ่งกำหนดให้ฟิลเตอร์มีขนาดต่างๆ ได้แก่  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  และ  $7 \times 7$  ตามลำดับ รูปที่ 5.10 แสดงผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจสอบหาลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในรูปภาพดังกล่าว



รูปที่ 5.10 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองปรับคุณภาพของรูปภาพให้มืดและคมชัดขึ้นโดยใช้ฟิลเตอร์ที่ขนาดต่างๆ

### 5.9 การทดสอบความทนทานต่อสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพ

ในการทดลองนี้ได้ทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพแบบ Salt and pepper [18, 20] ไปครั้งละ 10% ตั้งแต่ 10% จนถึง 50% แล้วทำการตรวจหาสายน้ำคิติดอลที่อยู่ภายในรูปภาพ รูปที่ 5.11 แสดงผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองดังกล่าว



รูปที่ 5.11 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพตั้งแต่ 10% ไปจนถึง 50%

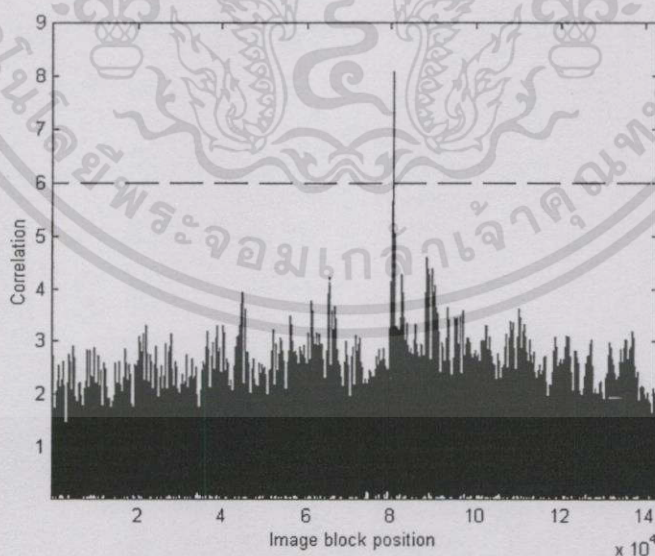
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.10 การทดสอบความทนทานภายหลังการพิมพ์และการสแกนรูปภาพ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความทนทานของลายน้ำดิจิทัลต่อกระบวนการแปลงสัญญาณรูปภาพจากดิจิทัลไปสู่อนาล็อก (Digital to analog) โดยการพิมพ์รูปภาพด้วยความละเอียด  $64 \times 64$  พิกเซลต่อนิ้วออกทางเครื่องพิมพ์ที่มีความละเอียด  $600 \times 600$  จุดต่อนิ้ว จากนั้นทำการแปลงรูปภาพดังกล่าวซึ่งมีลักษณะเป็นรูปภาพต่อเนื่องให้อยู่ในรูปของรูปภาพดิจิทัล (Analog to digital) โดยการสแกนรูปภาพกลับเข้ามาด้วยความละเอียด  $64 \times 64$  จุดต่อนิ้ว<sup>3</sup> ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 รูปภาพ "Lenna" ภายหลังจากที่ถูกพิมพ์และถูกสแกนกลับเข้ามา



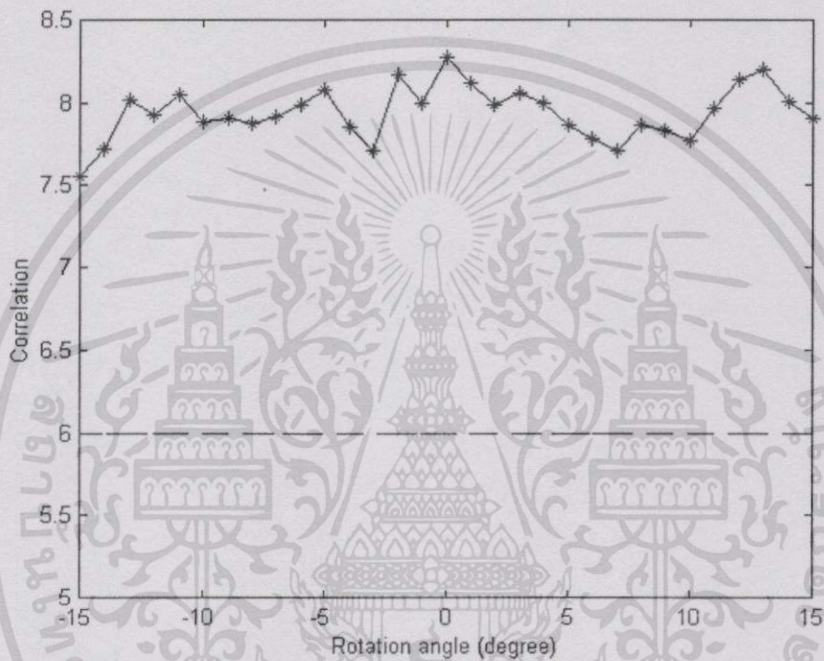
รูปที่ 5.13 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการพิมพ์และสแกนรูปภาพกลับเข้ามา

<sup>2</sup> เครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องพิมพ์แบบเลเซอร์ยี่ห้อ Fujitsu รุ่น FJPP 14V (มีอายุการใช้งานมาประมาณ 2 ปี)

<sup>3</sup> เครื่องสแกนเนอร์ที่ใช้ในการทดลองยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น ScanJet 4C (มีอายุการใช้งานมาประมาณ 4 ปี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในรูปภาพ รูปที่ 5.13 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลดังกล่าว ซึ่งพบว่าลายน้ำดิจิทัลยังคงสามารถถูกตรวจพบได้อย่างถูกต้อง จากนั้นได้ทำการทดลองสแกนรูปภาพโดยจัดวางรูปภาพให้เอียงทำมุมเล็กน้อย ตั้งแต่  $-15$  องศา ไปจนถึง  $15$  องศา ซึ่งช่วงของการเอียงดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้จากการจัดวางรูปภาพที่ไม่ตรงในกระบวนการสแกนรูปภาพทั่วไป รูปที่ 5.14 แสดงผลที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลภายในรูปภาพดังกล่าว



รูปที่ 5.14 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการพิมพ์และสแกนรูปภาพกลับเข้ามา โดยมีการจัดวางให้รูปภาพเอียงทำมุมที่องศาต่างๆ

### 5.11 การทดสอบความทนทานต่อการตัดรูปภาพ

ในหัวข้อที่ 4.5 ได้กล่าวถึงวิธีการเพิ่มความคงทนของลายน้ำดิจิทัลโดยการจัดวางลายน้ำดิจิทัลให้ครอบคลุมตลอดทั้งภาพในลักษณะต่างๆ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความคงทนต่อทั้งกระบวนการตัดเอาบางส่วนของรูปภาพทิ้งไปและยังสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแก้ไขที่เกิดขึ้นบนสื่อรูปภาพด้วย

รูปแบบของการจัดวางลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอในหัวข้อดังกล่าวมีอยู่ 3 ลักษณะด้วยกัน คือ การวางลายน้ำดิจิทัลโดยกำหนดลายน้ำดิจิทัลให้มีขนาดพอดีกับภาพ, การวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วตลอดทั้งภาพ และการวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันโดยมีการซ้อนกันเพื่อลดช่องว่างที่เกิดขึ้น

### 5.11.1 การวางลายน้ำดิจิทัลโดยกำหนดลายน้ำดิจิทัลให้มีขนาดพอดีกับรูปภาพ

ในการทดลองนี้เราได้สร้างแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิทัล  $A_2$  และ  $B_2$  โดยกำหนดให้  $R = 252$ ,  $P_A = 7$ ,  $P_B = 5$ ,  $Q_A = 6$ ,  $\omega = 32$  และ  $R_S = 3$  ซึ่งจากการคำนวณหาความเข้มที่เหมาะสมของลายน้ำดิจิทัล ในการทดลองนี้เราให้  $\alpha = 0.0470$  จากนั้นทำการตัดบริเวณรอบนอกของรูปภาพออกไป เหลือไว้เฉพาะบริเวณศูนย์กลางของรูปภาพที่มีขนาด  $384 \times 384$  พิกเซล (ประมาณ 56.25% ของรูปภาพเดิม) ดังรูปที่ 5.15 (ก.) ซึ่งผลจากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลพบว่ายังคงสามารถถูกตรวจพบได้ โดยมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 6.4388



(ก.)

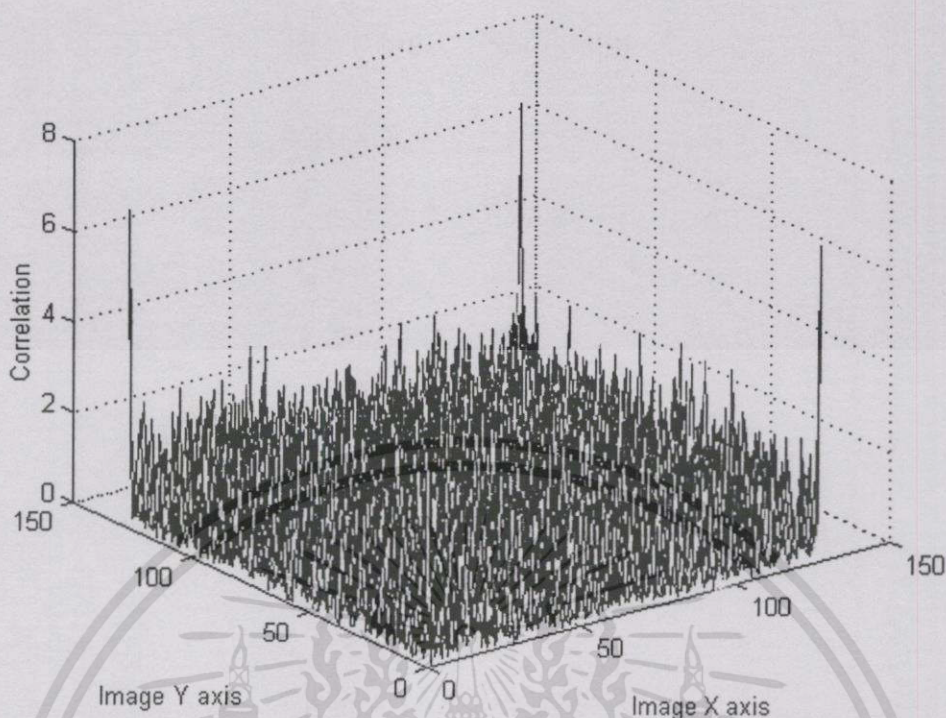
(ข.)

(ค.)

รูปที่ 5.15 รูปภาพ “Lenna” ซึ่งภายในกรอบสี่เหลี่ยมคือบริเวณที่ถูกตัดให้เหลือขนาด (ก.)  $384 \times 384$  พิกเซล (ข.)  $256 \times 256$  พิกเซล (ค.)  $128 \times 128$  พิกเซล

### 5.11.2 การวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วตลอดทั้งภาพ

ในการทดลองนี้เราได้สร้างแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิทัล  $A_3$  และ  $B_3$  โดยกำหนดให้  $R = 60$ ,  $P_A = 7$ ,  $P_B = 5$ ,  $Q_A = 6$ ,  $\omega = 32$  และ  $R_S = 3$  โดยจัดวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วตลอดทั้งรูปภาพ จากนั้นทำการตัดบริเวณรอบนอกของรูปภาพออกไป เหลือไว้เฉพาะบริเวณศูนย์กลางของรูปภาพที่มีขนาด  $256 \times 256$  พิกเซล (ประมาณ 25% ของรูปภาพเดิม) ดังรูปที่ 5.15 (ข.) โดยลายน้ำดิจิทัลยังคงสามารถถูกตรวจพบได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพ ณ ตำแหน่งต่างๆของรูปภาพที่มีการจัดวางลายน้ำดิจิทัลอย่างต่อเนื่องภายหลังจากที่รูปภาพตัดเอาบางส่วนทิ้งไป

### 5.11.3 การวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันโดยมีการซ้อนกัน

ในการทดลองนี้ใช้ลายน้ำดิจิทัล  $A_3$  และ  $B_3$  โดยในการทดลองนี้ได้ทำการวางลายน้ำดิจิทัลอย่างต่อเนื่องตามแนวนอนและแนวตั้งตลอดทั่วทั้งภาพ โดยมีการวางซ้อนกันที่บริเวณรอยต่อระหว่างลายน้ำดิจิทัลเพื่อลดช่องว่างที่เกิดขึ้นด้วย จากนั้นทำการตัดเอาบริเวณรอบนอกออกจนเหลือไว้เฉพาะส่วนกลางของรูปภาพที่มีขนาด  $128 \times 128$  (ประมาณ 6.25% ของรูปภาพเดิม) ดังรูปที่ 5.15 (ค.) แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในรูปภาพ ซึ่งแม้ว่ารูปภาพจะสูญเสียรายละเอียดภายในภาพไปเป็นจำนวนมาก แต่ลายน้ำดิจิทัลก็ยังคงสามารถถูกตรวจพบได้อย่างถูกต้อง โดยค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 6.9922

## 5.12 การตรวจสอบการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขของรูปภาพ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแก้ไขของรูปภาพที่เกิดขึ้นโดยเจตนา โดยทำการซ้อนลายน้ำดิจิทัลโดยใช้วิธีการจัดวางลายน้ำดิจิทัลทั้ง 3 แบบซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.5 แล้วทำการปลอมแปลงรูปภาพโดยทำการแก้ไขรายละเอียดภายในรูปภาพเล็กน้อยเพื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแก้ไขนั้น

### 5.12.1 การวางลายน้ำดิจิทัลโดยกำหนดลายน้ำดิจิทัลให้มีขนาดพอดีกับรูปภาพ

ในการทดลองนี้ใช้แพตเทิร์นของลายน้ำดิจิทัล  $A_2$  และ  $B_2$  ซึ่งจากการคำนวณหาความเข้มที่เหมาะสมของลายน้ำดิจิทัล ในการทดลองนี้เราให้  $\alpha = 0.0267$  รูปที่ 5.17 (ก.) แสดงรูปภาพ “Lenna” ที่ถูกซ่อนด้วยลายน้ำดิจิทัลดังกล่าว โดยได้นำรูปภาพนี้มาทำการปลอมแปลงโดยการเพิ่มรูปรอยสักไว้ที่ต้นแขนด้านขวาของผู้หญิงภายในรูปภาพ ดังปรากฏในรูปที่ 5.17 (ข.)



(ก.)

(ข.)

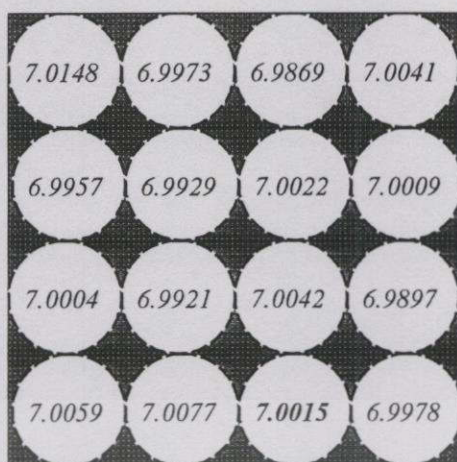
รูปที่ 5.17 (ก.) รูปภาพ “Lenna” ที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัลโดยการกำหนดลายน้ำดิจิทัลให้มีขนาดพอดีกับรูปภาพ และ (ข.) รูปภาพเดียวกันภายหลังจากที่ทำการปลอมแปลง

ค่าสหสัมพันธ์ก่อนการเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับ 6.5000 โดยภายหลังจากที่ทำการปลอมแปลงรูปภาพแล้ว พบว่าค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าต่ำลงเล็กน้อยคือ 5.8911 ซึ่งจากผลลัพธ์ดังกล่าวทำให้สามารถพิสูจน์ได้ว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมา

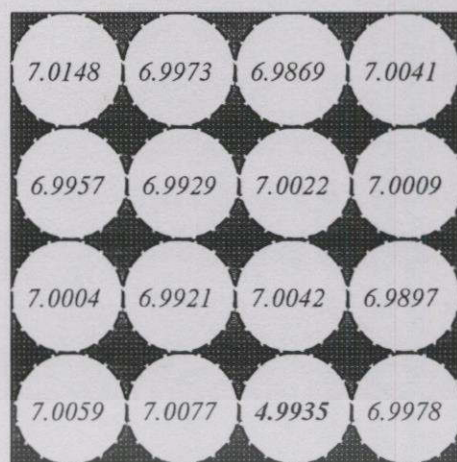
### 5.12.2 การวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วตลอดทั้งภาพ

ในการทดลองนี้ใช้แพตเทิร์นของลายน้ำดิจิทัล  $A_3$  และ  $B_3$  โดยจัดวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันไปตามแนวนอนและแนวตั้งให้ทั่วตลอดทั้งรูปภาพ แล้วทำการปลอมแปลงรูปภาพในลักษณะเช่นเดียวกับในหัวข้อที่แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลภายในรูปภาพก่อนการปลอมแปลงพบว่าค่าสหสัมพันธ์ ณ ตำแหน่งที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่จะมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 7.0000) โดยภายหลังจากที่ทำการปลอมแปลงรูปภาพดังกล่าวแล้วปรากฏว่าค่าสหสัมพันธ์ของลายน้ำดิจิทัลที่บริเวณที่มีการปลอมแปลงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้ในตำแหน่งอื่นๆมาก ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งจากผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้เราสามารถระบุได้ว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขที่บริเวณข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)

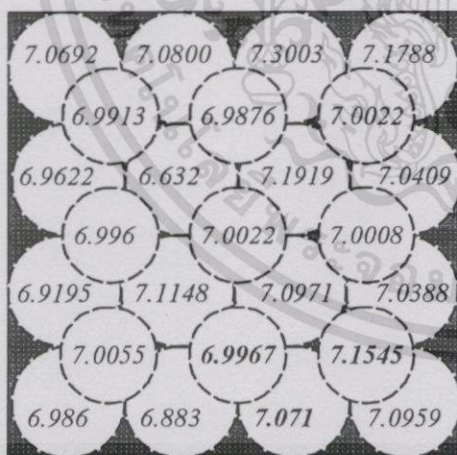


(ข.)

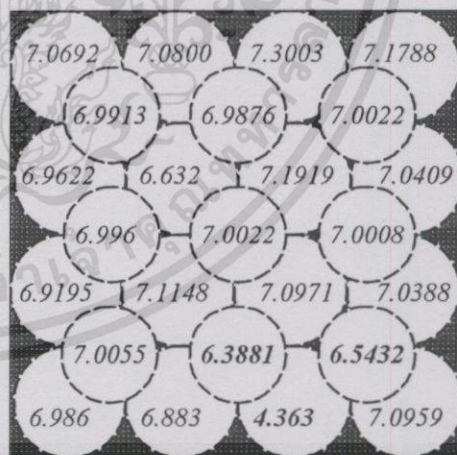
รูปที่ 5.18 ค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ (ก.) ก่อนการปลอมแปลง (ข.) หลังการปลอมแปลง

### 5.12.3 การวางลายน้ำดิจิทัลต่อเนื่องกันโดยมีการซ้อนกัน

ในการทดลองนี้ใช้ลายน้ำดิจิทัล  $A_3$  และ  $B_3$  โดยในการทดลองนี้ได้ทำการวางลายน้ำดิจิทัลอย่างต่อเนื่องตามแนวนอนและแนวตั้งตลอดทั่วทั้งภาพ โดยมีการวางซ้อนกันที่บริเวณรอยต่อระหว่างลายน้ำดิจิทัลเพื่อลดช่องว่างที่เกิดขึ้นด้วย จากนั้นได้ทำการปลอมแปลงรูปภาพดังกล่าวในลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.12.1



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 5.19 ค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ (ก.) ก่อนการปลอมแปลง (ข.) หลังการปลอมแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.19 แสดงผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาหลายน้ำดิจิตอลภายในรูปภาพ โดยค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพบริเวณที่มีการปลอมแปลงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้ในตำแหน่งอื่นๆมาก นอกจากนี้แล้วยังส่งผลให้หลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ข้างเคียงอีก 2 อันมีค่าต่ำลงเล็กน้อยอีกด้วย ซึ่งจากผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ข้างต้นทำให้เราสามารถระบุได้ว่ารูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขที่บริเวณดังกล่าว

### 5.13 การทดสอบต่อรูปภาพอื่นๆ

จากการทดลองกับรูปภาพอื่นๆเพิ่มเติมอีก 10 รูป พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ผ่านมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การเลือกขนาดและระดับความเข้มของหลายน้ำดิจิตอลที่จะซ่อนลงในรูปภาพ โดยหลายน้ำดิจิตอลที่มีขนาดใหญ่จะมีความคงทนต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพทั้งรูปได้มากกว่าหลายน้ำดิจิตอลขนาดเล็ก แต่สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับรูปภาพเป็นบริเวณเล็กๆแล้ว การกระจายหลายน้ำดิจิตอลให้ตลอดทั่วทั้งภาพจะทำให้หลายน้ำดิจิตอลมีความคงทนมากกว่า ซึ่งการกระจายในลักษณะดังกล่าวจะเป็นผลทำให้หลายน้ำดิจิตอลมีขนาดเล็กลงด้วย ตารางที่ 5.1 แสดงค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาหลายน้ำดิจิตอลในรูปภาพดังกล่าว (รูปภาพทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ก.)

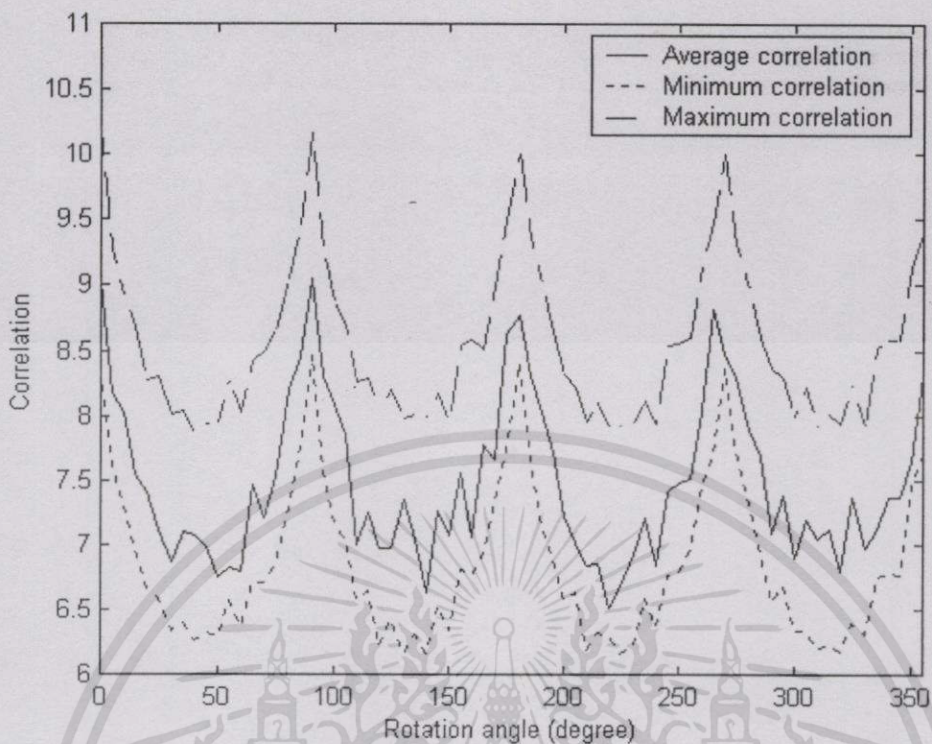
ตารางที่ 5.1 ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาหลายน้ำดิจิตอลในรูปภาพต่างๆ

รูปภาพ	ค่าสหสัมพันธ์
<i>Baboon</i>	8.6749
<i>Building</i>	9.0284
<i>Camera man</i>	8.9245
<i>Flowers</i>	9.4441
<i>Gene</i>	8.9089
<i>Honda racing</i>	9.2104
<i>Kids</i>	9.0884
<i>Kiss</i>	8.9127
<i>Lenna</i>	9.1483
<i>Trees</i>	9.1255

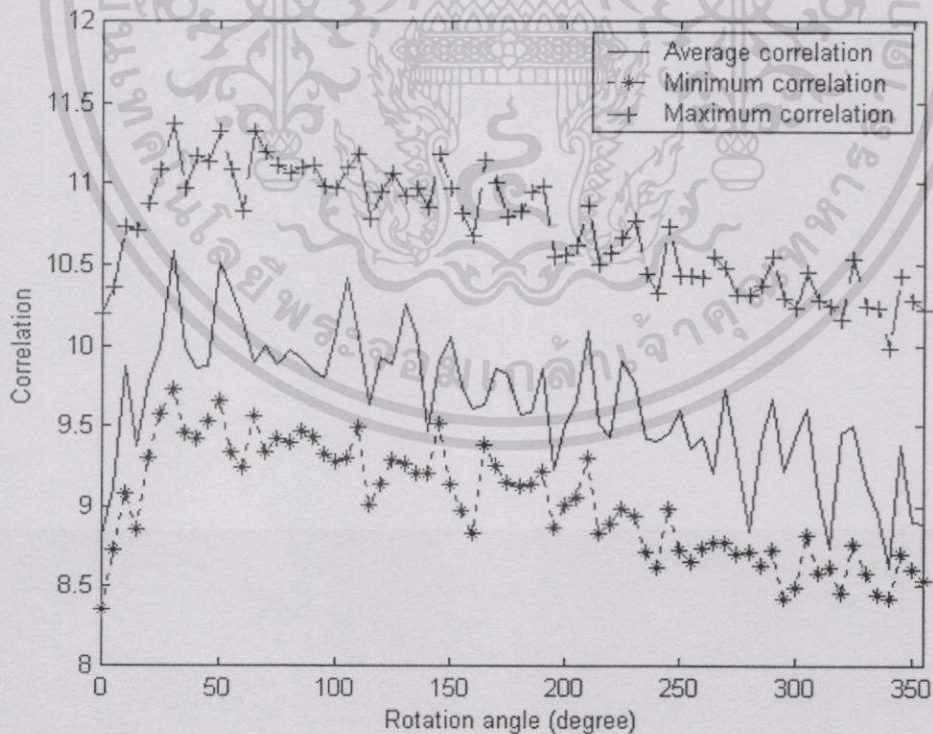
ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยที่ได้จากการตรวจหาหลายน้ำดิจิตอลในรูปภาพทั้ง 10 รูปดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 9.04660

นอกจากนี้แล้ว เรายังได้ทำการทดลองกับกระบวนการแปลงแบบต่างๆอีก อันได้แก่การหมุน, การหมุนซ้ำ, การปรับขนาด และการหมุนไปพร้อมๆกับการปรับขนาด โดยใช้การประมาณค่าขาดหายแบบ Bicubic รูปที่ 5.20-5.25 แสดงค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองดังกล่าว นอกจากนี้แล้วยังได้ทดลองพิมพ์ภาพและสแกนกลับเข้ามา โดยใช้ความละเอียดในการพิมพ์และการสแกนเท่ากับในการทดลองในหัวข้อที่ 5.10 ผลการทดลองดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

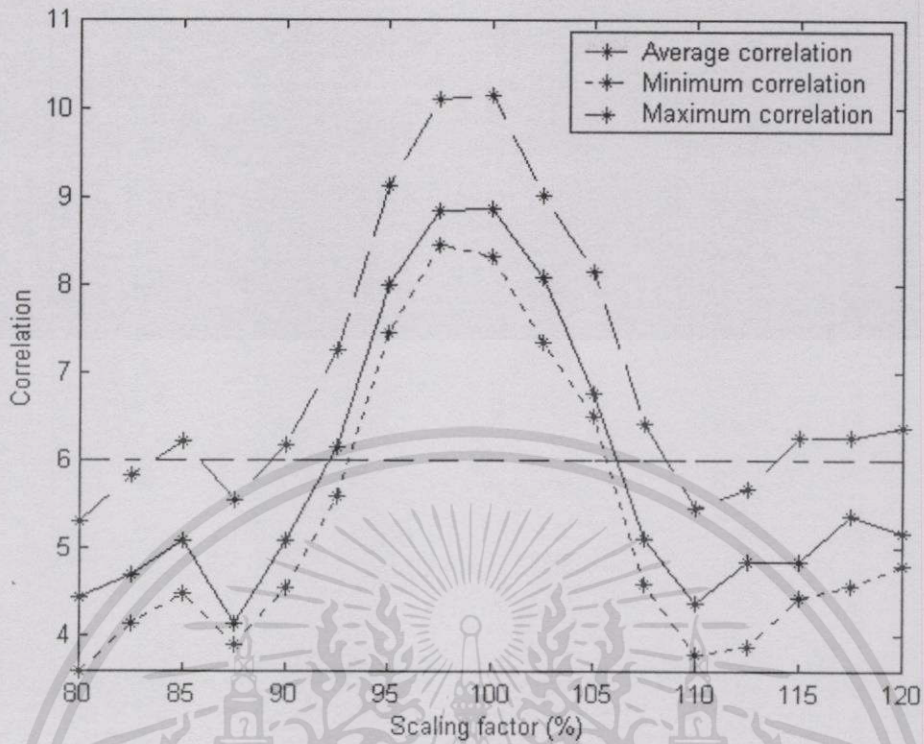


รูปที่ 5.20 ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่มุมที่ 0 ไปจนถึง 355 องศา

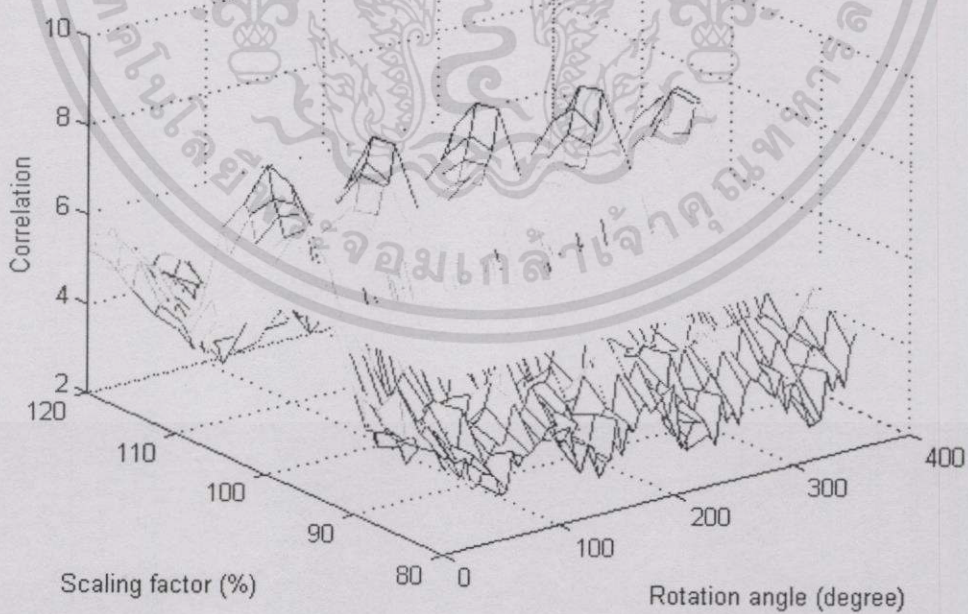


รูปที่ 5.21 ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆจำนวน 10 ภาพซ้ำ ตั้งแต่มุมที่ 0 ไปจนถึง 355 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

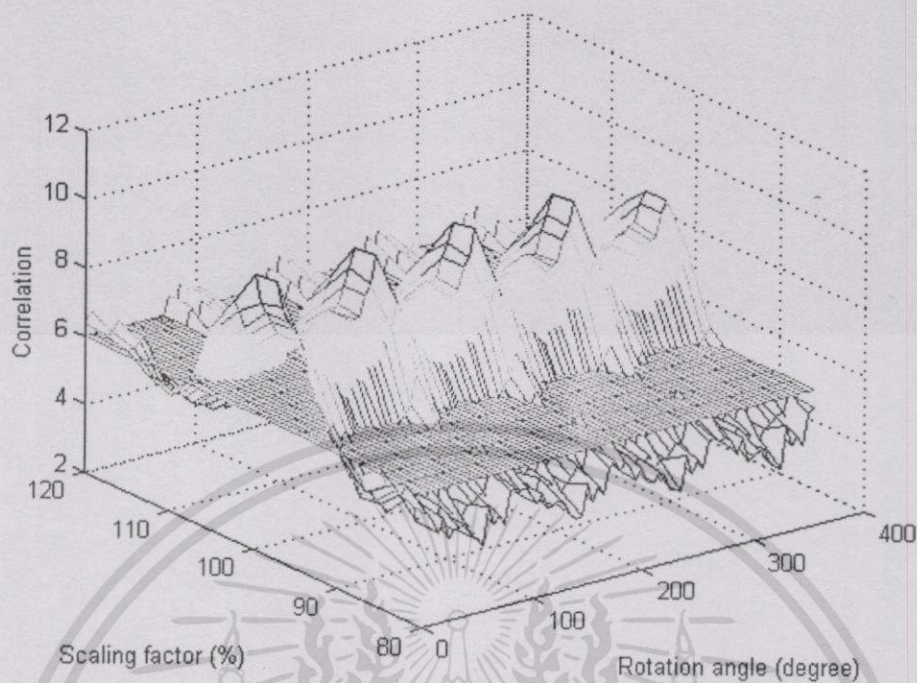


รูปที่ 5.22 ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยจากการทดลองปรับขนาดรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%

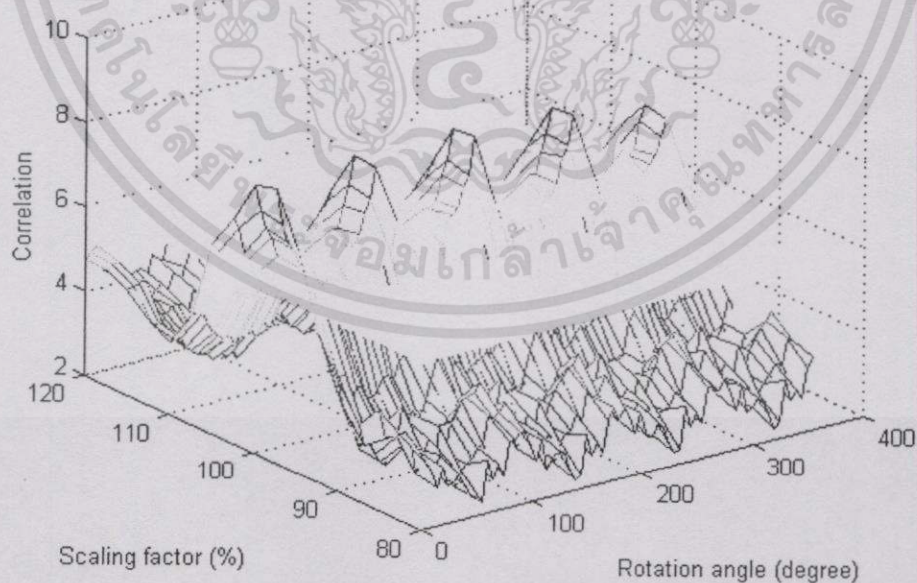


รูปที่ 5.23 ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 355 องศาพร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 ค่าสหสัมพันธ์สูงสุดจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 355 องศา พร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%



รูปที่ 5.25 ค่าสหสัมพันธ์ต่ำสุดจากการทดลองหมุนรูปภาพต่างๆ ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 355 องศา พร้อมกับปรับขนาดไปตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลในรูปภาพต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการพิมพ์และการสแกนรูปภาพ

รูปภาพ	ค่าสหสัมพันธ์
<i>Baboon</i>	7.0162
<i>Building</i>	7.0069
<i>Camera man</i>	9.8449
<i>Flowers</i>	6.7662
<i>Gene</i>	6.6698
<i>Honda racing</i>	6.2856
<i>Kids</i>	7.0141
<i>Kiss</i>	6.1145
<i>Lenna</i>	6.4544
<i>Trees</i>	7.1374

ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 7.0130 ซึ่งลายน้ำดิจิทัลสามารถตรวจพบได้อย่างถูกต้องในทุกรูปภาพ

อย่างไรก็ดี ในการพิจารณาเลือกความเข้มของลายน้ำดิจิทัลนั้น การเลือกลายน้ำดิจิทัลที่มีความเข้มมาก จะทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความคงทนต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกสังเกตเห็นได้ง่ายขึ้นด้วย และในทางกลับกัน การกำหนดลายน้ำดิจิทัลที่มีความเข้มน้อยๆจะทำให้เป็นที่สังเกตเห็นได้น้อยลง แต่ก็จะเป็นผลให้ความคงทนของลายน้ำดิจิทัลน้อยลงด้วย [2]

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลซึ่งมีความทนทานต่อกระบวนการหมุนและการปรับขนาดที่กระทำกับรูปภาพที่มีลายน้ำซ่อนอยู่ วิธีการดังกล่าวเป็นการประยุกต์เอาเทคนิคการมอดูเลชันในกระบวนการสื่อสารแบบ Spread spectrum technique ซึ่งมีความคงทนสูงมาใช้ โดยกระทำในโดเมนของรูปภาพ ซึ่งกำหนดแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิทัลให้มีลักษณะเป็นวงแหวน โดยการใช้ฟังก์ชัน Cosine และ Complex exponential ในการสร้างแพตเทิร์นสำหรับการซ่อนและการตรวจหา ซึ่งจากการพิสูจน์ในเชิงคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิทัลดังกล่าวสามารถตรวจหาได้โดยไม่ขึ้นกับกระบวนการหมุนใดๆของรูปภาพ ตลอดจนทำการปรับปรุงแพตเทิร์นให้มีความทนทานต่อกระบวนการปรับขนาดโดยการกำหนดขนาดของวงแหวนให้แตกต่างกันในแพตเทิร์นทั้งสองดังกล่าว อันเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลของวิธีการนี้มีความคงทนต่อกระบวนการปรับขนาดในช่วงแคบๆ (ประมาณ  $\pm 5\%$  หรือประมาณ 95% ถึง 105% ของรูปภาพเดิม) ซึ่งการปรับขนาดที่ระดับดังกล่าวมักเกิดขึ้นจากกระบวนการพิมพ์และการสแกนของรูปภาพ

ในงานวิจัยนี้ยังได้เสนอวิธีการทางการสร้างแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิทัลดังกล่าวในทางปฏิบัติ รวมทั้งแนวทางการพิจารณาเลือกค่าความเข้มของลายน้ำดิจิทัล และการพิจารณาเลือกตำแหน่งภายในรูปภาพที่จะทำการซ่อน ตลอดจนการประยุกต์เอาลายน้ำดิจิทัลมาใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแก้ไขของรูปภาพ โดยเสนอรูปแบบการจัดวางลายน้ำดิจิทัล 3 รูปแบบ ซึ่งการจัดวางดังกล่าวยังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความคงทนต่อกระบวนการตัดเอาบางส่วนของรูปภาพทิ้งไปได้อีกด้วย

จากผลการทดลองในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิทัลมีความคงทนต่อกระบวนการหมุนและการปรับขนาดได้ โดยลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ในทุกๆมุมที่รูปภาพถูกหมุนไป และที่การปรับขนาดในช่วงแคบๆ (ประมาณ  $\pm 5\%$ ) ตลอดจนเมื่อทำการหมุนรูปภาพซ้ำ และการหมุนและการปรับขนาดไปพร้อมๆกัน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติมต่อกระบวนการแปลงแบบอื่นๆ รวมทั้งยังได้ทดสอบการนำลายน้ำดิจิทัลมาใช้เพื่อตรวจสอบว่ารูปภาพได้มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมาก่อนหรือไม่อีกด้วย ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาพบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลที่ถูกซ่อนอยู่ได้อย่างถูกต้อง (ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าเกิน 6) โดยที่ไม่ต้องมีการผันกลับกระบวนการแปลงใดๆหรือใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลแต่อย่างใด

## 6.2 บทวิเคราะห์

เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ไม่ผันแปรตามกระบวนการแปลงต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน [12] ในแง่ของความซับซ้อนในการคำนวณ เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวกระทำในโดเมนความถี่ ในขณะที่ฟอร์แมตของการจัดเก็บภาพหลายแบบจัดเก็บในโดเมนของรูปภาพปกติ รวมทั้งรูปภาพธรรมชาติ ซึ่งเมื่อทำการสแกนเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว ในเบื้องต้นจะอยู่ในโดเมนของรูปภาพ ทำให้จำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อแปลงไปมาระหว่างโดเมนรูปภาพกับโดเมนความถี่ หรือแม้กระทั่งการจัดเก็บรูปภาพในบางฟอร์แมต เช่น JPEG ซึ่งมีการจัดเก็บอยู่ในรูปของโดเมนความถี่ก็ตาม แต่ทำการจัดเก็บโดยแบ่งรูปภาพออกเป็นบล็อกๆ ในขณะที่วิธีการดังกล่าวทำการแปลงรูปภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่โดยใช้รูปภาพทั้งภาพ ดังนั้นวิธีการนี้จึงจำเป็นต้องแปลงรูปภาพดังกล่าวให้อยู่ในโดเมนรูปภาพปกติก่อนแล้วจึงค่อยแปลงกลับมาอยู่ในโดเมนความถี่ที่มีขนาดของบล็อกเท่ากับขนาดของรูปภาพ เป็นเหตุให้เพิ่มความซับซ้อนในการคำนวณ นอกจากนี้แล้ว การแปลงให้อยู่ในพิกัดลอการิทึมเชิงขั้วยังทำให้เกิดการคำนวณเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย [15]

อีกประเด็นหนึ่งที่สำคัญคือ โดยหลักการของการซ่อนลายน้ำดิจิทัลนั้น เพื่อให้ลายน้ำดิจิทัลมีความคงทนมากที่สุดจะต้องทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงในรายละเอียดที่สำคัญของรูปภาพ เพื่อที่ว่าความพยายามที่จะทำลายลายน้ำดิจิทัลใดๆ จะเป็นผลทำให้คุณภาพของรูปภาพถูกทำลายไปด้วย [4] แต่เนื่องจากคุณสมบัติการไม่ขึ้นต่อกระบวนการเคลื่อนที่ใดๆของรูปภาพในส่วนของแมกนิจูดในโดเมนความถี่นั้น จึงเป็นข้อจำกัดทำให้เทคนิคใน [12] ต้องทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงในเฉพาะส่วนของแมกนิจูดเท่านั้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าข้อมูลที่สำคัญของรูปภาพต่างๆ (รายละเอียดต่างๆที่ก่อให้เกิดเป็นรูปภาพ) นั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนของเฟส ดังนั้นการที่เทคนิคดังกล่าวทำการซ่อนลงในเฉพาะในส่วนของแมกนิจูดซึ่งมีรายละเอียดของรูปภาพอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้ลายน้ำดิจิทัลของเทคนิคนี้มีความคงทนต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆได้น้อย ในขณะที่เทคนิคที่นำเสนอนี้ทำการซ่อนลงทั้งในส่วนของเฟสและแมกนิจูด ดังนั้นจึงน่าจะมีความคงทนต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์ดังกล่าวเป็นเพียงการวิเคราะห์เบื้องต้นเท่านั้น การสรุปผลที่ชัดเจนยังจำเป็นต้องมีการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบให้ชัดเจนยิ่งขึ้นต่อไป

### 6.3 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้คือ เนื่องจากเทคนิคที่นำเสนอนี้ทำการซ่อนลงทั้งในส่วนของเฟสและแมกนิจูด ซึ่งจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลเป็นที่สังเกตเห็นได้ง่ายกว่าการซ่อนลงเฉพาะในส่วนของแมกนิจูดเช่นในวิธีการของ [12] หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเทคนิคที่นำเสนอนี้อาจเหมาะสมสำหรับรูปภาพบางลักษณะเท่านั้น คือรูปภาพที่มีรายละเอียดค่อนข้างมาก หรือมีการเปลี่ยนแปลงที่ถี่และบ่อย สำหรับรูปภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย เช่นภาพวิวหรือภาพที่มีสีพื้นเป็นส่วนมากจะไม่เหมาะสำหรับวิธีการนี้

แนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆในการสร้างแพตเทิร์น ของลายน้ำดิจิทัล เช่นกำหนดขนาดของรัศมีให้มากขึ้น หรือความถี่ของแพตเทิร์นให้น้อยลงก็จะทำให้ลายน้ำดิจิทัลสามารถซ่อนตัวอยู่ในรูปภาพโดยเป็นที่สังเกตเห็นได้น้อยลง (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4.2)

สำหรับงานวิจัยเพิ่มเติมในอนาคตนั้น เป็นการทดลองสร้างลายน้ำดิจิทัลตามวิธีที่นำเสนอใน [12] เพื่อเปรียบเทียบ

- ความซับซ้อนในการคำนวณของวิธีการที่นำเสนอ กับวิธีการของ [12] ว่าเป็นไปตามที่วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 6.2 หรือไม่
- ทำการทดสอบความทนทานของรูปภาพต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1.] Gregory A. Baxes. **Digital image processing: Principles and applications.** John Wiley & Sons Inc. 1994.
- [2.] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu. "Techniques for data hiding." IBM Systems journal, vol. 35, No. 3&4, 1996. page 313-336.
- [3.] Kenneth R. Castleman. **Digital image processing.** Prentice-Hall incorporation. 1996.
- [4.] Ingemar J. Cox, Joe Kiliant, Tom Leighton, and Talal Shamoon. "Secure spread spectrum watermarking for multimedia." IEEE transactions on image processing, Vol. 6, No. 12, 1997. page 1673-1687.
- [5.] Scott Craver, Nasir Memon, Boon-Lock Yeo, and Minerva Yeung. "Can invisible watermark resolve rightful ownerships?" IBM Research report, July 25, 1996.
- [6.] Scott Craver, Nasir Memon, Boon-Lock Yeo, and Minerva Yeung. "Resolving rightful ownerships with invisible watermarking techniques: limitations, attacks, and implications." IEEE Journal of selected areas in communications, 1998.
- [7.] J.F. Delaigle, C. De Vleeschouwer, and B. Macq. "Digital Watermarking." In Conference 2659 - Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques, SPIE Electronic Imaging: science and technology, San Jose, February 1996. page 99-110.
- [8.] Jiri Fridrich. "Methods for data hiding." Center for intelligent systems & department of systems science and industrial engineering, SUNY Binghamton, Binghamton, NY 13902-6000, 1997. [http://ssie.binghamton.edu/~jirif/Research/meth\\_ps.zip](http://ssie.binghamton.edu/~jirif/Research/meth_ps.zip)
- [9.] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. **Digital image processing.** Addison-Wesley. 1997.
- [10.] James P. Keener. **Principles of applied mathematics: transformation and approximation.** Addison-Wesley. 1988.
- [11.] Ning Lu. **Fractal imaging.** Academic press. 1997.
- [12.] Joseph J. K. O'Ruanaidh, Thierry Pun. "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking.", Signal processing, vol. 66, 1998. page 303-317.
- [13.] Don Pearson. **Image processing.** McGraw-Hill. 1991.
- [14.] Fabien A. P. Petitcolas, Ross J. Anderson, and Markus G. Kuhn. "Attacks on copyright marking systems." In David Aucsmith, Ed., second workshop on information hiding, in

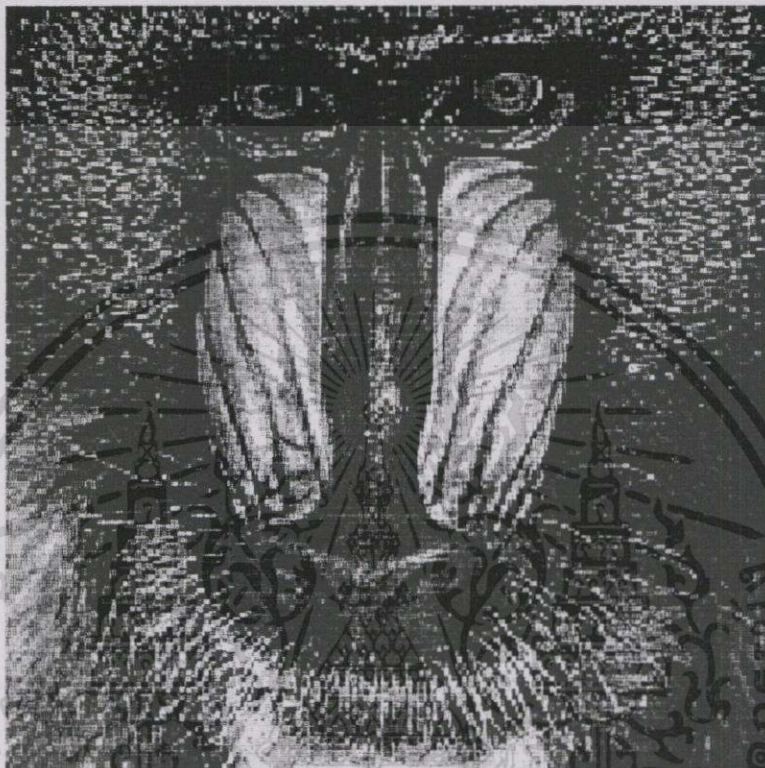
- vol. 1525 of lecture notes in computer science, Portland, Oregon, U.S.A., 14-17 April 1998. page 218-238.
- [15.] Piva, M. Barni, and F. Bartolini. "Copyright protection of digital images by means of frequency domain watermarking." in Mathematics of Data/Image Coding, Compression, and Encryption, Mark S. Schmalz ed., Proceedings of SPIE, vol. 3456, (S.Diego, CA), July, 21-22 1998. page. 25-35.
- [16.] William H. Press, et al. **Numerical recipes in Pascal: the art of scientific computing.** Cambridge University Press. 1992.
- [17.] John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis. **Digital signal processing : principles, algorithms, and applications.** Prentice-Hall international. 1996.
- [18.] John C. Russ. **The image processing handbook.** 2nd. CRC Press. 1995.
- [19.] Ken Steiglitz. **A DSP primer.** Addison-Wesley. 1996.
- [20.] Scott E. Umbaugh. **Computer vision and image processing: a practical approach using CVIPtools.** Prentice-Hall international. 1998.
- [21.] R. B. Wolfgang, C. I. Podilchuk, and E. J. Delp. "Perceptual Watermarks for Digital Images and Video." Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 7, July 1999. page 1108-1126.



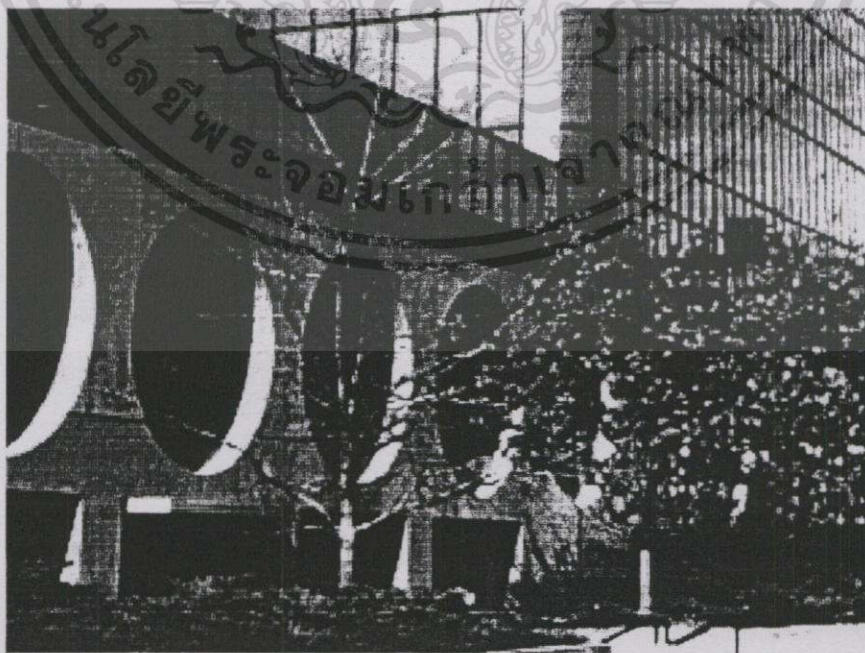
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

## รูปภาพที่ใช้ในการทดลอง

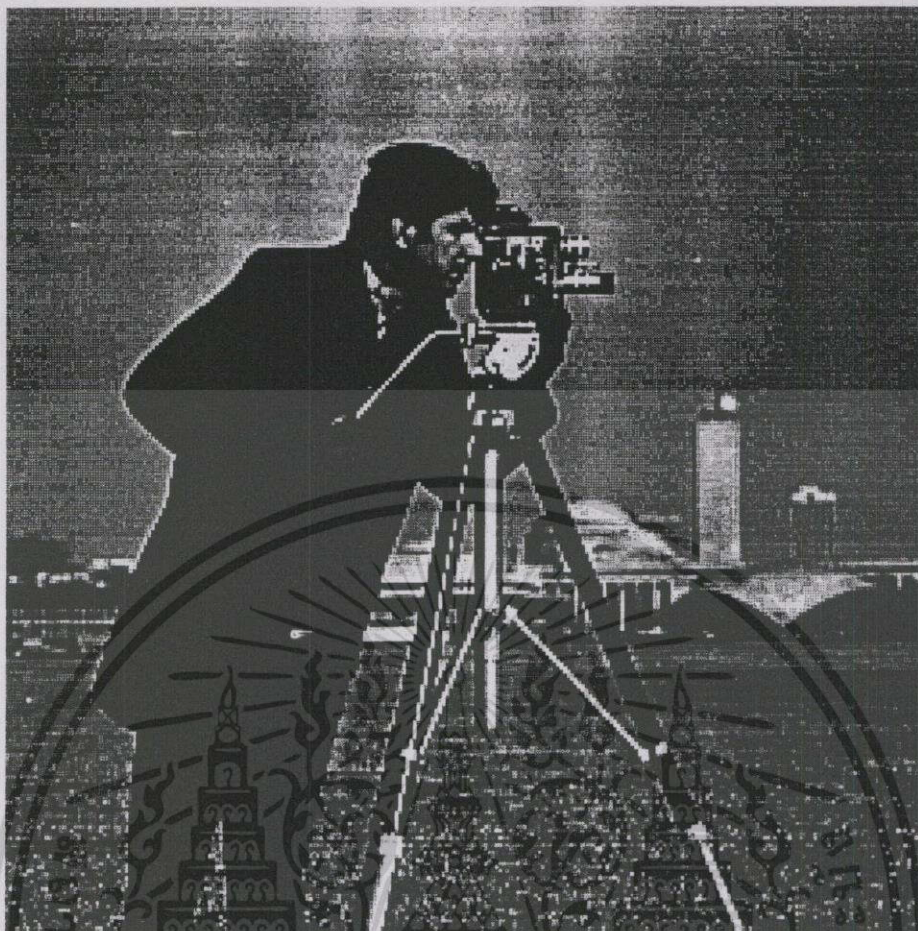


รูปที่ ก.1 รูปภาพ "Baboon" ขนาด 512×512 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล

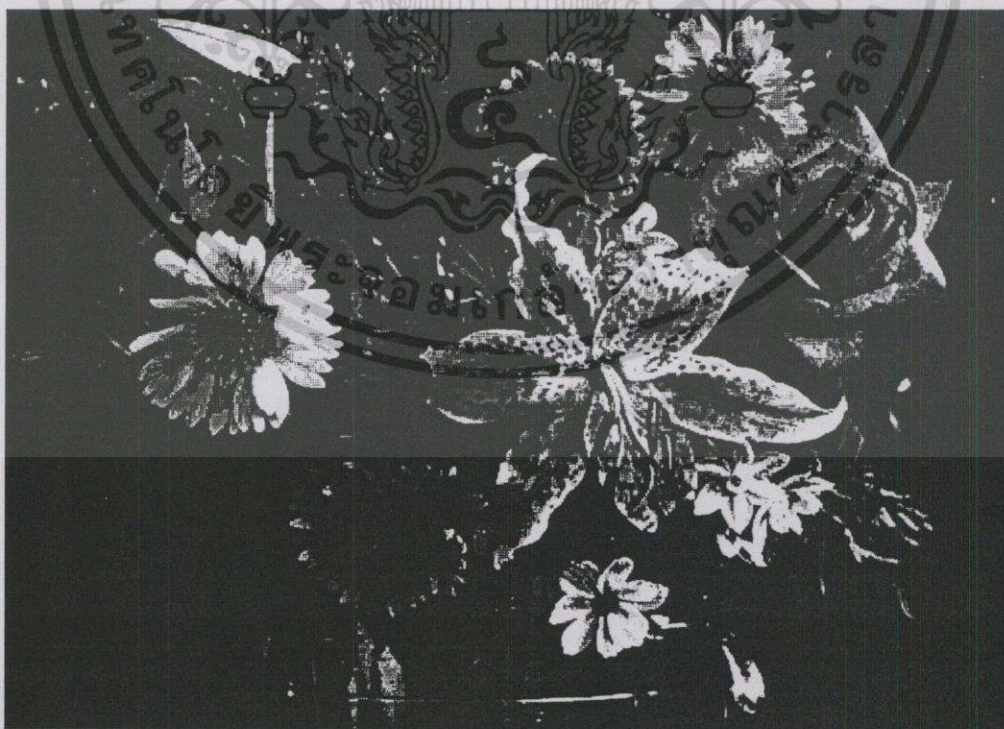


รูปที่ ก.2 รูปภาพ "Building" ขนาด 320×240 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 รูปภาพ "Camera man" ขนาด 256×256 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล

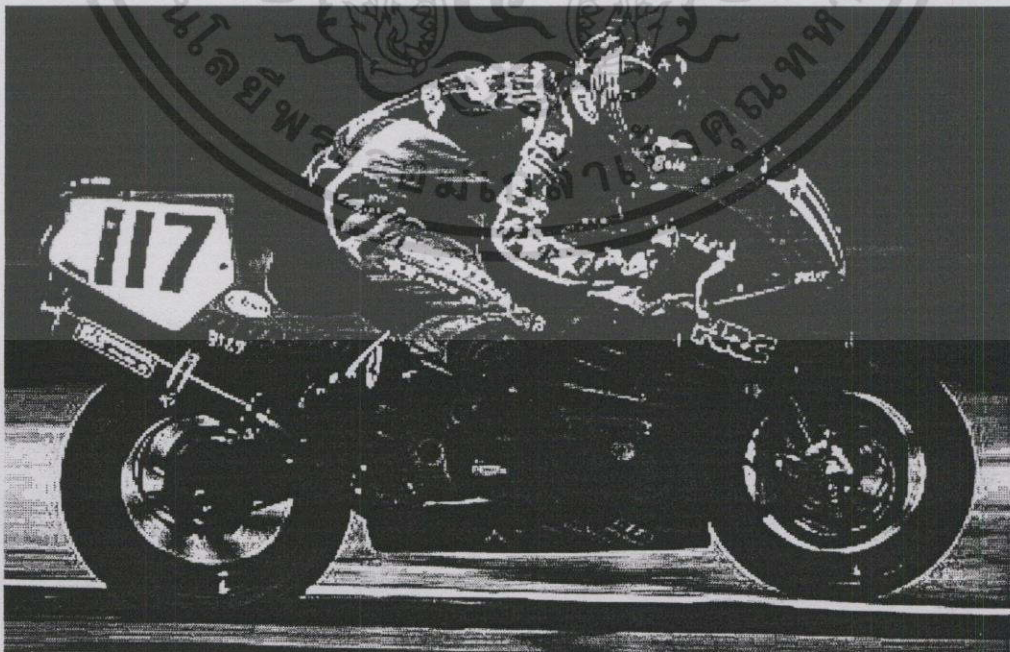


รูปที่ ก.4 รูปภาพ "Flowers" ขนาด 500×362 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

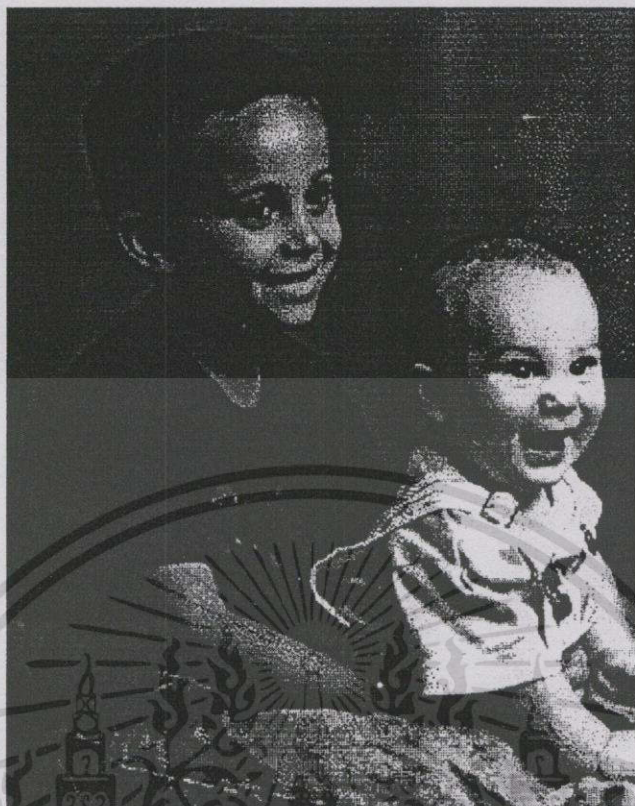


รูปที่ ก.5 รูปภาพ "Gene" ขนาด 330×426 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล



รูปที่ ก.6 รูปภาพ "Honda racing" ขนาด 385×250 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 รูปภาพ "Kids" ขนาด 318×400 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล



รูปที่ ก.8 รูปภาพ "Kiss" ขนาด 460×473 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 รูปภาพ "Lenna" ขนาด 512×512 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล



รูปที่ ก.10 รูปภาพ "Trees" ขนาด 350×258 พิกเซล และมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

## บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. สิริพร ผลสมบูรณ์ และ นพพร โชติกกำจร. “เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านการหมุนและการปรับขนาด.” สาร NECTEC, ปีที่ 7 ฉบับที่ 34 พฤษภาคม-มิถุนายน 2543. หน้า 32-40.





NECTEC

National Science and Technology Development Agency  
73/1 Rama VI rd., Ratchathewi, Bangkok 10400, THAILAND  
Tel : (662) 644-8150...94 Fax : (662) 644-8137-8

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ  
NATIONAL ELECTRONICS AND COMPUTER TECHNOLOGY CENTER

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ  
73/1 ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400  
โทร. (662) 644-8150...94 โทรสาร (662) 644-8137-8

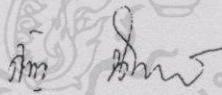
๙ พฤษภาคม ๒๕๕๓

เรียน คุณ สิริพร ผลสมบูรณ์  
เรื่อง การตอบรับบทความ

เนื่องด้วยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ได้มอบหมายให้ งานประชาสัมพันธ์และสื่อสิ่งพิมพ์ จัดทำวารสารราย ๒ เดือน ขึ้นเพื่อเป็นเวทีในเชิงวิชาการและเผยแพร่ข้อมูลข่าวสารด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ แก่บุคคลทั่วไปที่สนใจ

ซึ่งฉบับที่ ๓๕ ประจำเดือน พฤษภาคม-มิถุนายน ๒๕๕๓ นี้ได้นำบทความชื่อ “เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัล สำหรับรูปภาพที่ผ่านการหมุน” โดย สิริพร ผลสมบูรณ์ นักศึกษาปริญญาโท คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลงตีพิมพ์เรียบร้อยแล้ว จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ

  
( ลัญจนา นิคยพัฒน์ )

หัวหน้างานประชาสัมพันธ์และสื่อสิ่งพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส ก ส

ปีที่ 7 ฉบับที่ 34 พฤษภาคม - มิถุนายน 2543 ISSN 0858-2556

# NECTEC

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

WAP

พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์  
กับการก้าวสู่เศรษฐกิจใหม่  
ของประเทศ

LoveBug วิทยายวไรล์

DuoTone งานพิมพ์ 2 สี บน  
Photoshop

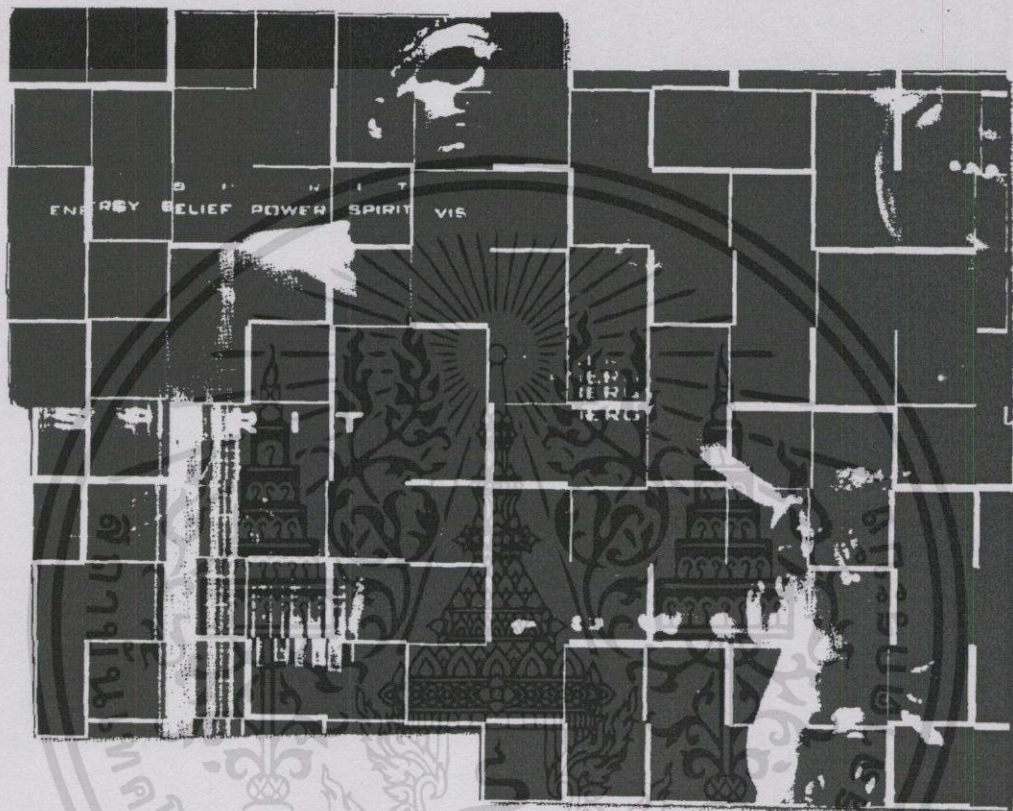
WAP

รูปแบบแห่งเทคโนโลยีไร้สาย  
ยุค G3

30.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัล สำหรับรูปภาพที่ผ่านการหมุนและการปรับขนาด



**Abstract** – A digital watermark is a sign or mark that is embedded in digital media for purposes such as ownership identification. One of the desirable properties of good digital watermarks is robustness against various linear transformations, performed on the medium in which a watermark is embedded. In this paper we proposed a digital image watermarking technique which is robust against common image transformations, particularly rotation and scaling. The proposed method is based on a spread spectrum principle, using a special class of symmetric watermarking patterns. Neither inverse operation nor original image is needed in order to detect and extract the watermark. In addition, because the method performs on a picture domain, it is less computational complicated than an existing frequency-domain method with rotational-invariant property.

**KEYWORDS** – digital watermark, data hiding, steganography, copyright protection, ownership identification

**บทคัดย่อ** - ลายน้ำดิจิทัลเป็นเครื่องหมายหรือสัญลักษณ์ซึ่งถูกซ่อนลงบนสื่อดิจิทัลเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น ใช้แสดงหรือพิสูจน์ความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ในตัวสื่ออันนั้น คุณสมบัติที่สำคัญข้อหนึ่งของลายน้ำดิจิทัลที่ดีคือความทนทานต่อกระบวนการแปลงในรูปแบบต่างๆ บนตัวสื่อบทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพ ซึ่งมีความทนทานต่อกระบวนการหมุนและกระบวนการปรับขนาด ตลอดจนการแปลงเชิงเส้นแบบต่างๆ โดยวิธีการที่เสนอมีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผันกลับหรือรูปภาพต้นฉบับในการตรวจสอบลายน้ำดิจิทัล นอกจากนี้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวกระทำในโดเมนรูปภาพ (Picture-Domain) ทำให้มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่าวิธีการที่มีอยู่ในปัจจุบันซึ่งมีคุณสมบัติของความทนทานต่อการหมุนเช่นเดียวกัน แต่ประมวลผลในโดเมนความถี่ (Frequency-Domain)

**คำสำคัญ** - ลายน้ำดิจิทัล การซ่อนข้อมูล การป้องกันลิขสิทธิ์ การพิสูจน์ความเป็นเจ้าของ

## บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคนิคในการซ่อนข้อมูลลงในสื่อดิจิทัลได้เริ่มมีบทบาทเด่นชัดขึ้น จุดประสงค์ของการซ่อนข้อมูลที่แตกต่างกันมีอาทิ เช่น การซ่อนข้อมูลเพื่อเพิ่มรายละเอียดหรือคำอธิบายลงในสื่อ (Information Caption) การซ่อนข้อมูลที่เป็นความลับ (Secret Message Hiding) การซ่อนข้อมูลเพื่อใช้แสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของในสื่อ (Digital Watermarking), ตลอดจนการซ่อนข้อมูลเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแก้ไข (media authentication) สื่อที่สามารถใช้ในการซ่อนข้อมูลประกอบด้วย ภาพ ภาพเคลื่อนไหว เสียง เอกสาร เป็นต้น ซึ่งสื่อแต่ละประเภทอาจใช้เทคนิคที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสื่อนั้นๆ ในส่วนของบทความฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะสื่อประเภทรูปภาพ

ปัจจุบันได้มีการคิดค้นและพัฒนาเทคนิคการซ่อนข้อมูลลงในรูปภาพอย่างกว้างขวาง (1, 4) โดยจุดประสงค์หลักในการวิจัยส่วนใหญ่เพื่อใช้ในการแสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของในภาพที่ทำการซ่อนข้อมูล (ที่เรียกกันว่า Digital Watermark หรือลายน้ำดิจิทัล) คุณสมบัติโดยทั่วไปของวิธีการซ่อนข้อมูลคือ ข้อมูลที่ถูกซ่อนจะต้องไม่เป็นที่สังเกตเห็นได้โดยมนุษย์ หาก

แต่สามารถทำการตรวจหาได้โดยใช้อัลกอริทึมที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (4, 6) นอกจากนี้ ในกรณีของการใช้งานในลักษณะของลายน้ำดิจิทัล เทคนิคลายน้ำดิจิทัลต้องมีคุณสมบัติเพิ่มเติมที่สำคัญ คือมีความคงทนสูงต่อการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขที่กระทำกับตัวสื่อ ทั้งโดยเจตนาและไม่เจตนาที่จะทำลายส่วนของลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ ตัวอย่างเช่น สาเหตุหนึ่งที่อาจมีผลต่อความคงอยู่ของลายน้ำดิจิทัลในรูปภาพคือ การประมวลผลสัญญาณทั่วไป (Common Signal Processing), ความบิดเบือนอันเกิดจากการประมวลผลกับรูปภาพในเชิงเรขาคณิต (Common Geometric Distortions), ตลอดจนการประมวลผลภาพโดยมีเจตนาที่มุ่งจะทำลายหรือปลอมแปลงลายน้ำดิจิทัล (Subterfuge Attacks) เช่นการทำลายน้ำดิจิทัลปลอมซ่อนลงบนรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่ก่อนแล้ว เป็นต้น (2)

กระบวนการหมุนและการปรับขนาดเป็นสองกระบวนการซึ่งมักเกิดขึ้นกับรูปภาพทั่วไป ซึ่งกระบวนการทั้งสองดังกล่าวในทางปฏิบัติอาจเกิดได้ทั้งจากกระบวนการในการสแกนภาพที่พิมพ์บนกระดาษเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ หรืออาจเกิดจากการดัดแปลงแก้ไขภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ถึงแม้ว่ากระบวนการทั้งสองดังกล่าวจะจัดเป็นการแปลงเชิงเส้นพื้นฐานอันหนึ่ง ซึ่งเทคนิคลายน้ำดิจิทัลส่วนใหญ่ในปัจจุบันไม่สามารถใช้ในการตรวจสอบพิสูจน์ลายน้ำในรูปภาพที่ผ่านกระบวนการแปลงดังกล่าวได้โดยตรง โดยส่วนใหญ่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับ (Inverse Operation) เช่นในกรณีของภาพที่ผ่านกระบวนการหมุน จำเป็นต้องทำการคำนวณหาค่ามุมองศาที่ภาพถูกหมุนไป เพื่อแปลงตำแหน่งภาพให้กลับสู่แกนเดิมก่อนที่จะทำการตรวจสอบลายน้ำได้ ทำให้เพิ่มความยุ่งยากและซับซ้อนในการตรวจสอบลายน้ำ ปัญหาดังกล่าวจะทวีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นหากภาพนั้นผ่านกระบวนการแปลงมากกว่า 1 อย่างมา (เช่น รูปภาพถูกหมุนและย่อส่วน) อีกทั้งเทคนิคเหล่านี้ยังจำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจสอบพิสูจน์อีกด้วย

ในเอกสารอ้างอิงที่ (5) ได้เสนอวิธีการซ่อนลายน้ำดิจิทัลที่มีคุณสมบัติไม่ผันตามกระบวนการแปลงโดยอาศัยคุณสมบัติดังกล่าวของการแปลงฟูเรียร์ ทำให้การซ่อนและตรวจสอบลายน้ำดิจิทัลในโดเมนของความถี่สามารถกระทำได้ดีกับภาพที่ผ่านการหมุน

โดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับ อย่างไรก็ตามก็ดี เนื่องจากวิธีการดังกล่าวกระทำในโดเมนของความถี่ ทำให้ในบางกรณีเป็นการเพิ่มความซับซ้อนในกระบวนการตรวจสอบลายน้ำ เช่น ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบเป็นภาพพิมพ์ ทำให้ต้องมีการสแกนภาพเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลที่สแกนได้ในเบื้องต้นเป็นข้อมูลภาพในโดเมนรูปภาพ (Picture-Domain) นอกจากนี้แล้ววิธีการดังกล่าวยังซ่อนลายน้ำเฉพาะในส่วนแอมพลิจูดของภาพ (ในโดเมนความถี่) ซึ่งเป็นที่ทราบดีว่าข้อมูล (information) ของภาพ (รูปร่าง ฯลฯ) ส่วนใหญ่อยู่ในส่วนของเฟส (phase) มากกว่าส่วนของแอมพลิจูด การซ่อนลายน้ำลงในส่วนแอมพลิจูดที่ข้อมูลลักษณะของรูปภาพเก็บอยู่ในอัตราส่วนที่น้อยกว่าอาจเป็นผลทำให้การทำลายหรือลบลายน้ำดิจิทัลสามารถกระทำได้ง่ายขึ้นโดยไม่ทำลายหรือลดคุณภาพของภาพลงไปมากนัก

ในบทความนี้เราได้นำเสนอผลการศึกษาและพัฒนาลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพ ซึ่งมีคุณสมบัติในด้านความคงทนต่อกระบวนการหมุนและการปรับขนาดในช่วงแคบๆ (ประมาณ) ที่กระทำกับรูปภาพ อันมีลายน้ำซ่อนอยู่ โดยอาศัยเทคนิค Spread spectrum มากระทำในโดเมนของรูปภาพ ซึ่งมีข้อดีในแง่ของการลดความซับซ้อนในกระบวนการตรวจสอบลายน้ำดิจิทัล อีกทั้งวิธีการที่นำเสนอไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับหรือรูปภาพต้นฉบับแต่อย่างใด

## 2. หลักการซ่อนข้อมูลและลายน้ำดิจิทัล

กระบวนการในการซ่อนข้อมูลหรือลายน้ำดิจิทัลประกอบด้วย 2 ส่วน คือกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล และกระบวนการตรวจสอบลายน้ำดิจิทัล (3, 4) กำหนดให้

$I(x, y)$  = รูปภาพต้นฉบับ

$I'(x, y)$  = รูปภาพที่ถูกซ่อนข้อมูล

$S(m, n)$  = ลายน้ำดิจิทัล

โดยที่  $1 \leq x \leq X$

$1 \leq y \leq Y$

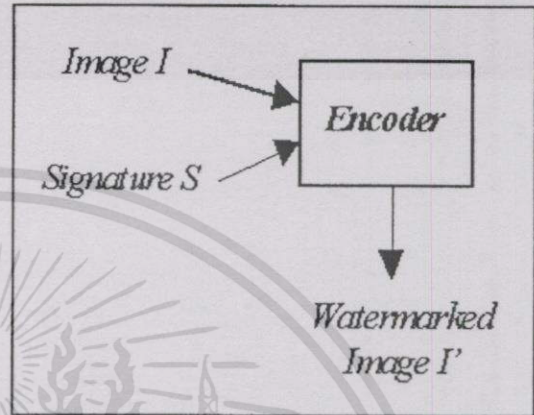
$1 \leq m \leq M$

$1 \leq n \leq N$

ในที่นี้ แทนขนาดตามแนวนอนและแนวตั้งของรูปภาพตามลำดับ ส่วน แทนขนาดของลายน้ำดิจิทัลในแนวแกน และ ตามลำดับ

### 2.1 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล

รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงในรูปภาพแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิทัล

กำหนดให้ แทนตำแหน่งของรูปภาพต้นฉบับที่จะใช้ซ่อนลายน้ำดิจิทัล รูปภาพที่ผ่านการซ่อนลายน้ำดิจิทัลแล้ว แสดงดังสมการที่ 2.1.1

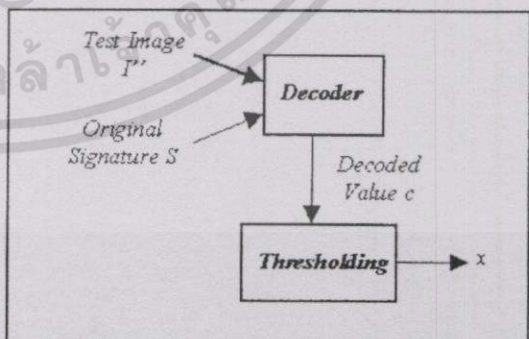
$$I'(x_0 + m, y_0 + n) = I(x_0 + m, y_0 + n) + S(m, n) \quad (2.1.1)$$

โดยที่  $1 \leq x_0 \leq X - M + 1$

$1 \leq y_0 \leq Y - M + 1$

### 2.2 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล

รูปแบบของการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพใดๆ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล

กำหนดให้  $I''$  แทนรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $I'$  ซึ่งอาจผ่านกระบวนการแปลงใดๆ มาก่อน (ทำให้รูปภาพทั้งสองอาจมีความแตกต่างกันได้) การตรวจหาลายน้ำดิจิทัลจากรูปภาพดังกล่าวสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างส่วนต่างๆ ใน  $I''$  กับลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับ  $S$  โดยเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $(i, j)$  ใดๆ ในรูปภาพ

กำหนดให้

$$J(m, n) = I''(i + m, j + n) \quad (2.1.2)$$

เมื่อ  $0 \leq i \leq X - M$

$0 \leq j \leq Y - N$

การคำนวณค่าสหสัมพันธ์  $(sim(J, S))$

แสดงได้ดังสมการที่ 2.1.3

$$sim(J, S) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) \cdot S(m, n)^*}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N J(m, n) \cdot J(m, n)^*}} \quad (2.1.3)$$

จากข้อกำหนดที่ว่ารูปภาพใดๆ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าลายน้ำต้นฉบับมีค่าเฉลี่ยของพิกเซลเป็นศูนย์และภาพต้นฉบับ  $I'$  มีการกระจายแบบปกติ โดยการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์จะได้ว่าหาก  $J$  และ  $S$  ไม่มีความสัมพันธ์กันแล้ว  $sim(J, S)$  จะมีการกระจายแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ย = 0 และความแปรปรวน = 1 จากความจริงดังกล่าว สามารถนำเอาหลักการตรวจสอบสมมติฐาน (hypothesis testing) ในการสถิติมาใช้เพื่อพิสูจน์การมีอยู่ของลายน้ำดิจิทัลได้ เช่น ในกรณีที่ไม่มียลายน้ำอยู่ ผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ไม่ควรจะมีค่าเกินตัวเลขที่กำหนดขึ้น (เช่น ใน (2) กำหนดให้ตัวเลขดังกล่าวคือ  $\delta=6$ ) การกำหนดค่าของ  $\delta$  ขึ้นอยู่กับว่าความต้องการระดับความน่าเชื่อถือ (confidential interval) มากน้อยเพียงไร

### 3. การซ่อนลายน้ำดิจิทัลโดยใช้เทคนิค Spread Spectrum

การซ่อนลายน้ำดิจิทัลโดยใช้เทคนิค Spread Spectrum เป็นวิธีการที่มีความทนทานสูง วิธีการดังกล่าวอาศัยทฤษฎีการมอดูเลชันในระบบสื่อสารที่

เรียกว่า Spread Spectrum Technique โดยวิธีการดังกล่าวใช้ขนาดความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) ที่มากกว่าที่ใช้ในเทคนิคการมอดูเลชันแบบอื่นอันเป็นผลทำให้สามารถลดขนาดของสัญญาณที่ส่งในแต่ละช่วงความถี่ลงได้ ทำให้การส่งสัญญาณด้วยเทคนิคดังกล่าวตรวจจับได้ยาก เนื่องจาก ระดับสัญญาณในแต่ละย่านความถี่มีระดับต่ำมาก (อยู่ในระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่โดยทั่วไปในช่องสัญญาณ) ซึ่งคุณสมบัติอันนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงในรูปภาพได้เป็นอย่างดี โดยในกรณีของลายน้ำดิจิทัลนี้ ภาพที่ต้องการซ่อนเปรียบเสมือนช่องสัญญาณที่จะทำการส่งข้อมูล ในขณะที่แต่ละพิกเซลในภาพเปรียบเสมือนสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร คุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคนี้คือ ลายน้ำดิจิทัลที่เป็นเสมือนข้อมูลที่จะส่งไปในช่องสัญญาณดังกล่าว จะต้องไม่ทำให้ภาพต้นฉบับเปลี่ยนไปจนเป็นที่สังเกตเห็นได้ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของ Spread Spectrum Technique ดังกล่าวข้างต้นโดยการใช้เทคนิคดังกล่าวทำให้ค่าความสว่างของลายน้ำดิจิทัลสามารถกำหนดให้อยู่ในระดับที่ต่ำเพียงพอที่จะทำให้อาจไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของเทคนิค Spread Spectrum คือมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งในกรณีของการประยุกต์ใช้เพื่อการซ่อนลายน้ำดิจิทัล จะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลมีความทนทานต่อกระบวนการประมวลผลภาพ ทั้งในกรณีที่กระทำโดยมีเจตนาเพื่อการทำลายตัวลายน้ำที่ซ่อนอยู่ และในกรณีอื่นๆ อาทิ เช่น เพื่อผลในด้านการปรับปรุงภาพ หรือเพื่อการลดขนาดของข้อมูล เป็นต้น (2)

การซ่อนข้อมูลโดยวิธีการ Spread Spectrum สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I'(x_0 + m, y_0 + n) = I(x_0 + m, y_0 + n) + d \sum_{i=1}^Z w_i P_i(m, n) \quad (3.1)$$

- โดยที่ = Amplitude factor
- = จำนวน spreading code
- = ข้อมูลที่จะซ่อนลำดับที่ i
- = spreading code ลำดับที่ i

สำหรับการตรวจหาและดึงเอาข้อมูลกลับคืนมาขึ้น ข้อมูล  $\psi_i$  ใดๆ จะสามารถดึงกลับมาได้ด้วยสมการที่ 2.1.3 โดยลายน้ำดิจิทัล  $S(m,n)$  ในที่นี้คือ  $P_i(m,n)$

วิธีการนี้แม้จะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้น หากแต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่ในขั้นตอนการตรวจหาลายน้ำในกรณีที่ภาพที่ตรวจสอบได้ผ่านกระบวนการแปลง (เช่น การหมุน หรือปรับขนาดภาพ) ในกรณีดังกล่าว การแก้ปัญหาโดยทั่วไปต้องอาศัยการผันกลับกระบวนการแปลงที่เกิดขึ้นกับรูปภาพ (เช่น หมุนภาพกลับด้วยมุม  $-\theta$  หากภาพดังกล่าวถูกหมุนไปจากแกนเดิมเป็นมุม  $\theta$  เป็นต้น) ซึ่งทำให้เพิ่มความซับซ้อนในการตรวจสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีทั่วไปที่ไม่ทราบค่าของการผันกลับที่ต้องกระทำ (เช่น ไม่ทราบค่ามุม  $\theta$ ) ในกรณีดังกล่าวจำเป็นต้องมีกระบวนการในการคำนวณจำนวนมากเพื่อการประมาณค่าการผันกลับดังกล่าว

#### 4. เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลในโดเมนรูปภาพสำหรับภาพที่ผ่านการหมุนและการปรับขนาด (Picture-Domain Digital Watermark Technique for Rotated and Scaled Images)

##### 4.1 ลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านการหมุน

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงลายน้ำดิจิทัลที่มีโครงสร้างเฉพาะ โดยใช้เทคนิค Spread Spectrum Watermarking ซึ่งแก้ปัญหาค่าความจำเป็นที่ต้องมีการผันกลับกระบวนการสำหรับรูปภาพที่ผ่านการหมุนมาก่อน โดยในเทคนิคที่นำเสนอนี้ แพตเทิร์นที่ใช้สำหรับซ่อนข้อมูลของเจ้าของลิขสิทธิ์จะมีลักษณะสมมาตรทุกมุม โดยที่แต่ละ Spreading Code ของแพตเทิร์นนี้จะถูกแทนด้วยวงกลมย่อยๆ ซ่อนกันในลักษณะวงแหวนดังรูปที่ 3 ด้านล่าง



รูปที่ 3 แสดงแพตเทิร์นสมมาตรซึ่งใช้แก้ปัญหาในกระบวนการหมุนของรูปภาพ

แพตเทิร์นที่ใช้ในวิธีการนี้จะประกอบไปด้วย 2 แพตเทิร์น คือ  $A$  แทนแพตเทิร์นที่ใช้สำหรับซ่อนข้อมูลลงในรูปภาพ และ  $B$  แทนแพตเทิร์นต้นแบบสำหรับใช้ตรวจหาลายน้ำดิจิทัลในรูปภาพ  $(r_0, \theta_0)$  กำหนดให้แทนตำแหน่งใดๆ ของแพตเทิร์นในพิกัดเชิงมุม และ  $R$  แทนขนาดของรัศมีของแพตเทิร์นแล้ว แพตเทิร์นทั้งสองจะถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$A(r, \theta) = \cos(\omega\theta + \phi_r) \quad (4.1)$$

$$B(r, \theta) = e^{j(\omega\theta + \phi_r)} \quad (4.2)$$

โดยที่  $\omega$  = ค่าความถี่เชิงมุม

$\phi_r$  = มุมที่เลือกสุ่มสำหรับแต่ละ  $r$

$$1 \leq r \leq R$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

กำหนดให้  $(r_0, \theta_0)$  แทนตำแหน่งใดๆ ภายในรูปภาพที่จะใช้ซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $I$  ในพิกัดเชิงมุมแล้ว รูปภาพ  $I'$  จะได้จากการซ่อนแพตเทิร์น  $A$  ลงในรูปภาพ  $I$  ตามสมการ

$$I'(r_0 + r, \theta_0 + \theta) = I(r_0 + r, \theta_0 + \theta) + dA(r, \theta) \quad (4.3)$$

กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลกระทำได้โดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแพตเทิร์นต้นแบบ  $B$  กับรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัล  $I'$  กำหนดให้

$$A'_\alpha(r, \theta') = \cos(\omega(\theta + \alpha) + \phi_r) \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นลายน้ำดิจิทัล  $(A'_\alpha)$  ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแพตเทิร์นทั้งสองสำหรับจุด ณ รัศมี  $r$  ใดๆ จะสามารถหาได้จากนิยามต่อไปนี้

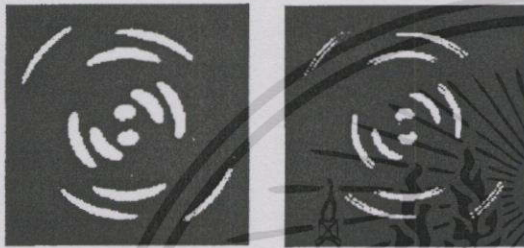
$$C(A'_\alpha(r, \theta'), B(r, \theta)) = \frac{\Delta}{\int_{\theta=0}^{2\pi}} A'_\alpha(r, \theta') \cdot B(r, \theta) d\theta \quad (4.5)$$

จาก (4.1.5) จะเห็นได้ว่าโดยการสร้างแพตเทิร์นตามสมการข้างต้น ทำให้ผลการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล (ค่าสหสัมพันธ์) ไม่ขึ้นกับองศาของภาพที่ถูกหมุนไปจากตำแหน่งแกนเดิม ทำให้การตรวจสอบ

ลายน้ำไม่จำเป็นต้องทราบค่าองศาที่ภาพถูกหมุน เป็นผลทำให้ไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับ

4.2 ลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการปรับขนาด

สำหรับแพตเทิร์นที่ใช้ในการซ่อนข้อมูลลงในรูปภาพที่ไม่ต้องอาศัยกระบวนการผันกลับการปรับขนาดนั้น จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับแพตเทิร์นที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว แต่จะมีข้อแตกต่างกันคือขนาดความหนาของวงแหวนแต่ละวงในแพตเทิร์น A จะมีขนาดใหญ่กว่าในแพตเทิร์น B โดยแสดงดังรูปที่ 4



(ก) แพตเทิร์น A (ข) แพตเทิร์น B

รูปที่ 4 แพตเทิร์นปรับปรุงเพื่อใช้แก้ปัญหาการลดและการเพิ่มขนาดของรูปภาพ

โดยการกำหนดคุณสมบัติดังกล่าวจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัลสามารถคงทนอยู่เมื่อรูปภาพผ่านกระบวนการลดขนาดหรือเพิ่มขนาดเล็กน้อย (พิจารณาเฉพาะการปรับขนาดในช่วงแคบๆ ประมาณ) ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการพิมพ์และการสแกนรูปภาพโดยแพตเทิร์นดังกล่าวถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$A(y + p_A, \theta) = \cos(\omega\theta + \phi_{y+p_A}) \quad (4.2.1)$$

$$B(y + p_B, \theta) = e^{j(\omega\theta + \phi_{y+p_B})} \quad (4.2.2)$$

โดยที่  $\gamma = R - P_A, R - 3P_A - Q_A, R - 5P_A - 2Q_A, \dots, P_A$   
 $P_A, P_B =$  ครึ่งหนึ่งของความกว้างของแต่ละวงแหวนในแพตเทิร์น A และ B ตามลำดับ  
 $Q_A =$  ระยะห่างระหว่างขอบของแต่ละวงแหวนในแพตเทิร์น A

$$P_A > P_B$$

$$-P_A \leq p_A \leq P_A$$

$$-P_B \leq p_B \leq P_B$$

4.3 การสร้างลายน้ำดิจิทัลในทางปฏิบัติ

จากทฤษฎีที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.1 แพตเทิร์นลายน้ำดิจิทัลแสดงในรูปของฟังก์ชันต่อเนื่อง (continuous function) ในทางปฏิบัติที่การซ่อนและตรวจสอบลายน้ำกระทำเป็นเครื่อง (ดิจิทัล) คอมพิวเตอร์ทำให้ต้องประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องดังกล่าวด้วยฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง (discrete function) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวในทางทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล คือการแซมปลิง (sampling) นั้นเอง และจากความจริงที่ว่าในขั้นตอนของการแซมปลิงจำเป็นต้องมีการกรองสัญญาณเพื่อให้แบนวิธของสัญญาณไม่เกินครึ่งหนึ่งของอัตราการแซมปลิง (เพื่อแก้ปัญหา aliasing effect) ในการสร้างลายน้ำดิจิทัลบนเครื่องคอมพิวเตอร์จึงกระทำโดยทำลายน้ำตามสมการ (4.1.1-2) มาผ่านกระบวนการ lowpass filtering เพื่อตัดย่านความถี่สูงออก ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันต่อไปนี้เพื่อการกรองสัญญาณดังกล่าว

$$Sinc_T(r) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi r)}{\pi r} & ; r \leq R_s \\ 0 & ; else \end{cases} \quad (4.3.1)$$

โดยที่  $R_s =$  ค่าคงที่ที่เป็นตัวกำหนดขอบเขต (truncation) ของ  $Sinc_T(r)$

โดยฟังก์ชันดังกล่าวที่ใช้ในการกรองสัญญาณแพตเทิร์น A และ B สามารถสร้างขึ้นในพิกัดเชิงเส้น ณ ตำแหน่ง  $(x_0, y_0)$  ใดๆ ได้ตามสมการต่อไปนี้

$$A(x_0, y_0) = \sum_{p=1}^N \sum_{\beta=0}^K \cos(\omega(\theta_1 + \beta\Delta_\theta) + \phi_{R_p}) \cdot Sinc_T(s) \cdot \Delta_s \quad (4.3.2)$$

$$B(x_0, y_0) = \sum_{p=1}^N \sum_{\beta=0}^K e^{j(\omega(\theta_1 + \beta\Delta_\theta) + \phi_{R_p})} \cdot Sinc_T(s) \cdot \Delta_s \quad (4.3.3)$$

อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติพบว่าสัญญาณที่กรอง

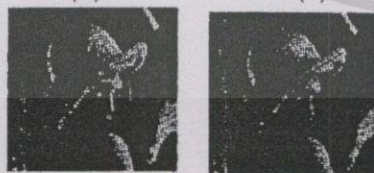
โดยที่  $r_1 = \min R_r, R_r > \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - R_s$   
 $r_2 = \max R_r, R_r < \sqrt{x_0^2 + y_0^2} + R_s$   
 $\theta_1 = \cos^{-1} \left( \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2aR_p} \right)$   
 $K = \text{เลขจำนวนเต็มที่ทำให้ } |(\theta_1 + K\Delta_\theta) - \theta_2| \text{ มีค่าน้อยที่สุด ซึ่ง}$   
 $\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2aR_p} \right)$   
 $a = \frac{y_0^2}{x_0^2} + 1$   
 $b = -\frac{y_0(2R_p^2 - R_s^2)}{R_p x_0^2}$   
 $c = \frac{(2R_p^2 - R_s^2)^2}{4y_0^2} - R_p^2$   
 $s = \sqrt{(x_0 - R_p \cos \beta)^2 + (y_0 - R_p \sin \beta)^2}$

ด้วยฟังก์ชัน  $\text{Sinc}_p(r)$  ยังคงมีย่านความถี่สูงอยู่ในระดับที่ทำให้ผลของ aliasing effect ยังมีอยู่ ดังนั้นภายหลังจากผ่านฟังก์ชัน  $\text{Sinc}_p(r)$  แล้ว จำเป็นจะต้องนำลายน้ำดิจิทัลมาผ่านกระบวนการ lowpass filtering ซ้ำอีกครั้ง เพื่อตัดย่านความถี่สูงออก

5. ผลการทดลอง

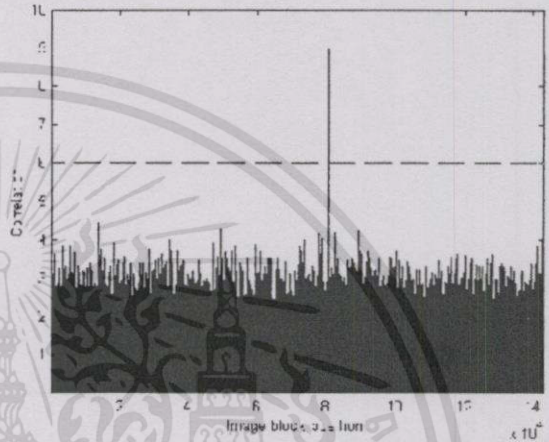
ในหัวข้อนี้เราได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอนี้ในหัวข้อที่ 4 ต่อกระบวนการหมุนและการปรับขนาด ตลอดจนกระบวนการแปลงแบบต่างๆ โดยสร้างแพตเทิร์นลายน้ำดิจิทัล และ โดยกำหนดให้  $R=64, P_A=7, P_B=5, Q_A=6, \omega_A=6$  และ  $R_S=3$  เพื่อซ่อนลงบนรูปภาพขาว-ดำ "Lenna" ที่มีขนาด 512 X 512 พิกเซล ซึ่งมีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล จากบริเวณของภาพที่เลือกมา เราเลือกค่า  $Q=0.025$  (ดูผลการที่ 4.1.3 ประกอบ) ดังรูปที่ 5

ภายหลังจุกฎที่ทำการซ่อนลายน้ำดิจิทัลลงไป



รูปที่ 5 (ก) รูปภาพต้นฉบับ "Lenna"  
 (ข) ภาพหลังที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัลแล้ว (ในกรอบสี่เหลี่ยมคือบริเวณที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัล)

รูปภาพแล้ว ปรากฏว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงในรูปภาพดังกล่าวจนเป็นที่สังเกตเห็นได้ จากนั้นได้ทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลโดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรูปภาพกับแพตเทิร์นต้นแบบ โดยทำการแบ่งภาพออกเป็นส่วนย่อยๆ ที่มีขนาดแต่ละส่วนเท่ากับขนาดของลายน้ำต้นแบบผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าสหสัมพันธ์ของบริเวณที่ไม่มีลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่จะมีระดับต่ำ เฉพาะบริเวณที่มีลายน้ำดิจิทัลอยู่เท่านั้นที่มีค่าสูงเกินค่า  $\delta$  (ซึ่งในนี้กำหนดให้เท่ากับ 6)



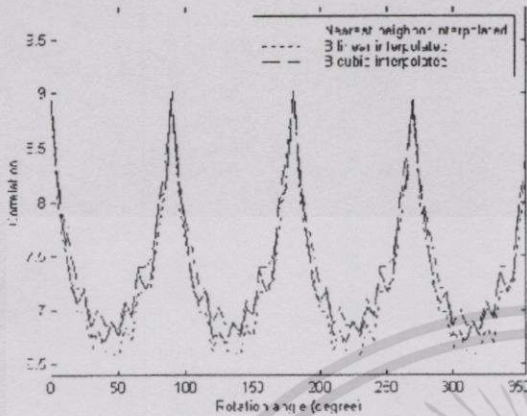
รูปที่ 6 ผลลัพธ์จากการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรูปที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิทัลกับแพตเทิร์นต้นแบบ

จากนั้นได้ทำการทดสอบความทนทานของรูปภาพต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆ อันได้แก่กระบวนการหมุน (Rotation), กระบวนการปรับขนาด (Scaling), กระบวนการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression), กระบวนการปรับความสว่าง (Brightness adjustment), และกระบวนการปรับการตัดกันของสี (Contrasting adjustment) ของรูปภาพ โดยจะแสดงรายละเอียดในส่วนถัดไป

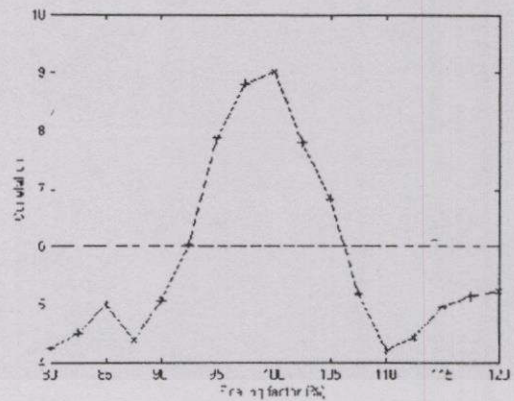
5.1 การทดสอบความทนทานต่อการหมุนของรูปภาพ (Rotation)

ในการทดลองนี้ได้ทำการหมุนรูปภาพที่มีมุมต่างๆ โดยได้ทำการทดลองหมุนไปที่ละ 5 องศา นับจากมุมที่ 0 องศา ไปจนถึง 355 องศา โดยใช้อัลกอริทึมในการ interpolation 3 แบบคือ nearest neighbor interpolated, bilinear interpolated, และ bicubic interpolated จากนั้นทำการทดสอบตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ภายในรูปภาพ

รูปที่ 7 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละองศา ซึ่งลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ถูกต้องในทุกการทดลองข้างต้น



รูปที่ 7 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองหมุนรูปภาพตั้งแต่ 0 จนถึง 355 องศา



รูปที่ 8 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองปรับขนาดรูปภาพตั้งแต่ 80% จนถึง 120%

รูปที่ 9 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับคุณภาพ พบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลได้อย่างถูกต้องทุกระดับคุณภาพ



รูปที่ 9 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลองบีบอัดรูปภาพด้วยคุณภาพที่ระดับต่างๆ

### 5.2 การทดสอบความทนทานต่อการปรับขนาดของรูปภาพ (Scaling)

ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับขนาดของรูปภาพที่ขนาดต่างๆ โดยได้ทำการทดลองปรับขนาดไปครั้งละ 2.5% ตั้งแต่ 80% ไปจนถึง 120% โดยใช้อัลกอริทึมในการ interpolation 3 แบบคือ nearest neighbor interpolated, bilinear interpolated, และ bicubic interpolated จากนั้นทำการทดสอบตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ภายในรูปภาพ

รูปที่ 8 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละขนาด ซึ่งลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ถูกต้องในช่วง  $\pm 5\%$  (ประมาณ 95% ถึง 105%) ซึ่งกรณีดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้จากความบิดเบือนอันเนื่องมาจากการกระบวนการพิมพ์และกระบวนการสแกน

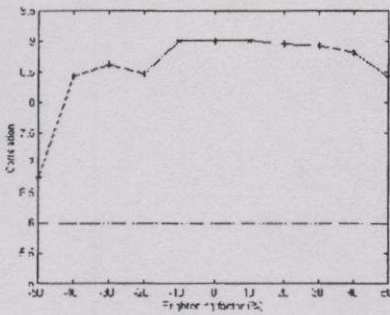
### 5.3 การทดสอบความทนทานต่อการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression)

ในการทดลองนี้ได้ทำการบีบอัดรูปภาพด้วยอัลกอริทึม ของ JPEG ที่ระดับคุณภาพที่ 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, และ 100% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ

### 5.4 การทดสอบความทนทานต่อการปรับความสว่าง (Brightness adjustment)

ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับความสว่างของรูปภาพ ตั้งแต่ -50% ไปจนถึง 50% โดยปรับความสว่างไปครั้งละ 10% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ

รูปที่ 10 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับความสว่าง พบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลได้อย่างถูกต้องทุกการทดลองข้างต้น

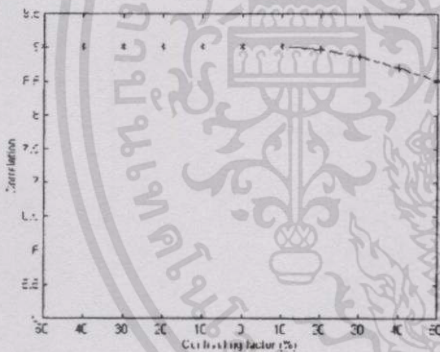


รูปที่ 10 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลอง ปรับความสว่างตั้งแต่ -50% จนถึง 50%

### 5.5 การทดสอบความทนทานต่อการปรับการตัดกันของสี (Contrasting adjustment)

ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ ตั้งแต่ -50% ไปจนถึง 50% โดยปรับไปครั้งละ 10% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ

รูปที่ 11 แสดงผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับการตัดกันของสีพบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลได้อย่างถูกต้องทุกการทดลองข้างต้น



รูปที่ 11 ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์จากการทดลอง ปรับการตัดกันของสีตั้งแต่ -50% จนถึง 50%

### 6. บทสรุป

ในงานวิจัยนี้เราได้นำเสนอเทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิทัลซึ่งมีความทนทานต่อกระบวนการหมุนและการปรับขนาดที่กระทำกับรูปภาพที่มีลายน้ำซ่อนอยู่ วิธีการดังกล่าวเป็นการประยุกต์เอาเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลแบบ spread spectrum watermarking ซึ่งมีความคงทนสูงมาใช้ โดยปรับปรุงแพตเทิร์นให้มี

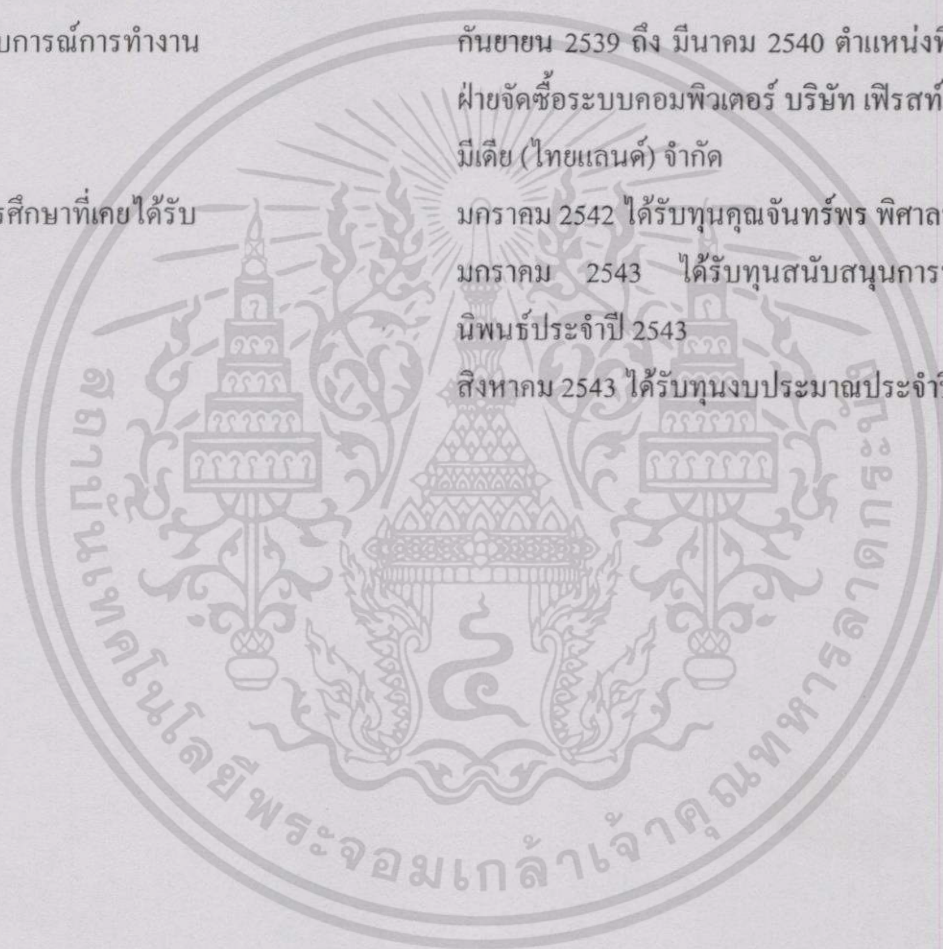
ลักษณะสมมาตร เพื่อรองรับกับปัญหาการหมุนของรูปภาพ โดยการสร้างแพตเทิร์นด้วยฟังก์ชัน cosine และ complex exponential อีกทั้งยังปรับปรุงแพตเทิร์นให้มีความทนทานต่อกระบวนการปรับขนาดของรูปภาพที่ระดับ 95% ถึง 105% ซึ่งการปรับขนาดที่ระดับดังกล่าวมักเกิดขึ้นจากกระบวนการพิมพ์และการสแกนของรูปภาพ จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5 แสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิทัลสามารถถูกตรวจพบได้ในทุกๆ มุมที่รูปภาพถูกหมุนไป และที่การปรับขนาดในช่วงแคบๆ (ประมาณ) นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติมต่อกระบวนการแปลงแบบอื่นๆ อันได้แก่ การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG, การปรับความสว่างของรูปภาพ, และการปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ ซึ่งพบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิทัลที่ถูกซ่อนอยู่ได้อย่างถูกต้อง โดยที่ไม่ต้องมีการฝึกกลับกระบวนการแปลงใดๆ หรือใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลแต่อย่างใด

### เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu, "Techniques for data hiding", *IBM Systems journal*, vol. 35, no. 3&4, page 313-336, 1996.
- [2] Ingemar J. Cox, Joe Kiliant, Tom Leighton, and Talal Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia", *IEEE transactions on image processing*, vol. 6, no. 12, page 1673-1687, 1997.
- [3] Scott Craver, Nasir Memon, Boon-Lock Yeo, and Minerva Yeung, "Can invisible watermark resolve rightful ownerships?", *IBM Research report*, July 25, 1996.
- [4] Jiri Fridrich, "Methods for data hiding", *Center for intelligent systems & department of systems science and industrial engineering, SUNY Binghamton, Binghamton, NY 13902-6000, 1997, URL address: http://ssie.binghamton.edu/~jirif/ Research/meth\_ps.zip.*
- [5] Joseph J. K. O'Ruanaidh, Thierry Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking", *Signal processing*, vol. 66, page 303-317, 1998.
- [6] Fabien A. P. Petitcolas, Ross J. Anderson, and Markus G. Kuhn, "Attacks on copyright marking systems", In David Aucsmith, Ed., *second workshop on information hiding*, in vol. 1525 of *lecture notes in computer science*, Portland, Oregon, U.S.A., 14-17 April, page 218-238, 1998.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	ว่าที่ร้อยตรีหญิง สิริพร ผลสมบูรณ์
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2539
ประสบการณ์การทำงาน	กันยายน 2539 ถึง มีนาคม 2540 ตำแหน่งที่ปรึกษาฝ่ายจัดซื้อระบบคอมพิวเตอร์ บริษัท เฟิร์สท์แปซิฟิกมีเดีย (ไทยแลนด์) จำกัด
ทุนการศึกษาที่เคยได้รับ	มกราคม 2542 ได้รับทุนคุณจันทร์พร พิศาลบุตร มกราคม 2543 ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ประจำปี 2543 สิงหาคม 2543 ได้รับทุนงบประมาณประจำปี 2543



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้