ลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพที่คืนสภาพได้จากการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน

ว่าที่ร้อยตรีหญิง สิริพร ผลสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6427-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROTATION, SCALE, AND TRANSLATION RESILIENT DIGITAL IMAGE WATERMARKING BASED ON COMPLEX EXPONENTIAL FUNCTION

Acting Sub Lieutenant Siriporn Pholsomboon

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Doctor of Philosophy in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2004

ISBN 974-17-6427-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพที่คืนสภาพได้จากการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน
โดย	ว่าที่ร้อยตรีหญิง สิริพร ผลสมบูรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สาธิต วงศ์ประทีป

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สาธิต วงศ์ประทีป)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อาทิตย์ ทองทักษ์)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เฉลิมเอก อินทนากรวิวัฒน์)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ คันธมานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิริพร ผลสมบูรณ์ : ลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพที่คืนสภาพได้จากการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน. (ROTATION, SCALE, AND TRANSLATION RESILIENT DIGITAL IMAGE WATERMARKING BASED ON COMPLEX EXPONENTIAL FUNCTION) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สาธิต วงศ์ประทีป, 90 หน้า. ISBN 974-17-6427-8.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลบนรูปภาพซึ่งใช้หลักการ Spread spectrum ในการสร้างรูปแบบเฉพาะของลายน้ำดิจิตอลที่มีลักษณะเป็นวงแหวนซ้อนกันหลายๆวง โดยอาศัยคุณสมบัติของฟังก์ชันเลขชี้กำลังเชิงซ้อน ทำให้ลายน้ำดิจิตอลดังกล่าวไม่แปรผันต่อกระบวนการหมุนและการเคลื่อนที่ รวมทั้งสามารถคืนสภาพได้จากการปรับขนาด โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการแปลงผกผัน ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้กระทำในโดเมนความถี่ของรูปภาพ และไม่จำเป็นต้องอาศัยการแปลงให้อยู่ในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว จึงสามารถลดความซับซ้อนในการคำนวณลงได้ นอกจากนี้แล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล ซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาในการค้นหา ตลอดจนเนื้อที่ที่ต้องใช้ในการจัดเก็บรูปภาพดังกล่าวได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิตอลของเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถตรวจหาได้อย่างถูกต้อง ถึงแม้ว่ารูปภาพจะถูกแปลงไปแบบต่างๆ ทั้งในเชิงเรขาคณิตและไม่เชิงเรขาคณิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต สิริพร ผลสมบูรณ์
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สาธิต
ปีการศึกษา 2547

457 18257 21 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORD : DIGITAL IMAGE WATERMARKING / COPYRIGHT PROTECTION / ROTATION, SCALE, AND TRANSLATION (RST) RESILIENT / COMPLEX EXPONENTIAL FUNCTION

SIRIPORN PHOLSOMBOON : ROTATION, SCALE, AND TRANSLATION RESILIENT DIGITAL IMAGE WATERMARKING BASED ON COMPLEX EXPONENTIAL FUNCTION. THESIS ADVISOR : SARTID VONGPRADHIP, 90 PAGES. ISBN 974-17-6427-8.

In this thesis, a novel digital image watermarking scheme has been proposed based on spread spectrum technique. By exploiting complex exponential function to generate a multiple-ring shaped pattern, the watermark is invariant to rotation and translation, and is resilient to scaling without the need of inverse transformation. The proposed technique is performed in frequency domain without additional Log-Polar mapping. This technique reduces computational complexity of such transformation. Furthermore, the original image is not needed in the detection process. Therefore, the computational time to search for the original image and the space needed to keep the image are reduced. Experimental results demonstrate the validity of the proposed scheme. The watermark is correctly detected although the image was undergone by various geometric and non-geometric transformations.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department	Computer Engineering	Student's signature	
Field of study	Computer Engineering	Advisor's signature	
Academic year	2004		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆที่เป็นประโยชน์จาก รองศาสตราจารย์ ดร. สาธิต วงศ์ประทีป อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้เขียนยังอยากแสดงความขอบพระคุณไปถึง รองศาสตราจารย์ ดร. นพพร โชติกกำธร อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเคยช่วยให้คำแนะนำต่างๆในวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท ซึ่งเป็นประโยชน์มาจนถึงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณและเอ่ยนามถึงบุคคลต่างๆที่ได้มีส่วนร่วมช่วยในการสร้างงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้นมาจนสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่านเป็นอย่างสูงที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้ข้อคิดและแนวทางในการวิจัย จนทำให้สามารถแก้ไขปัญหาต่างๆจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาฯทุกท่าน ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ในการอำนวยความสะดวกต่างๆในการทำงานตั้งแต่ต้น รวมถึงเพื่อนๆและพี่น้องนักศึกษาทุกคนโดยเฉพาะในห้องวิจัย Digital System Engineering Laboratory (DSEL) ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขทฤษฎีและอื่นๆที่ผิดพลาดจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และยังให้กำลังใจต่อผู้เขียนอย่างใกล้ชิดตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณกองทุน Toshiba International Foundation (TIFO) ที่ให้โอกาสในการศึกษางานที่ห้องวิจัยในประเทศญี่ปุ่น อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนนักวิจัยท่านอื่นๆที่เห็นคุณค่าของงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	4
1.5 แนวทางการวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนการวิจัย	5
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	6
1.8 รายชื่อบทความที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์	7
บทที่ 2 การประมวลผลรูปภาพดิจิตอล	8
2.1 รูปภาพดิจิตอล (Digital image)	8
2.2 การประมวลผลรูปภาพดิจิตอล (Digital image processing)	9
2.2.1 การประมวลผลจุด (Point processing)	9
2.2.1.1 การปรับความสว่างของรูปภาพ (Brightness adjustment)	9
2.2.1.2 การปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ (Contrasting adjustment)	10
2.2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformation)	10
2.2.2.1 การเคลื่อนย้ายรูปภาพ (Translation)	10
2.2.2.2 การปรับขนาดของรูปภาพ (Scaling)	10
2.2.2.3 การหมุนรูปภาพ (Rotation)	11
2.2.3 การปรับคุณภาพของรูปภาพ (Image enhancement)	11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3.1 การปรับภาพให้นุ่มนวล (Smooth filtering) 11

2.2.3.2 การปรับภาพให้คมชัดขึ้น (Sharpening filtering) 12

2.2.4 การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression) 12

บทที่ 3 ลายน้ำดิจิตอล.. 14

3.1 หลักการซ่อนข้อมูลและลายน้ำดิจิตอล.. 14

3.1.1 หลักการซ่อนข้อมูล... 14

3.1.2 ลายน้ำดิจิตอล.. 15

3.1.2.1 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล.. 15

3.1.2.2 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล... 16

3.2 เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิตอลบนรูปภาพที่ใช้ในปัจจุบัน.............................. 17

3.2.1 Least significant bit replacement... 17

3.2.2 Patchwork.. 17

3.2.3 Texture block coding.. 18

3.2.4 Spread spectrum watermarking.. 18

3.2.5 RST (Rotation, Scale, and Translation) invariant digital watermarking 19

3.3 ปัญหาของลายน้ำดิจิตอล... 23

3.3.1 ความไม่คงทนต่อกระบวนการประมวลผลรูปภาพของลายน้ำดิจิตอล... 23

3.3.2 แนวทางในการทำลายลายน้ำดิจิตอล... 23

3.3.2.1 Jitter attack.. 23

3.3.2.2 Mosaic attack.. 24

3.3.2.3 Invalidating claims of ownership.. 24

3.3.3 แนวทางการป้องกันและการพิสูจน์ความถูกต้อง.................................. 25

3.3.3.1 การกำหนดโปรโตคอลของการซ่อนลายน้ำดิจิตอล.............................. 25

3.3.3.2 การกำหนดทิศทางในการซ่อนลายน้ำดิจิตอล.................................... 26

3.3.3.3 การกำหนดโครงร่างของลายน้ำดิจิตอลแบบไม่สามารถผันกลับได้................ 26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพที่คืนสภาพได้จากการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน........................... 27

4.1 รูปแบบของลายน้ำดิจิตอล.. 27

4.2 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล.. 28

4.3 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล.. 28

4.4 การพิสูจน์คุณสมบัติ RST invariant.. 30

4.4.1 กระบวนการเคลื่อนที่ (Translation).. 30

4.4.2 กระบวนการหมุน (Rotation).. 30

4.4.3 กระบวนการปรับขนาด (Scaling).. 31

4.5 ความไม่ซ้ำกันของลายน้ำดิจิตอล (Uniqueness).. 31

4.6 ประสิทธิภาพของอัลกอริธึม (Algorithmic consideration)........................ 33

4.6.1 LPM-based technique.. 33

4.6.1.1 Fast Fourier Transform และ Inverse Fast Fourier Transform... 33

4.6.1.2 Log-Polar Mapping และ Inverse Log-Polar Mapping........... 33

4.6.2 Complex Exponential-based technique.. 34

4.6.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ.. 34

4.6.3.1 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล.. 34

4.6.3.2 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล.. 35

4.7 คุณภาพต่อการมองเห็นของผลลัพธ์ (Perceptibility).. 35

บทที่ 5 ผลการทดลอง.. 36

5.1 การซ่อนลายน้ำดิจิตอลและการตรวจหา.. 36

5.2 การเคลื่อนที่ (Translation).. 37

5.3 การหมุน (Rotation).. 38

5.4 การปรับขนาด (Scaling).. 40

5.5 การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression).. 40

5.6 การปรับความสว่าง (Brightness adjustment).. 41

5.7 การปรับการตัดกันของสี (Contrast adjustment).. 42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.8 การปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ (Filtering)........................ 42
5.9 การเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพ (Noise adding)........................ 43
5.10 การพิมพ์และการสแกนรูปภาพ (Printing and scanning)........................ 44
5.11 การตัดรูปภาพ (Cropping)........................ 44
5.12 การเปลี่ยนแปลงแก้ไขรูปภาพที่มากกว่า 1 กระบวนการ........................ 45
5.12.1 การหมุนและการปรับขนาด........................ 45
5.12.2 การหมุนและการบีบอัดรูปภาพ........................ 46
5.12.3 การเคลื่อนที่และการปรับขนาด........................ 47
5.12.4 การเคลื่อนที่และการตัดรูปภาพ........................ 47
5.13 การตรวจหาด้วยลายน้ำดิจิตอลที่ไม่มีความสัมพันธ์กับรูปภาพ (Watermark counterfeiting)........................ 48
5.14 การซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว (Collision attacking)........................ 49
5.15 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริธึม........................ 49
5.16 การทดสอบกับรูปภาพอื่นๆ........................ 51

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ........................ 52
6.1 สรุปผลการวิจัย........................ 52
6.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย........................ 53
6.3 ปัญหาที่พบ........................ 54
6.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม........................ 56

รายการอ้างอิง........................ 57
ภาคผนวก........................ 60
ภาคผนวก ก. รูปภาพที่ใช้ในการทดลอง........................ 61
ภาคผนวก ข. บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์........................ 69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์........................ 90

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

3.1 ความคงทนของลายน้ำดิจิตอลแต่ละวิธีเมื่อรูปภาพผ่านการประมวลผลแบบต่างๆ...... 23

5.1 ผลการทดลองกับการเคลื่อนที่ของรูปภาพ.. 38

5.2 ผลการทดลองกับการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว... 49

5.3 เปรียบเทียบจำนวน FLOPs ที่ใช้ในกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล..................... 50

5.4 เปรียบเทียบจำนวน FLOPs ที่ใช้ในกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล................ 50

5.5 การทดลองเพิ่มเติมกับรูปภาพต่างๆ.. 51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

2.1 กระบวนการแปลงภาพจากธรรมชาติ (Continuous image) เป็นตัวเลข (Digital image) 8

2.2 ลำดับการเข้ารหัสในลักษณะฟันปลาของขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG โดยใช้ AC Huffman coding........ 13

3.1 รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล........ 15

3.2 รูปแบบของกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล........ 16

3.3 โครงร่างของวิธีการทำลายน้ำดิจิตอลซึ่งกระทำใน Log-Polar Mapping (LPM) (ก.) กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอลและ (ข.) กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล... 22

3.4 วิธีการสร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลซ่อนอยู่ก่อนแล้ว..... 24

3.5 วิธีการซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว............ 25

4.1 แพตเทิร์นของลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอ........ 27

4.2 โครงร่างของเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอ (ก.) กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล (ข.) กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล........ 29

4.3 ระดับเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น (ก.) ที่ $\mu \pm 3\,\sigma$ (ข.) ที่ $\mu \pm 6\,\sigma$........ 32

5.1 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ *Lena* และ (ข.) Fourier spectrum ของรูปดังกล่าว (ค.) รูปภาพภายหลังจากที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลแล้ว (ง.) Fourier spectrum ของรูปที่ถูกซ่อนแล้ว........ 36

5.2 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ *Lena* ที่ถูกเติมขอบ และ (ข.) รูปภาพเดียวกันภายหลังจากที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลและทำการเคลื่อนที่........ 37

5.3 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ *Lena* ที่ถูกเติมขอบ และ (ข.) รูปภาพเดียวกันภายหลังจากที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลและทำการหมุน........ 39

5.4 ผลการทดลองกับการหมุนของรูปภาพ........ 39

5.5 ผลการทดลองกับการปรับขนาดของรูปภาพ........ 40

5.6 ผลการทดลองกับการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG........ 41

5.7 ผลการทดลองกับการปรับความสว่างของรูปภาพ........ 41

5.8 ผลการทดลองกับการปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ........ 42

5.9 ผลการทดลองกับการปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์........ 43

5.10 ผลการทดลองกับการเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพ........ 43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
5.11	รูปภาพ *Lena* ที่ถูกพิมพ์และสแกนกลับเข้ามา..	44
5.12	รูปภาพที่ถูกตัดเนื้อหาบางส่วนออกในลักษณะต่างๆกัน (ก.) 128 พิกเซลด้านขวา (ข.) 128 พิกเซลด้านบนและซ้าย (ค.) กรอบด้านนอก 128 พิกเซล.........................	45
5.13	ผลการทดลองกับการหมุนและการปรับขนาดไปพร้อมๆกัน..............................	46
5.14	ผลการทดลองกับการหมุนและการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG ไปพร้อมๆกัน............	46
5.15	ผลการทดลองกับการเคลื่อนที่และการปรับขนาดไปพร้อมๆกัน........................	47
5.16	ผลการทดลองกับการเคลื่อนที่และการตัดรูปภาพไปพร้อมๆกัน........................	48
5.17	ผลการทดลองกับลายน้ำดิจิตอลตัวจริงที่อยู่ในรูปภาพเปรียบเทียบกับลายน้ำดิจิตอล (ปลอม) ที่ไม่สัมพันธ์กันอีก 999 ตัว..	48
6.1	ตัวอย่างการใช้ความถี่ในการประมาณค่าขาดหายที่ระดับ 100 $\times$ 100 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ (ข.) ภายหลังจากทำการ LPM และ (ค.) ภายหลังจากทำการ ILPM............	53
6.2	ตัวอย่างของลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพเปรียบเทียบกับลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ (ก.) กรณีที่ไม่มีการปรับขนาดของรูปภาพ (ข.) กรณีที่รูปภาพถูกลดขนาดลง และ (ค.) กรณีที่รูปภาพถูกเพิ่มขนาดขึ้น..	55
ก.1	รูปภาพ *Aerial* ขนาด 256 $\times$ 256 พิกเซล..	61
ก.2	รูปภาพ *Autumn* ขนาด 206 $\times$ 345 พิกเซล..	61
ก.3	รูปภาพ *Baboon* ขนาด 339 $\times$ 339 พิกเซล..	62
ก.4	รูปภาพ *Barbara* ขนาด 512 $\times$ 512 พิกเซล...	62
ก.5	รูปภาพ *Bavarian Couple* ขนาด 480 $\times$ 314 พิกเซล................................	63
ก.6	รูปภาพ *Boat* ขนาด 256 $\times$ 256 พิกเซล...	63
ก.7	รูปภาพ *Cameraman* ขนาด 256 $\times$ 256 พิกเซล.......................................	64
ก.8	รูปภาพ *F16* ขนาด 512 $\times$ 512 พิกเซล..	64
ก.9	รูปภาพ *Flowers* ขนาด 362 $\times$ 500 พิกเซล..	65
ก.10	รูปภาพ *Goldhill* ขนาด 512 $\times$ 512 พิกเซล...	65
ก.11	รูปภาพ *Kids* ขนาด 400 $\times$ 318 พิกเซล..	66
ก.12	รูปภาพ *Lena* ขนาด 512 $\times$ 512 พิกเซล..	66
ก.13	รูปภาพ *Peppers* ขนาด 512 $\times$ 512 พิกเซล...	67
ก.14	รูปภาพ *Racing bike* ขนาด 250 $\times$ 385 พิกเซล......................................	67

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

ก.15 รูปภาพ *San Francisco* ขนาด 256 × 256 พิกเซล.. 68

ก.16 รูปภาพ *Trees* ขนาด 258 × 350 พิกเซล.. 68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาและเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลดังกล่าวนี้ นอกจากจะทำให้มนุษย์สามารถเข้าถึงข้อมูล และใช้บริการทางด้านสารสนเทศได้อย่างสะดวกรวดเร็วขึ้นแล้ว ในทางกลับกันก็ทำให้เกิดการละเมิดลิขสิทธิ์ทางปัญญามากขึ้น โดยเฉพาะการคัดลอกสื่อดิจิตอลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นรูปภาพ, เสียงเพลง, ภาพยนตร์, ตลอดจนเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น ทำให้ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อใช้ปกป้องการละเมิดลิขสิทธิ์ต่างๆ เรียกว่าเทคนิคการซ่อนข้อมูล (Steganography) [1]-[2] ซึ่งจุดประสงค์ของการซ่อนข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในงานหลายลักษณะ ได้แก่ การซ่อนข้อมูลเพื่อใช้แสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ (Digital watermark), การซ่อนข้อมูลเพื่อเพิ่มรายละเอียดหรือคำอธิบายให้กับตัวสื่อ (Feature tagging), การซ่อนข้อมูลที่เป็นความลับ (Secret message hiding), การซ่อนข้อมูลเพื่อติดตามการแพร่กระจายของตัวสื่อ (Fingerprinting), ตลอดจนการซ่อนข้อมูลเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแก้ไขที่เกิดขึ้นกับตัวสื่อ (Tamper proofing) เป็นต้น [3]

โดยหลักการของการซ่อนข้อมูลนั้น ข้อมูล (Signature) ที่นำมาซ่อนมักมีขนาดเล็กๆ เช่น ชื่อของเจ้าของสื่อ, โลโก้ของบริษัท, หมายเลขสิทธิบัตร, ที่อยู่หรือหมายเลขโทรศัพท์ของเจ้าของ, ตลอดจนวันเดือนปีที่ถูกสร้างและคุณสมบัติอื่นๆที่เกี่ยวข้อง โดยข้อมูลดังกล่าวนี้จะถูกซ่อนลงไปในตัวสื่อโดยการเปลี่ยนแปลงแก้ไขคุณสมบัติของตัวสื่อเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะต้องไม่เป็นที่สังเกตเห็นได้โดยมนุษย์ [1], [3], [4]

ลายน้ำดิจิตอล (Digital watermark) เป็นรูปแบบหนึ่งของการซ่อนข้อมูล ซึ่งมักนิยมใช้กับรูปภาพเพื่อซ่อนข้อมูลบางอย่างที่ใช้แสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ โดยในงานวิจัยนี้เราจะกล่าวถึงกรณีของรูปภาพเป็นหลัก และเนื่องจากจุดประสงค์ข้อมูลดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับการปกป้องลิขสิทธิ์เป็นหลัก ดังนั้นคุณสมบัติที่สำคัญของลายน้ำดิจิตอลจึงจำเป็นจะต้องมีความคงทน (Robust) ต่อการถูกเปลี่ยนแปลง, แก้ไข, หรือทำลายเป็นอย่างสูง [4]-[6] ซึ่งการเปลี่ยนแปลงใดๆที่เกิดขึ้นกับตัวสื่อย่อมจะส่งผลให้ลายน้ำดิจิตอลภายในตัวสื่อถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขตามไปด้วย ทั้งโดยเจตนาและไม่เจตนา กล่าวคือ ลายน้ำดิจิตอลที่ดีจะต้องมีความทนทานภายใต้การประมวลผลใดๆที่อาจเกิดขึ้นกับรูปภาพได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากความต้องการต่างๆข้างต้น ทำให้ปัจจุบันมีเทคนิคในการทำลายน้ำดิจิตอลจำนวนมากถูกคิดค้นขึ้นมามากมาย ภายใต้ทฤษฎีและหลักการต่างๆ อย่างไรก็ดี เทคนิคต่างๆเหล่านั้นยังมีข้อจำกัดอยู่ ซึ่งบางวิธีนั้น ในการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลจำเป็นจะต้องมีการผันกลับกระบวนการ (Inverse operation) ในกรณีที่รูปภาพดังกล่าวถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขมา [7] โดยเฉพาะกับการเปลี่ยนแปลงแก้ไขในเชิงเรขาคณิต เพื่อให้ได้รูปภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงกับของเดิมให้มากที่สุดก่อน จึงจะสามารถเข้าสู่กระบวนการตรวจหาได้ ตัวอย่างเช่นหากรูปภาพถูกหมุนไปด้วยองศาเท่าใดก็ตาม เราจำเป็นจะต้องหมุนรูปภาพกลับมาด้วยองศาเท่าเดิมก่อน จึงจะสามารถดำเนินการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลภายในรูปภาพได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้เป็นการเพิ่มความซับซ้อนให้กับกระบวนการโดยเฉพาะในความเป็นจริงซึ่งเราไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้น การที่จะทำให้ได้รูปภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงกับของเดิมดังกล่าว เราจำเป็นจะต้องทดลองกระทำกับรูปภาพด้วยค่าต่างๆที่เป็นไปได้โดยการประมาณค่าต่างๆจำนวนมาก ซึ่งขั้นตอนนี้จะทวีความซับซ้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้นหากรูปภาพนั้นผ่านกระบวนการแปลงมามากกว่าหนึ่งอย่าง เช่นรูปภาพถูกหมุนและปรับขนาดมา เราอาจต้องทดลองหมุนรูปภาพกลับด้วยมุมต่างๆหลายๆครั้ง โดยที่แต่ละครั้งก็ทดลองปรับขนาดดูด้วยขนาดต่างๆ นอกจากนี้ ในบางเทคนิคยังต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการพิสูจน์ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ และยังเสียเวลาในการค้นหาอีกด้วย

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีเทคนิคในการทำลายน้ำดิจิตอลบางเทคนิคที่ไม่ผันแปรตามกระบวนการเปลี่ยนแปลงแก้ไขในเชิงเรขาคณิตก็ตาม [8]-[12] กล่าวคือในเทคนิคเหล่านั้น หากรูปภาพถูกหมุน, ปรับขนาด, หรือเคลื่อนที่มาแล้ว เทคนิคเหล่านั้นสามารถดำเนินการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลได้ทันที โดยไม่ต้องทำการผันกลับกระบวนการก่อน วิธีการดังกล่าวกระทำโดยการคำนวณหาความถี่โดยใช้ Fourier transform แล้วทำการ Resampling ค่า Magnitude ต่างๆที่ได้นี้ให้อยู่ในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว (Log-Polar coordinate) ซึ่งการคำนวณดังกล่าวนี้มีความซับซ้อนมาก และสามารถนำมาพัฒนาได้ยากในเชิงปฏิบัติ ตลอดจนคุณภาพของรูปภาพที่ได้ลดลงมากเนื่องจากการ Resampling ดังกล่าว [9]

ใน [13] ได้เสนอเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลโดยใช้แพตเทิร์นซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนซึ่งทำให้ลายน้ำดิจิตอลดังกล่าวไม่แปรผันตามกระบวนการหมุนได้ โดยรหัสข้อมูลที่ใช้ในแพตเทิร์นนี้ถูกเลือกขึ้นมาอย่างสุ่มจากเซตของ {-1, 1} เท่านั้น ดังนั้น เพื่อให้แพตเทิร์นดังกล่าวคงลักษณะเดิมตลอดไม่ว่าลายน้ำดิจิตอลจะถูกหมุนไปด้วยมุมเท่าใดก็ตาม ค่าของตำแหน่งต่างๆที่อยู่ภายในวงแหวนเดียวกันจะต้องมีค่าคงที่ตลอด จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงเป็นการจำกัดการกระจายของรหัสภายในลายน้ำดิจิตอล ซึ่งเป็นผลตามมาทำให้ลายน้ำดิจิตอลจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่พอเพื่อให้การตรวจสอบมีความน่าเชื่อถือในทางทฤษฎี [14]-[15]

จากปัญหาและความซับซ้อนต่างๆข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาหาเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่ไม่แปรผันตามกระบวนการเปลี่ยนแปลงเชิงเรขาคณิต (การหมุน, การปรับขนาด, และการเคลื่อนที่) โดยการใช้ฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลเชิงซ้อน (Complex exponential function) ซึ่งอาศัยพื้นฐานบนหลักการ Spread spectrum ซึ่งสามารถทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องมีการผันกลับกระบวนการใดๆ ตลอดจนไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาและดึงเอาข้อมูลกลับมาอีกด้วย อันจะช่วยลดความสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บและเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการค้นหารูปภาพดังกล่าวลงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ในงานวิจัยครั้งนี้ คือเพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพเพื่อใช้พิสูจน์ลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ (Ownership identification) และตรวจสอบการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขบนตัวสื่อ (Media authentication) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เราจะพิจารณาเฉพาะสื่อรูปภาพเท่านั้น โดยมีคุณสมบัติในด้านความคงทนต่อกระบวนการประมวลผลใดๆที่อาจเกิดขึ้นกับรูปภาพ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลได้ทันทีโดยไม่ขึ้นกับกระบวนการหมุน, การปรับขนาด, หรือการเคลื่อนที่ใดๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพ อีกทั้งยังมิต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจสอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในการศึกษาเพื่อ

2.1 หาเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่ไม่ผันแปรตามการเปลี่ยนแปลงแก้ไขในเชิงเรขาคณิต ซึ่งอาศัยการคำนวณที่ซับซ้อนน้อยกว่าเทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน

2.2 ทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้กับเทคนิคอื่นๆ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

3.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการซ่อนข้อมูลแบบลายน้ำดิจิตอล โดยมุ่งเน้นบนรูปภาพดิจิตอล 2 มิติเป็นหลัก (ทั้งภาพขาวดำ และภาพสี)

3.2 พิจารณาในขอบเขตของคุณสมบัติที่ไม่แปรผันตามการหมุน, การปรับขนาด, และการเคลื่อนที่ของรูปภาพ เป็นหลัก โดยไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

3.3 ยึดหลักการ Spread spectrum โดยอาศัยคุณสมบัติของ Complex exponential function ซึ่งกระทำในโดเมนความถี่ของรูปภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 มุ่งเน้นเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณของเทคนิคอื่นๆที่กระทำด้วยจุดประสงค์เดียวกัน

3.5 ลายน้ำดิจิตอลจะต้องมีคุณสมบัติคงทนต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงแก้ไขอื่นๆ ทั้งเชิงเรขาคณิต และไม่ใช่เชิงเรขาคณิต

3.6 ผลลัพธ์ของรูปภาพที่ได้จะต้องมีคุณภาพไม่แตกต่างจากเดิม และจะต้องไม่ทำให้เป็นที่สังเกตเห็นของมนุษย์ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

4.1 ทำให้ได้เทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพแบบใหม่ ที่ไม่แปรผันตามกระบวนการหมุน, การปรับขนาด, และการเคลื่อนที่ของรูปภาพ ซึ่งอาศัยการคำนวณที่น้อยกว่าเทคนิคอื่นๆที่มีในปัจจุบันมาก (เนื่องจากไม่ต้องมีการคำนวณตำแหน่งในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว)

4.2 สามารถนำไปพัฒนาได้จริง (ต่างจากเทคนิคที่ไม่แปรผันอื่นๆ ซึ่งมีข้อจำกัดมากมายในเชิงปฏิบัติ)

4.3 ผลลัพธ์ของรูปภาพที่ได้มีคุณภาพดีกว่าที่ได้จากเทคนิคอื่นๆที่กระทำในจุดประสงค์เดียวกัน

4.4 เป็นลายน้ำดิจิตอลที่มีความคงทนต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงแก้ไขต่างๆสูง เนื่องจากกระทำภายใต้หลักการของ Spread spectrum

4.5 ไม่จำเป็นต้องมีการจัดเก็บรูปภาพต้นฉบับไว้เพื่อใช้ในการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล อันจะทำให้ไม่ต้องสิ้นเลืองเนื้อที่จัดเก็บ อีกทั้งยังทำให้ไม่สิ้นเปลืองเวลาในการค้นหารูปภาพดังกล่าวอีกด้วย

1.5 แนวทางการวิจัย

การซ่อนข้อมูลลงในสื่อดิจิตอลเพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทางนั้นมีหลักการคล้ายคลึงกับการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยซึ่งมีการเข้ารหัสข้อมูลก่อนส่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์เอาเทคนิคการมอดูเลชันในระบบสื่อสารที่มีชื่อว่า Spread spectrum ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนต่างๆมาใช้ โดยการพิจารณารูปภาพที่ต้องการซ่อนเสมือนเป็นช่องสัญญาณที่สามารถจะทำการส่งได้ ในขณะที่มองลายน้ำดิจิตอลเสมือนเป็นสัญญาณที่จะทำการส่ง โดยการใช้เทคนิคดังกล่าวจะเป็นผลให้ลายน้ำดิจิตอลมีความคง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทนต่อกระบวนการแปลงต่างๆที่กระทำกับรูปภาพซึ่งเปรียบได้กับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้ ลายน้ำดิจิตอลจะถูกกำหนดขึ้นมาเป็นแพตเทิร์นเฉพาะ โดยเพื่อให้ลายน้ำดิจิตอลดังกล่าวมีความคงทนต่อกระบวนการหมุน แพตเทิร์นที่ใช้จะมีลักษณะเป็นวงแหวน ซึ่งจะเป็นผลให้ลายน้ำดิจิตอลจะยังคงมีลักษณะเดิมอยู่เสมอไม่ว่ารูปภาพที่เป็นสื่อจะถูกหมุนไปด้วยมุมใดๆก็ตาม ซึ่งภายในแพตเทิร์นดังกล่าวนี้จะประกอบไปด้วยวงกลมย่อยๆซ้อนกันในลักษณะวงแหวนแทนข้อมูลแต่ละตัวที่จะทำการซ่อน (Spreading code) โดยที่แต่ละวงแหวนนี้จะถูกสร้างขึ้นจากฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน (Complex exponential function) และกระทำในโดเมนความถี่ (Frequency domain) ซึ่งจากคุณสมบัติของฟังก์ชันและฟูเรียร์โดเมนดังกล่าวนี้จะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิตอลไม่แปรผันต่อกระบวนการหมุน, การปรับขนาด, และการเคลื่อนที่ของรูปภาพ ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป อีกทั้งยังมีความคงทนต่อกระบวนการแปลงแบบต่างๆ ทั้งเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

1.6 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1.6.1 กำหนดหัวข้อ เป้าหมาย จุดประสงค์ และขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

1.6.3 ศึกษาเทคนิคต่างๆที่มีอยู่ถึงแนวคิด หลักการ ข้อดี และข้อบกพร่องของแต่ละเทคนิค

1.6.4 ศึกษากระบวนการแปลงที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่การหมุน, การปรับขนาด, และการเคลื่อนที่ของรูปภาพ กับแต่ละเทคนิค

1.6.5 พัฒนาวิธีการทำลายน้ำดิจิตอลซึ่งสามารถซ่อนข้อมูลได้ภายใต้กระบวนการต่างๆข้างต้น

1.6.6 ทำการทดลอง ปรับปรุง และสรุปผล

1.6.7 จัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 1 จะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่ความเป็นมา จุดเริ่มต้นของปัญหาและความสำคัญของมัน ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษา โดยได้ระบุถึงหลักการหรือทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้ภายใต้สมมติฐานที่เรากำหนด โดยมีจุดมุ่งหมาย ขอบเขต และขั้นตอนในการศึกษาระบุไว้อย่างชัดเจน

สำหรับบทที่ 2 จะเป็นบทที่กล่าวถึงหลักการประมวลผลรูปภาพดิจิตอล (Digital image processing) ตั้งแต่โครงสร้างพื้นฐาน ไปจนถึงความหมายและสมการของการประมวลผลรูปภาพในลักษณะต่างๆ

บทที่ 3 เป็นบทที่อธิบายถึงความหมายและหลักการทั่วไปของการซ่อนข้อมูลและลายน้ำดิจิตอล ขั้นตอนของกระบวนการซ่อนและตรวจหาลายน้ำดิจิตอล, เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิตอลรูปแบบต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งปัญหาต่างๆที่ส่งผลต่อความไม่คงทนของลายน้ำดิจิตอล ตลอดจนแนวทางป้องกันการพิสูจน์ความถูกต้องของกรณีเหล่านั้น

ส่วนของการพัฒนาจะกล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยในบทนี้ได้อธิบายถึงแนวคิด ความเป็นไปได้และสมการต่างๆที่ใช้สำหรับการสร้างลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงรูปแบบหรือแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิตอล, กระบวนการซ่อนและการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล, การพิสูจน์คุณสมบัติที่ไม่แปรผันตามกระบวนการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ของรูปภาพ (RST invariant), การพิสูจน์ความมีลักษณะเฉพาะเจาะจง (Uniqueness) ของลายน้ำดิจิตอล, ตลอดจนประสิทธิภาพของอัลกอริธึมและการพิสูจน์ในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ, รวมทั้งการพิจารณาเรื่องของคุณภาพต่อการมองเห็น (Perceptibility) ของผลลัพธ์ที่ได้อีกด้วย

ในบทที่ 5 จะเป็นผลของการทดลองสร้างลายน้ำดิจิตอลเพื่อซ่อนลงในรูปภาพ และการทดสอบความทนทานต่อการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบต่างๆของรูปภาพ ได้แก่การเคลื่อนที่, การหมุน, การปรับขนาด, การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG, การปรับความสว่างของรูปภาพ, การปรับการตัดกันของสี, การปรับคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์, ความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของรูปภาพ, ความทนทานภายหลังที่รูปภาพถูกพิมพ์และนำไปสแกนกลับเข้ามา, การตัดแต่งรูปภาพ, ตลอดจนการทดสอบต่อการผสมกันของกระบวนการประมวลผลที่มากกว่าหนึ่งอย่าง

นอกจากนี้แล้ว ในบทที่นี้ยังได้มีการทดลองเกี่ยวกับการปลอมแปลงลายน้ำดิจิตอลในแบบต่างๆ เช่นในกรณีที่ไม่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ในรูปภาพ หรือการซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว เป็นต้น รวมทั้งยังได้มีการทดสอบในเรื่องของเวลาเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆที่มีในปัจจุบันอีกด้วย

สำหรับในบทสุดท้าย คือบทที่ 6 เป็นบทสรุปถึงเนื้อหาทั้งหมดที่ได้กล่าวมา ผลในการสร้างลายน้ำดิจิตอลและการซ่อนลงในรูปภาพ รวมทั้งผลการทดลองต่างๆ ตลอดจนบทวิเคราะห์ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1.8 รายชื่อบทความที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์

1.8.1 11th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP) 2004 Poznan, Poland (September 13-15, 2004): 419-422.

1.8.2 IEEE Region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology (TENCON) 2004 Chiang Mai, Thailand (November 21-24, 2004).

1.8.3 ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications 2, 2 (August 2004): 40-48.

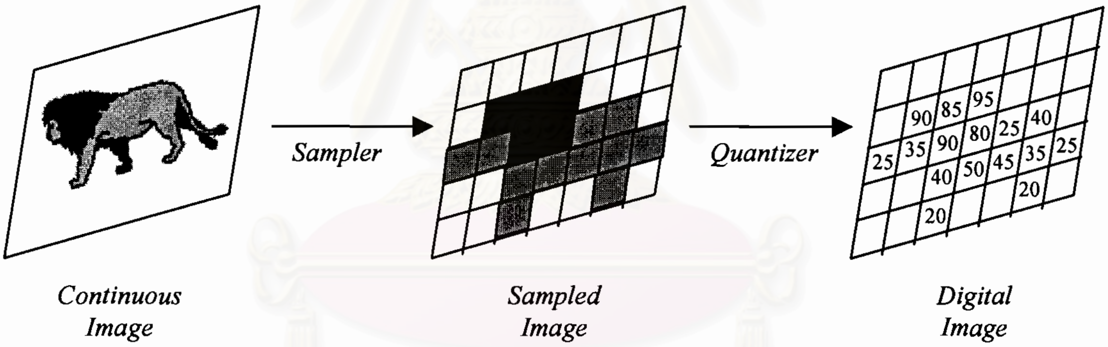
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การประมวลผลรูปภาพดิจิตอล

2.1 รูปภาพดิจิตอล (Digital image)

รูปภาพในธรรมชาติที่เรามองเห็นโดยทั่วไปนั้นเกิดจากการสะท้อนออกจากวัตถุของแสงอาทิตย์หรือแสงไฟมาตกกระทบเข้านัยน์ตามนุษย์ ซึ่งเป็นภาพที่มีลักษณะต่อเนื่อง (Continuous) โดยมีองค์ประกอบต่างๆของภาพเป็นการเปลี่ยนแปลงของความสว่างและสี แต่สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งประมวลผลกับข้อมูลที่เป็นตัวเลข การที่จะนำรูปภาพในธรรมชาติเข้ามาประมวลผลในเครื่องคอมพิวเตอร์ได้นั้น จำเป็นจะต้องนำรูปภาพมาผ่านกระบวนการแปลงให้อยู่ในรูปของตัวเลข (Image digitization) เสียก่อน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือการแซมปลิ้ง (Sampling) และการปรับในเชิงปริมาณ (Quantization) [16]-[18] ดังภาพที่ 2.1



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

ขั้นตอนแรกของกระบวนการดังกล่าวคือการแซมปลิ้ง โดยขั้นตอนนี้จะทำการเก็บค่าความสว่างจากตำแหน่งต่างๆที่กำหนดในรูปภาพต่อเนื่อง หลังจากนั้นค่าต่างๆเหล่านี้จะถูกนำไปแปลงให้อยู่ในรูปของตัวเลข ซึ่งเป็นขั้นตอนของการปรับในเชิงปริมาณ ค่าความสว่างของแต่ละตำแหน่งภายในภาพจะถูกพิจารณาให้อยู่ภายในขอบเขตของสี (Gray level หรือ Brightness intensity) ที่กำหนด กลายเป็นสีดำ เทา เรื่อยไปจนถึงขาว ซึ่งจากขั้นตอนนี้ข้อมูลที่ได้จะถูกจัดอยู่ในรูปของอาเรย์ 2 มิติ ซึ่งแต่ละตำแหน่งของอาเรย์นี้จะแทนแต่ละจุดภายในรูปภาพดิจิตอล เราเรียกแต่ละตำแหน่งดังกล่าวนี้ว่าพิกเซล (Picture element or Pixel)

จุดต่างๆภายในอาเรย์ 2 มิตินี้สามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของพิกัดเชิงเส้น (Cartesian coordinate) โดยกำหนดให้ (x, y) แทนตำแหน่งใดๆในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับของรูปภาพดิจิตอลซึ่งสัมพันธ์กับรูปภาพต่อเนื่อง ซึ่งจากตำแหน่งต่างๆของอาเรย์ที่เก็บค่าความสว่าง ณ ตำแหน่งนั้นๆของรูปภาพที่ตรงกันนี้เอง ทำให้เมื่อประกอบกันขึ้นมาจะสามารถแสดงผลให้กลายเป็นรูปภาพขึ้นมาได้

องค์ประกอบที่สำคัญถัดมาของรูปภาพดิจิตอลคือความละเอียดของภาพ (Resolution) ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวจะส่งผลให้รูปภาพที่ได้มีความเหมือนจริงจากรูปภาพต้นฉบับมากน้อยแตกต่างกันไป คุณภาพของรูปภาพดิจิตอลนั้นสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนพิกเซลที่ประกอบกันเป็นรูปภาพ และขอบเขต (Range) ของความสว่าง หรือค่าของตัวเลขที่เป็นไปได้ของรูปภาพดิจิตอลนั้นๆ [16]

ในหัวข้อถัดไปจะได้กล่าวถึงการประมวลผลรูปภาพแบบต่างๆที่มักพบเห็นได้บ่อย อันได้แก่การประมวลผลจุด (Point processing), การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformation), การปรับคุณภาพของรูปภาพ (Image enhancement) และการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression) ตามลำดับ โดยในที่นี้เรากำหนดให้ $I(x, y)$ แทนค่าความสว่างของรูปภาพต้นฉบับที่ตำแหน่ง (x, y) ในพิกัดเชิงเส้น โดยที่ $0 \leq x \leq X - 1$ และ $0 \leq y \leq Y - 1$ เมื่อ X, Y แทนขนาดตามแนวนอนและแนวตั้งของรูปภาพตามลำดับ

2.2 การประมวลผลรูปภาพดิจิตอล (Digital image processing)

การประมวลผลรูปภาพดิจิตอลหมายถึงกรรมวิธีใดๆที่กระทำกับรูปภาพดิจิตอล เพื่อทำการปรับปรุง, แก้ไข, หรือวิเคราะห์หรือรูปภาพ ไม่ว่าจะเพื่อให้รูปภาพนั้นมีคุณภาพดีขึ้นหรือแย่ลงก็ตาม โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์และซอฟท์แวร์ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์สำหรับจัดการกับรูปภาพในลักษณะต่างๆ อันได้แก่

2.2.1 การประมวลผลจุด (Point processing)

เป็นการประมวลผลพื้นฐานที่สุดของการประมวลผลรูปภาพทั้งหมด โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของรูปภาพทีละจุด ซึ่งได้แก่

2.2.1.1 การปรับความสว่างของรูปภาพ (Brightness adjustment)

การปรับความสว่างของรูปภาพ กระทำโดยการเพิ่มหรือลดค่าความสว่างของรูปภาพ ณ ตำแหน่งใดๆที่กำหนดด้วยค่าเดียวกันทั้งหมด โดยอาจกระทำรูปภาพเพียงบริเวณใดบริเวณหนึ่งเท่านั้น หรืออาจกระทำกับทั้งรูปภาพก็ได้ โดยมีสมการคือ

$$I'(x, y) = I(x, y) + c \tag{2.1}$$

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

2.2.1.2 การปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ (Contrast adjustment)

การปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพเป็นการเพิ่มหรือลดความสว่างของรูปภาพเช่นเดียวกับการปรับความสว่าง แต่ในการปรับการตัดกันของสีนี้ แต่ละตำแหน่งของภาพอาจถูกเพิ่มหรือลดค่าด้วยค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้จะทำให้รูปภาพดูมีความแตกต่างกันของสีมากขึ้น โดยมีสมการคือ [18]

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

เมื่อ (r_1, s_1), (r_2, s_2) คือตำแหน่งเริ่มต้นและสุดท้ายของการปรับ ตามลำดับ

2.2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformation)

การแปลงเชิงเรขาคณิตเป็นการประมวลผลรูปภาพที่ทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพิกเซลต่างๆจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งภายในรูปภาพ ตัวอย่างของการแปลงเชิงเรขาคณิตของรูปภาพได้แก่ การแปลงเชิงเส้นปกติ เช่นการหมุน, การปรับขนาด และการเคลื่อนย้ายส่วนของรูปภาพตลอดจนการแปลงไม่เชิงเส้น เช่นการม้วนหรือการบิดรูปภาพ (Wrapping) เป็นต้น [16]

2.2.2.1 การเคลื่อนย้ายรูปภาพ (Translation)

คือการเคลื่อนย้ายบางส่วนของรูปภาพหรือทั้งหมดไปไว้ยังตำแหน่งอื่นภายในรูปภาพเดียวกัน โดยมีสมการทั่วไปคือ

$$I'(x, y) = I(x + x_0, y + y_0) \tag{2.3}$$

เมื่อ x_0 และ y_0 คือระยะทางที่เคลื่อนย้ายไปในแนวแกนนอนและตั้งตามลำดับ

2.2.2.2 การปรับขนาดของรูปภาพ (Scaling)

คือการยืดหรือหดรูปภาพ เพื่อให้รูปภาพมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยมีสมการคือ

$$I'(x, y) = I(x \cdot S_x, y \cdot S_y) \tag{2.4}$$

เมื่อ S_x และ S_y คือ Scale factor ในแนวแกนนอนและตั้งตามลำดับ

2.2.2.3 การหมุนรูปภาพ (Rotation)

คือการหมุนรูปภาพ โดยยึดเอาจุดศูนย์กลางของภาพเป็นจุดหมุน มีสมการดังนี้

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

2.2.3 การปรับคุณภาพของรูปภาพ (Image enhancement)

เป็นการปรับคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ตัวกรอง (Filter) ทำหน้าที่ตัวกรองสัญญาณเพื่อตัดเอาบางองค์ประกอบของรูปภาพออกไป ทำให้รูปภาพที่ได้มีลักษณะนุ่มนวลลงหรือชัดเจนขึ้น ซึ่งมีสมการทั่วไปคือ

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

โดยที่ W แทนตัวกรองสำหรับกรองสัญญาณ ซึ่งมีขนาด $N \times N$

2.2.3.1 การปรับภาพให้นุ่มนวล (Smooth filtering)

เป็นการทำให้ภาพดูมัวลง หรือเพื่อลดสัญญาณรบกวนภายในภาพ โดยแยกเอาองค์ประกอบที่มีความถี่สูงในฟูเรียร์โดเมนออก ซึ่งได้แก่ขอบ และรายละเอียดที่คมชัดของรูปภาพ คงเหลือไว้เฉพาะองค์ประกอบที่มีความถี่ต่ำ ตัวกรองประเภทนี้จะมีสัมประสิทธิ์ทุกตัวเป็นบวก โดยมีผลรวมของสัมประสิทธิ์เหล่านั้นเท่ากับ 1 ตัวอย่างของตัวกรองลักษณะนี้คือ สัมประสิทธิ์ทุกตัวมีค่าเท่ากันหมด คือเท่ากับ $\frac{1}{N^2}$ ในสมการที่ (2.6) ตัวกรอง W จะเป็น [16]

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.3.2 การปรับภาพให้คมชัดขึ้น (Sharpening filtering)

เป็นการทำให้ภาพดูคมชัดขึ้น โดยแยกเอาองค์ประกอบที่มีความถี่ต่ำออก ทำให้สามารถมองเห็นรายละเอียดภายในรูปภาพได้ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะบริเวณขอบ, เส้น, หรือจุดต่างๆ ตัวกรองประเภทนี้จะมีสัมประสิทธิ์ตัวกลางเท่านั้นที่เป็นบวก นอกนั้นที่เหลือทั้งหมดเป็นลบ โดยมีผลรวมของสัมประสิทธิ์เหล่านั้นเท่ากับ 1 ตัวอย่างของตัวกรองลักษณะนี้คือ สัมประสิทธิ์ตัวกลางเท่ากับ N^2 นอกนั้นที่เหลือทั้งหมดเป็น 1 ในสมการที่ (2.6) ตัวกรอง W จะเป็น [16]

$$W = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

2.2.4 การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression)

การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG เป็นมาตรฐานของการบีบอัดรูปภาพที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งสามารถบีบอัดรูปภาพให้มีขนาดเล็กลงได้มากโดยไม่ทำให้คุณภาพของรูปภาพเสียไป โดยมาตรฐานแบบ JPEG นี้สามารถบีบอัดรูปภาพได้ในอัตราส่วนที่มากถึง 40 ต่อ 1 ซึ่งคุณภาพของรูปภาพจะสูญเสียไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [17] อย่างไรก็ดี กรรมวิธีการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG นี้ยังสามารถกระทำได้โดยไม่ทำให้คุณภาพของรูปภาพสูญเสียไป ซึ่งก็จะทำให้ความสามารถของการบีบอัดลดลงไปด้วย [16]

มาตรฐานการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG นี้มีอัลกอริธึมในการคำนวณอยู่ 4 แบบ คือ Sequential, Progressive, Lossless, และแบบ Hierarchical โดยที่อัลกอริธึมแบบ Sequential จะถือเป็นแบบมาตรฐานที่ใช้กัน อัลกอริธึมดังกล่าวกระทำโดยแบ่งรูปภาพออกเป็นบล็อกๆให้มีขนาด 8×8 ตลอดทั้งภาพ โดยที่แต่ละบล็อกจะถูกคำนวณตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ [19]

1. ***การแปลงความถี่*** แต่ละบล็อกของรูปภาพจะถูกคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันการแปลงความถี่ที่เรียกว่า DCT (Discrete Cosine Transform) ซึ่งจะทำให้ได้สัมประสิทธิ์ของความถี่ในแต่ละจุดของบล็อก
2. ***การปรับในเชิงปริมาณ*** สัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะถูกปรับให้อยู่ในช่วงที่กำหนด และกำจัดเอาองค์ประกอบที่มีความถี่สูงภายในบล็อกนั้นๆออก ส่วนอื่นๆที่เหลือก็จะถูกนำไปเข้ารหัสในขั้นตอนที่ 3 และ 4
3. ***การเข้ารหัส DC Huffman*** สัมประสิทธิ์ความถี่ที่มีความสูงไม่มากจะถูกนำมาเข้ารหัสโดยเทียบจากตารางรหัสของ Huffman
4. ***การเข้ารหัส AC Huffman*** ผลลัพธ์สุดท้ายจะถูกนำมาจัดใหม่จากที่อยู่ในรูปของอาเรย์ 2 มิติให้อยู่ในรูปของอาเรย์มิติเดียว โดยการไล่ค่าตามจุดต่างๆในลักษณะสลับ

ฟันปลา (Zigzag) ดังรูปที่ 2.2 ค่าต่างๆที่ถูกนำมาเรียงนี้จะถูกเข้ารหัสให้อยู่ในรูปของเศษส่วนอีกครั้งจึงจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์

	1	5	6	14	15	27	28
2	4	7	13	16	26	29	42
3	8	12	17	25	30	41	43
9	11	18	24	31	40	44	53
10	19	23	32	39	45	52	54
20	22	33	38	46	51	55	60
21	34	37	47	50	56	59	61
35	36	48	49	57	58	62	63

รูปที่ 2.2 ลำดับการเข้ารหัสในลักษณะฟันปลาของขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG โดยใช้ AC Huffman coding

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าในการบีบอัดด้วยอัตราส่วนมากๆจะทำให้คุณภาพของรูปภาพสูญเสียไปบ้าง แต่กรรมวิธีแบบ JPEG ก็ยังสามารถทำการผันกลับการบีบอัด (Decompression) เพื่อให้ได้รูปภาพที่มีคุณภาพใกล้เคียงเช่นเดิมได้อีกด้วย [16]-[18]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ลายน้ำดิจิตอล

3.1 หลักการซ่อนข้อมูลและลายน้ำดิจิตอล

3.1.1 หลักการซ่อนข้อมูล

การซ่อนข้อมูลในปัจจุบันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท เราสามารถจำแนกประเภทของการซ่อนข้อมูลตามวัตถุประสงค์ได้เป็น 2 ลักษณะคือ [3]

- การซ่อนข้อมูลเพื่อบันทึกรายละเอียดหรือข้อความอธิบายลงไป การซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้มักต้องการบันทึกข้อมูลจำนวนมากลงบนสื่อ และด้วยเหตุผลที่ว่าข้อมูลที่ถูกบันทึกลงบนสื่อดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อตัวผู้อ่านเอง ดังนั้นการซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้จึงไม่ได้ต้องการความปลอดภัยต่อการถูกแก้ไขหรือทำลายแต่อย่างใด ตัวอย่างของการซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้ได้แก่ Feature tagging และ Embedded caption เป็นต้น
- การซ่อนข้อมูลที่ต้องการความปลอดภัยสูง เช่นการซ่อนข้อมูลที่เป็นความลับ (Secret message hiding), การซ่อนข้อมูลเพื่อใช้แสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของในสื่อนั้น (Digital watermarking), ตลอดจนการซ่อนข้อมูลเพื่อตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงแก้ไข (Media authentication, Fingerprinting และ Tamper proofing) เป็นต้น ข้อมูลที่ถูกนำมาซ่อนในลักษณะนี้มักเป็นเพียงข้อความสั้นๆ หรือสัญลักษณ์ขนาดเล็กๆ ซึ่งต้องการความคงทนต่อการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขในรูปแบบต่างๆสูง ทั้งโดยเจตนาและไม่เจตนา

โดยหลักการของการซ่อนข้อมูลนั้น ข้อมูลที่เลือกมาจะถูกทำการซ่อนลงในสื่อดิจิตอลซึ่งทำหน้าที่ในลักษณะของพาหะ (Cover object) โดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสื่อนั้นให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะไม่ให้เป็นที่สังเกตเห็นของมนุษย์ได้ การซ่อนข้อมูลดังกล่าวอาจมีการใช้รหัสลับ (Secret key) ประกอบกับเทคนิคการเข้ารหัส (Cryptography) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้มากขึ้นก็ได้ โดยข้อมูลดังกล่าวจะสามารถดึงกลับมาได้โดยอัลกอริธึมเฉพาะเท่านั้น [1], [4] การซ่อนข้อมูลในลักษณะนี้บางครั้งเรียกว่า Steganography หรือ Data hiding สื่อที่สามารถใช้ในการซ่อนข้อมูลประกอบอาจเป็นรูปภาพ, ภาพเคลื่อนไหว, เสียง, หรือเอกสารอิเล็กทรอนิคส์ เป็นต้น ซึ่งสื่อแต่ละประเภทอาจใช้เทคนิคที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสื่อนั้นๆ ในส่วนของงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะสื่อประเภทรูปภาพเป็นหลัก

3.1.2 ลายน้ำดิจิตอล

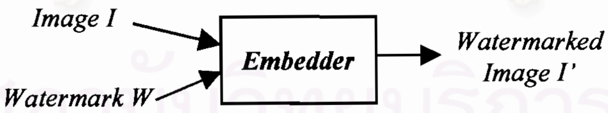
ลายน้ำดิจิตอล (Digital watermark) เป็นรูปแบบหนึ่งของการซ่อนข้อมูล ซึ่งมักนิยมใช้กับรูปภาพเพื่อซ่อนข้อมูลบางอย่างที่ใช้แสดงลิขสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ และด้วยจุดประสงค์ดังกล่าวนี้จึงทำให้ลายน้ำดิจิตอลจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือมีความคงทนสูงต่อกระบวนการแปลงต่างๆที่กระทำกับตัวสื่อ อันจะส่งผลให้ลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่นั้นถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขไปด้วย ทั้งโดยเจตนาและไม่เจตนา ซึ่งได้แก่ [7]

- การประมวลผลสัญญาณทั่วไป (Signal processings) ได้แก่ Digital-to-Analog, Analog-to-Digital, Resampling, Requantization (Dithering and Recompression), และ Common signal enhancement (เช่นการปรับ contrast และสีของรูปภาพ) เป็นต้น
- ความบิดเบือนอันเกิดจากการประมวลผลกับรูปภาพในเชิงเรขาคณิต (Geometric transformations) ได้แก่ การหมุน (Rotation), การปรับขนาด (Scaling), การเคลื่อนที่ (Translation) และการตัดบางส่วนของรูปภาพ (Cropping) เป็นต้น
- เจตนารมย์ที่มุ่งจะทำลายหรือปลอมแปลงลายน้ำดิจิตอล (Subterfuge attacks) ได้แก่ การทำลายน้ำดิจิตอลปลอมซ้อนลงบนรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว หรือการเจาะอัลกอริธึมเพื่อค้นหาตำแหน่งของลายน้ำและทำลายโดยตรง เป็นต้น

กระบวนการในการซ่อนข้อมูลหรือลายน้ำดิจิตอล ประกอบด้วย 2 ส่วน คือกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล และกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล [1], [5]

3.1.2.1 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล

รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

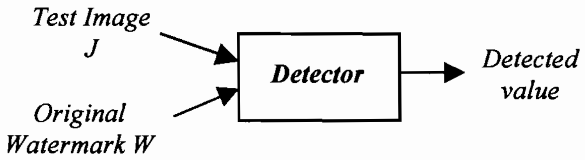
กำหนดให้ I แทนรูปภาพต้นฉบับ และ W แทนลายน้ำดิจิตอลแล้ว รูปภาพที่ผ่านการซ่อนลายน้ำดิจิตอล I' สามารถแสดงดังสมการที่ (3.1)

$$I'(x,y) = I(x,y) + W(x,y) \tag{3.1}$$

โดยที่ $0 \le x \le X-1$ และ $0 \le y \le Y-1$

3.1.2.2 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

รูปแบบของการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพใดๆ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบของกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

กำหนดให้ J แทนรูปภาพที่ต้องการนำมาตรวจหาลายน้ำดิจิตอล ซึ่งอาจมีลายน้ำดิจิตอลอยู่หรือไม่ก็ได้ และอาจผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงแก้ไขมาก่อน การตรวจหาลายน้ำดิจิตอลจากรูปภาพดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างรูปภาพ J กับลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ W ดังสมการที่ (3.2) [7]

$$sim(J,W) = \frac{\sum_{x=0}^{X-1}\sum_{y=0}^{Y-1} J(x,y)\cdot W^{*}(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=0}^{X-1}\sum_{y=0}^{Y-1} J(x,y)\cdot J^{*}(x,y)}} \qquad (3.2)$$

โดยที่ $W^{*}(x, y)$ และ $J^{*}(x, y)$ คือคอนจูเกต (Conjugate) ของ $W(x, y)$ และ $J(x, y)$ ตามลำดับ

ภายใต้สมมติฐานที่ว่ารูปภาพ J และลายน้ำดิจิตอล W มีการกระจายเป็นอิสระจากกันภายใต้ $N(0, 1)$ (เมื่อ $N(\mu, \sigma^2)$ หมายถึงการกระจายแบบปกติ (Gaussian distribution) ที่มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ μ และความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ σ^2) แล้ว หาก J และ W ไม่มีความสัมพันธ์กันแล้ว $sim(J, W)$ จะมีการกระจายเป็นไปตาม $N(0, 1)$ ด้วย [7], [20] โดยเราจะสรุปว่ารูปภาพดังกล่าวนี้มีลายน้ำดิจิตอล W ซ่อนอยู่หากผลลัพธ์ที่ได้จาก $sim(J, W)$ มีค่ามากกว่าค่า Threshold δ ที่กำหนดไว้ (ใน [7] กำหนดให้ $\delta = \mu \pm 6\sigma$ หรือเท่ากับ 6 ซึ่งทำให้มีค่าของเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 99.999999%) อย่างไรก็ดี การกำหนดค่าของ δ ดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการในระดับความน่าเชื่อถือ (Confidence interval) มากน้อยเพียงไร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เทคนิคการซ่อนลายน้ำดิจิตอลบนรูปภาพที่ใช้ในปัจจุบัน

3.2.1. Least significant bit replacement

Least significant bit replacement เป็นวิธีการที่มีแนวคิดพื้นฐานที่สุด โดยการเข้าไปแก้ไขบิตต่ำสุด (LSB) ของแต่ละพิกเซลภายในรูปภาพโดยตรง ด้วยการแทนที่ด้วยแต่ละบิตของลายน้ำดิจิตอล [1], [2], [4] และ [7] ซึ่งนับว่าเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการการคำนวณมาก แต่ในขณะเดียวกันความทนทานต่อการถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขบนตัวรูปภาพของวิธีการนี้ก็มีน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย ซึ่งในเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่พัฒนาขึ้นในยุคแรกๆส่วนใหญ่จะอาศัยแนวคิดดังกล่าวนี้ [21]

3.2.2 Patchwork

เป็นวิธีการเชิงสถิติ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าแต่ละพิกเซลภายในรูปภาพมีค่าความสว่างเฉลี่ยเป็น 0 และเป็นอิสระจากกัน ดังนั้นหากทำการเลือกพิกเซลขึ้นมาจำนวนสองกลุ่ม (a และ b) อย่างสุ่มแล้ว ผลต่างของค่าเฉลี่ยของความสว่างจากทั้งสองกลุ่มควรมีค่าเข้าใกล้ 0 ดังสมการที่ (3.3) [3]

$$\bar{x}_a - \bar{x}_b = 0 \tag{3.3}$$

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

จากข้อเท็จจริงดังกล่าว ในวิธีการ Patchwork นี้จะทำการแก้ไขค่าความสว่างในแต่ละพิกเซลของทั้งสองกลุ่มให้แตกต่างกัน โดยทำการเพิ่มค่าของแต่ละพิกเซลในกลุ่ม a ด้วยค่า α ซึ่งเป็นค่าน้อยๆ และในทำนองเดียวกันก็ลดค่าของแต่ละตำแหน่งในกลุ่ม b ด้วยค่าเดียวกัน ดังนั้นผลลัพธ์ที่คาดหวังจากสมการที่ (3.3) ควรเป็น

$$(\bar{x}_a + \alpha) - (\bar{x}_b - \alpha) = 2\alpha \tag{3.4}$$

ค่าและตำแหน่งต่างๆที่ทำการแก้ไขไปดังกล่าวก็จะกลายเป็นรหัสลับ (Secret key) ที่เจ้าของรูปภาพเก็บไว้เพื่อใช้พิสูจน์ลิขสิทธิ์บนตัวรูปภาพในภายหลัง ด้วยความซับซ้อนของวิธีการนี้เองจึงทำให้วิธีการนี้มีควาทนทานต่อกระบวนการแปลงต่างๆเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ดี วิธีการดังกล่าวไม่สามารถรองรับกับการแปลงเชิงเรขาคณิตต่างๆได้ เนื่องจากเมื่อรูปภาพถูกประมาณค่า (Interpolate) ใหม่ จะทำให้ค่าความสว่างใหม่ที่ได้ในแต่ละตำแหน่งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

3.2.3 Texture block coding

วิธีการนี้กระทำโดยการเลือกเอาส่วนหนึ่งของภาพไปฝังไว้ในอีกส่วนหนึ่งของภาพที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งจะปืนผลทำให้การเปลี่ยนแปลงใดๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพจะส่งผลให้บริเวณทั้งสองดังกล่าวได้รับผลกระทบในลักษณะเดียวกัน สำหรับกระบวนการตรวจหาลายน้ำนั้นสามารถกระทำได้โดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติ (Auto-Correlation) [3] นับว่าเป็นวิธีการที่มีความทนทานค่อนข้างสูง อย่างไรก็ดี วิธีการนี้ยังมีข้อเสียหลายประการ คือ

- ไม่มีการใช้รหัสลับหรืออัลกอริธึมพิเศษซึ่งแสดงลิขสิทธิ์ของเจ้าของเฉพาะเจาะจง
- สามารถกระทำได้กับเฉพาะบางรูปภาพที่มีส่วนคล้ายคลึงกันเท่านั้น
- การตรวจหาหลายน้ำดิจิตอลอาจผิดพลาดได้ในกรณีที่รูปภาพมีส่วนที่คล้ายคลึงกันโดยบังเอิญ
- ในขั้นตอนการพิจารณาเลือกพื้นผิวที่ใกล้เคียงกันภายในรูปภาพนั้น กระทำโดยการพิจารณาของมนุษย์เอง ไม่สามารถกระทำโดยอัตโนมัติได้

3.2.4 Spread spectrum watermarking

การซ่อนลายน้ำดิจิตอลโดยใช้เทคนิค Spread spectrum เป็นวิธีการที่มีความทนทานสูง วิธีการดังกล่าวอาศัยทฤษฎีการมอดูเลชัน (Modulation) ในระบบสื่อสารที่เรียกว่า Spread spectrum technique โดยวิธีการดังกล่าวใช้ขนาดความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) ที่มากกว่าที่ใช้ในเทคนิคการมอดูแลชันแบบอื่น อันเป็นผลทำให้สามารถลดขนาดของสัญญาณที่ส่งในแต่ละช่วงความถี่ลงได้ ทำให้การส่งสัญญาณด้วยเทคนิคดังกล่าวตรวจจับได้ยากเนื่องจากระดับสัญญาณในแต่ละย่านความถี่มีระดับต่ำมาก (อยู่ในระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่โดยทั่วไปในช่องสัญญาณ) [22] ซึ่งคุณสมบัติอันนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพได้ โดยการพิจารณารูปภาพที่ต้องการซ่อนเปรียบเสมือนช่องสัญญาณที่จะทำการส่งข้อมูล ในขณะที่แต่ละพิกเซลภายในรูปภาพเปรียบเสมือนสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร ซึ่งในที่นี้ลายน้ำดิจิตอลจะเปรียบเสมือนกับสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง คุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคนี้คือ ลายน้ำดิจิตอลที่ถูกซ่อนลงในรูปภาพนี้จะต้องไม่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจนเป็นที่สังเกตได้ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของเทคนิค Spread spectrum ดังกล่าวข้างต้น โดยการใช้เทคนิคดังกล่าว ทำให้ค่าความสว่างของลายน้ำดิจิตอลสามารถกำหนดให้อยู่ในระดับที่ต่ำเพียงพอที่จะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของเทคนิค Spread spectrum คือมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งในกรณีของการประยุกต์ใช้เพื่อการซ่อนลายน้ำดิจิตอลจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิตอลมีความทนทานต่อกระบวนการประมวลผลภาพ ทั้งในกรณีที่กระทำโดยมีเจตนาเพื่อการทำลายตัวลายน้ำที่ซ่อนอยู่ และในกรณีอื่น ๆ อาทิเช่น เพื่อผลในด้านการปรับปรุงภาพ หรือเพื่อการลดขนาดของข้อมูล เป็นต้น [7]

การซ่อนข้อมูลโดยวิธีการ Spread spectrum สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I'(x,y) = I(x,y) + \alpha \sum_{i=1}^{N} w_i S_i(x,y) \qquad (3.5)$$

โดยที่ α = ค่ากำหนดความเข้มของสัญญาณ (Amplitude factor)

N = จำนวนของรหัส Spreading code

w_i = ข้อมูลที่จะซ่อนลำดับที่ i

S_i = Spreading code ลำดับที่ i

สำหรับการตรวจหาและดึงเอาข้อมูลกลับคืนมานั้น ข้อมูล $\hat{w}_i$ ใดๆจะสามารถดึงกลับมาได้โดยใช้สมการที่ (3.2) อย่างไรก็ดี วิธีการที่นำเสนอใน [7] ยังมีข้อเสียในขั้นตอนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล ซึ่งในกรณีที่รูปภาพได้ผ่านกระบวนการแปลงบางอย่างมา โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในเชิงเรขาคณิต จำเป็นจะต้องมีการผันกลับกระบวนการแปลงที่เกิดขึ้นกับรูปภาพนั้น (เช่นหมุนรูปภาพกลับด้วยมุม -θ หากภาพดังกล่าวถูกหมุนไปจากแกนเดิมเป็นมุม θ เป็นต้น) ซึ่งทำให้เพิ่มความซับซ้อนในการตรวจสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีทั่วไปที่เราไม่สามารถทราบค่าของการผันกลับที่แท้จริงได้ ในกรณีดังกล่าวจำเป็นจะต้องมีการคำนวณเป็นจำนวณมากเพื่อทำการประมาณค่าของกระบวนการผันกลับดังกล่าว นอกจากนี้แล้ว วิธีการดังกล่าวยังจำเป็นจะต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการเปรียบเทียบเพื่อตรวจหาลายน้ำดิจิตอลอีกด้วย ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ ตลอดจนเวลาที่ใช้ในการค้นหารูปภาพดังกล่าวด้วย

3.2.5 RST invariant digital watermarking based on LPM

Rotation, Scale, and Translation (RST) invariant digital watermarking based on log-polar mapping (LPM) เป็นวิธีการที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการเข้ารหัสแบบ Spread spectrum ร่วมกับการแปลงแบบไม่แปรผัน (Transform-based invariant) ซึ่งใน [9] ใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier transform) ในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว (Log-Polar coordinate) พิจารณาสมการต่อไปนี้ [17], [18]

$$F(u,v) = \frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I(x,y) \cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{X}+\frac{vy}{Y}\right)} \qquad (3.6)$$

$$I(x,y) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} F(u,v) \cdot e^{j2\pi\left(\frac{ux}{X}+\frac{vy}{Y}\right)} \qquad (3.7)$$

เมื่อ $F(u, v)$ คือสัมประสิทธิ์ที่ได้จาก Fourier transform ของรูปภาพ $I(x, y)$

การเคลื่อนที่ (Translation) ใดๆของรูปภาพในโดเมนปกติ (Spatial domain) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโดเมนความถี่ (Frequency domain) เฉพาะในส่วนของเฟสเท่านั้น ดังสมการ

$$I(x-x_0,y-y_0) \Leftrightarrow F(u,v)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux_0}{X}+\frac{vy_0}{Y}\right)} \tag{3.8}$$

การหมุน (Rotation) ของรูปภาพในโดเมนปกติทำให้เกิดผลลัพธ์เช่นเดียวกันในโดเมนความถี่ ดังสมการ

$$I(r,\theta+\delta) \Leftrightarrow F(\Omega,\Phi+\delta) \tag{3.9}$$

เมื่อ (r, θ) แทนตำแหน่งใดๆในพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate) ที่สอดคล้องกับตำแหน่ง (x, y) ในพิกัดเชิงเส้น (Cartesian coordinate) ของโดเมนปกติและ (Ω,Φ) แทนตำแหน่งในพิกัดเชิงขั้วที่สอดคล้องกับ (u, v) ในพิกัดเชิงเส้นของโดเมนความถี่

การปรับขนาด (Scaling) ของรูปภาพในโดเมนปกติทำให้เกิดการผันกลับการปรับขนาด (Inverse scaling) ในโดเมนความถี่ ดังสมการ

$$I(\rho x,\rho y) \Leftrightarrow \frac{1}{|\rho|}F\left(\frac{u}{\rho},\frac{v}{\rho}\right) \tag{3.10}$$

จากสมการที่ (3.8) จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ใดๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพในโดเมนปกติจะไม่ส่งใดๆต่อค่าสัม-ประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงในโดเมนความถี่ (จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในองค์ประกอบของเฟสในโดเมนความถี่เท่านั้น) ดังนั้นในเทคนิคที่มีการคำนวณหาลายน้ำดิจิตอลที่กระทำในโดเมนความถี่จึงมีลักษณะที่ไม่แปรผันตามการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ใน [9] จึงได้เสนอแนวทางเพิ่มเติมในการสร้างลายน้ำดิจิตอลที่ไม่ผันแปรตามการหมุนและการปรับขนาดโดยการปรับรูปแบบของกระบวนการทั้งสองให้อยู่ในรูปแบบของการเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้

$$h = e^{\mu}\cos\theta \tag{3.11}$$

$$k = e^{\mu}\sin\theta \tag{3.12}$$

โดยที่ $(h, k) \in \Re^2, \mu \in \Re$ และ $0 \le \theta < 2\pi$

ตำแหน่ง (h, k) ใดๆในพิกัดเชิงเส้นจะมีตำแหน่ง (μ, θ) ในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว (Log-Polar coordinate) ที่ตรงกันเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น ดังนั้นกระบวนการหมุนและการปรับขนาดเมื่อแปลงให้อยู่ในระบบพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วดังกล่าวจะได้ดังสมการที่ (3.13) และ (3.14) ตามลำดับ

$$(h\cos\delta + k\sin\delta, -h\sin\delta + k\cos\delta) \Leftrightarrow (\mu, \theta + \delta) \tag{3.13}$$

$$(\rho h, \rho k) \Leftrightarrow (\mu + \log\rho, \theta) \tag{3.14}$$

จากสมการที่ (3.13) และ (3.14) จะเห็นได้ว่ากระบวนการหมุนและการปรับขนาดใดๆที่เกิดขึ้นกับรูปภาพในพิกัดเชิงเส้นปกติจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว และจากสมการที่ (3.8) ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ใดๆของรูปภาพจะไม่ส่งให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงในโดเมนความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นโดยการประยุกต์ใช้การแปลงแบบไม่แปรผันในระบบพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วนี้จะทำให้ลายน้ำดิจิตอลสามารถถูกตรวจพบได้ในโดเมนความถี่โดยไม่ต้องมีกระบวนการผันกลับ ซึ่งในกรณีของการใช้การแปลงฟูเรียร์ในพิกัดดังกล่าวจะมีผลเท่ากับการใช้การแปลงฟูเรียร์-เมลลิน (Fourier-Mellin transformation) ดังสมการที่ (3.14)

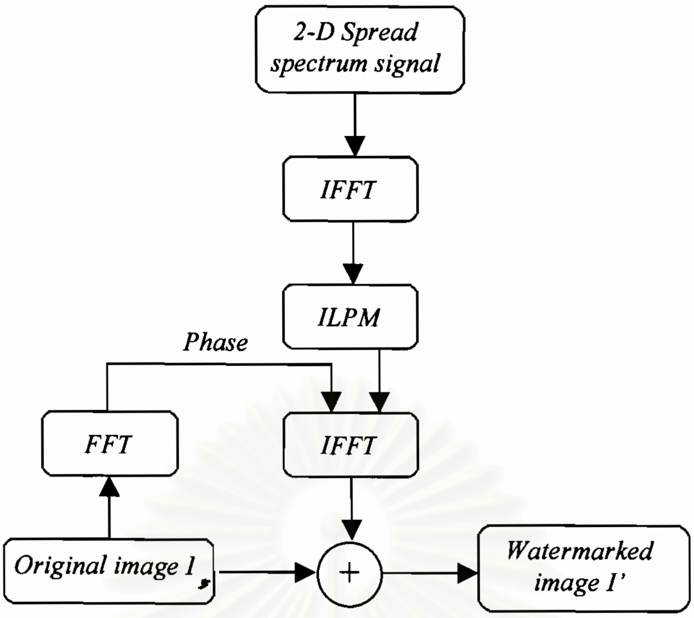
$$F_M(u,v) = \int_{0}^{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} I(e^{\mu}\cos\theta, e^{\mu}\sin\theta)\cdot e^{j(u\mu+v\theta)}\,d\mu\,d\theta \tag{3.15}$$

เมื่อ F_M (u, v) คือสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์-เมลลิน ซึ่งโมดูลัส (Modulus) ที่ได้จากการแปลงคือส่วนที่ไม่แปรผันของการปรับขนาดและการหมุน

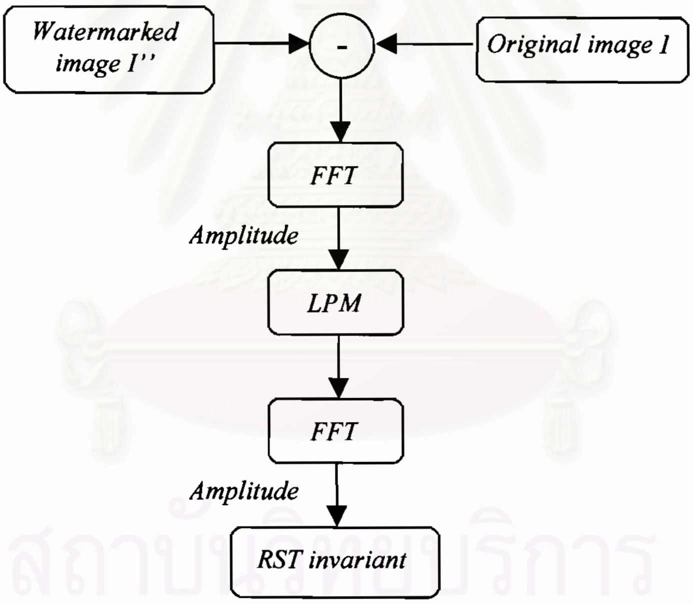
รูปที่ 3.3 ในหน้าถัดไป [9] แสดงโครงร่างของเทคนิคการทำลายน้ำดังกล่าว อย่างไรก็ดีแนวทางดังกล่าวในเชิงปฏิบัติมีข้อจำกัดบางประการ เนื่องจาก

- การแปลงฟูเรียร์-เมลลินในระบบพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วดังกล่าวทำให้เกิดการคำนวณที่ซับซ้อนมาก
- การแปลงกลับไปกลับมาระหว่างพิกัดเชิงเส้นกับพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วจะทำให้คุณภาพของทั้งรูปภาพและลายน้ำดิจิตอลเสียหายไปบางส่วน อันเกิดจากการประมาณค่าที่ขาดหาย (Interpolation) [23], [24]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3.3 โครงร่างของวิธีการทำลายน้ำดิจิตอลซึ่งกระทำใน Log-Polar Mapping (LPM) (ก.) กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอลและ (ข.) กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

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

3.3 ปัญหาของลายน้ำดิจิตอล

3.3.1 ความไม่คงทนต่อการประมวลผลรูปภาพของลายน้ำดิจิตอล

เทคนิคลายน้ำดิจิตอลแบบต่างๆที่กล่าวในหัวที่ 3.2 มีคุณสมบัติในด้านความทนทานแตกต่างกัน ในกรณีของความคงทนต่อกระบวนการประมวลผลรูปภาพทั่วไปนั้นสามารถแจกแจงได้ดังตารางที่ 3.1 [1], [3], [4] และ [7]

ตารางที่ 3.1 ความคงทนของลายน้ำดิจิตอลแต่ละวิธีเมื่อรูปภาพผ่านการประมวลผลแบบต่างๆ

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

3.3.2 แนวทางในการทำลายลายน้ำดิจิตอล

นอกจากการประมวลผลรูปภาพต่างๆที่ส่งผลต่อความทนทานของลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพแล้ว การสูญหายของลายน้ำดิจิตอลยังอาจเกิดได้จากความตั้งใจในการทำลายลายน้ำดิจิตอล (Subterfuge attacks) ของบุคคลที่ 3 อีกด้วย ตัวอย่างของวิธีการเหล่านั้นได้แก่

3.3.2.1 Jitter attack

วิธีการนี้แม้จะมักพบเห็นได้ในลายน้ำดิจิตอลบนสื่อประเภทเสียง แต่สำหรับรูปภาพนั้นก็สามารถกระทำได้โดยการก๊อปปี้เอาส่วนอื่นของภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงมาทับส่วนของรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิตอลซึ่งถูกซ่อนอยู่ในบริเวณดังกล่าวถูกทำลายไปอย่างสิ้นเชิง อีกทั้งรูปภาพที่ถูกแก้ไขดังกล่าวนี้ยังมีลักษณะใกล้เคียงของเดิม ซึ่งทำให้พิสูจน์ได้ยากมากขึ้นว่ามีการแก้ไขรูปภาพมาก่อนหรือไม่ [4]

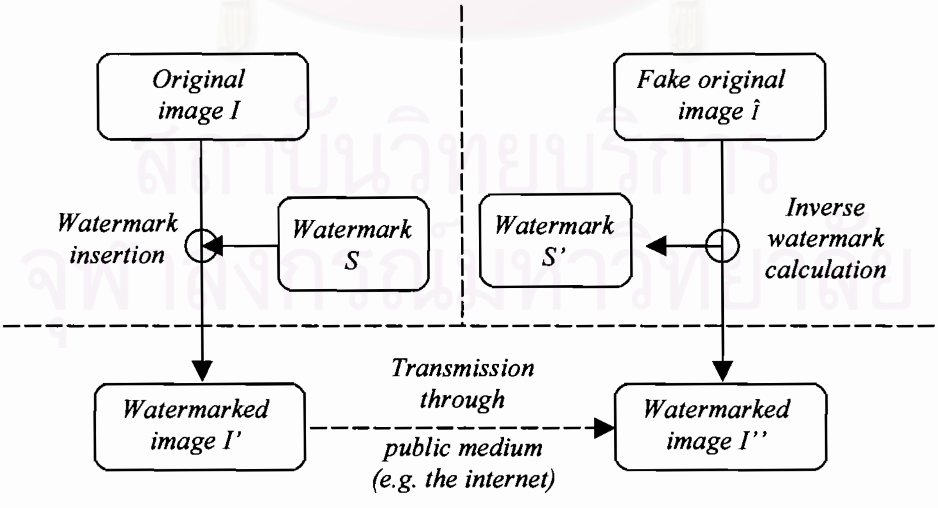
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2.2 Mosaic attack

วิธีการนี้เป็นการกระทำเพื่อหลบเลี่ยงการถูกตรวจพบลิขสิทธิ์ของรูปภาพบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์จากโปรแกรมสืบค้นข้อมูล (เช่น Searching robot หรือ Web crawler เป็นต้น) ที่ทำการสืบหารูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลของเจ้าของลิขสิทธิ์ซ่อนอยู่ตามเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆ วิธีการดังกล่าวนี้กระทำโดยการแตกรูปภาพออกเป็นส่วนย่อยๆจำนวนมาก ซึ่งก็จะทำให้ลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพถูกแยกออกเป็นส่วนๆเช่นเดียวกัน อันจะเป็นผลทำให้โปรแกรมสืบค้นข้อมูลไม่สามารถตรวจหาลายน้ำดิจิตอลพบได้ ซึ่งการแตกรูปภาพออกเป็นส่วนย่อยๆดังกล่าวนี้มิได้ส่งผลให้รูปภาพสูญเสียคุณภาพไปเมื่อนำส่วนของรูปภาพเหล่านั้นมาประกอบกัน [4]

3.3.2.3 Invalidating claims of ownership

เป็นวิธีการที่สร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมขึ้นมาจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลซ่อนอยู่ก่อนแล้ว วิธีการดังกล่าวกระทำโดยผู้ละเมิดลิขสิทธิ์ทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล S' ที่อยู่ในรูปภาพ I'' แล้วดึงเอาส่วนประกอบเหล่านั้นออกมาบางส่วนหรือทั้งหมด ทำให้ได้รูปภาพต้นฉบับปลอม $\hat{I}$ (รูปภาพ I'' ที่ไม่มีลายน้ำดิจิตอล S') พร้อมทั้งลายน้ำดิจิตอลปลอม S' ที่สามารถนำมาใช้พิสูจน์ความเป็นเจ้าของได้ [5], [6] (พิจารณารูปที่ 3.4 ประกอบ) ในกรณีที่ดึงเอาส่วนประกอบอื่นภายในรูปภาพออกมาด้วยนอกเหนือจากลายน้ำดิจิตอลนั้น จะกลายเป็นการทำให้รูปภาพต้นฉบับที่แท้จริง I มีบางส่วนของลายน้ำดิจิตอลปลอม S' ติดอยู่ด้วย ซึ่งจากเหตุการณ์ข้างต้นทำให้ทั้งเจ้าของลิขสิทธิ์ตัวจริงและบุคคลที่ทำการละเมิดลิขสิทธิ์ต่างมีรูปภาพต้นฉบับและลายน้ำดิจิตอลเป็นของตนเอง ทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าฝ่ายใดคือเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริง



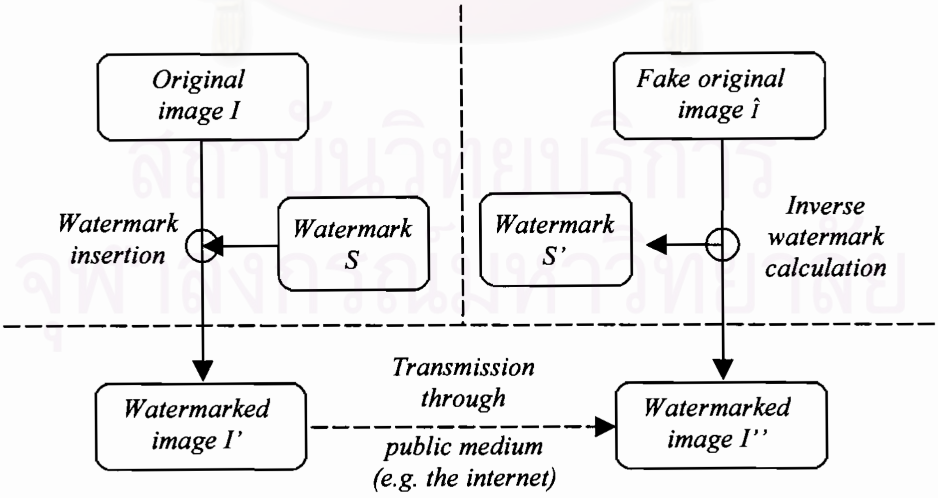
รูปที่ 3.4 วิธีการสร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลซ่อนอยู่ก่อนแล้ว

3.3.2.2 Mosaic attack

วิธีการนี้เป็นการกระทำเพื่อหลบเลี่ยงการถูกตรวจพบลิขสิทธิ์ของรูปภาพบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์จากโปรแกรมสืบค้นข้อมูล (เช่น Searching robot หรือ Web crawler เป็นต้น) ที่ทำการสืบหารูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลของเจ้าของลิขสิทธิ์ซ่อนอยู่ตามเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆ วิธีการดังกล่าวนี้กระทำโดยการแตกรูปภาพออกเป็นส่วนย่อยๆจำนวนมาก ซึ่งก็จะทำให้ลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพถูกแยกออกเป็นส่วนๆเช่นเดียวกัน อันจะเป็นผลทำให้โปรแกรมสืบค้นข้อมูลไม่สามารถตรวจหาลายน้ำดิจิตอลพบได้ ซึ่งการแตกรูปภาพออกเป็นส่วนย่อยๆดังกล่าวนี้มิได้ส่งผลให้รูปภาพสูญเสียคุณภาพไปเมื่อนำส่วนของรูปภาพเหล่านั้นมาประกอบกัน [4]

3.3.2.3 Invalidating claims of ownership

เป็นวิธีการที่สร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมขึ้นมาจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลซ่อนอยู่ก่อนแล้ว วิธีการดังกล่าวกระทำโดยผู้ละเมิดลิขสิทธิ์ทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล S' ที่อยู่ในรูปภาพ I' แล้วดึงเอาส่วนประกอบเหล่านั้นออกมาบางส่วนหรือทั้งหมด ทำให้ได้รูปภาพต้นฉบับปลอม $\hat{I}$ (รูปภาพ I' ที่ไม่มีลายน้ำดิจิตอล S) พร้อมทั้งลายน้ำดิจิตอลปลอม S' ที่สามารถนำมาใช้พิสูจน์ความเป็นเจ้าของได้ [5], [6] (พิจารณารูปที่ 3.4 ประกอบ) ในกรณีที่ดึงเอาส่วนประกอบอื่นภายในรูปภาพออกมาด้วยนอกเหนือจากลายน้ำดิจิตอลนั้น จะกลายเป็นการทำให้รูปภาพต้นฉบับที่แท้จริง I มีบางส่วนของลายน้ำดิจิตอลปลอม S' ติดอยู่ด้วย ซึ่งจากเหตุการณ์ข้างต้นทำให้ทั้งเจ้าของลิขสิทธิ์ตัวจริงและบุคคลที่ทำการละเมิดลิขสิทธิ์ต่างมีรูปภาพต้นฉบับและลายน้ำดิจิตอลเป็นของตนเอง ทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าฝ่ายใดคือเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริง



รูปที่ 3.4 วิธีการสร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลซ่อนอยู่ก่อนแล้ว

นอกจากวิธีการดังกล่าวแล้ว ในกรณีที่มีการตรวจสอบลิขสิทธิ์ของรูปภาพโดยบุคคลที่ทำการละเมิดเพียงฝ่ายเดียวอาจสามารถกระทำได้ง่ายมากขึ้น โดยการซ่อนลายน้ำดิจิตอลอีกตัวหนึ่ง (I_2) ซ้อนลงในรูปภาพที่ลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว I' ซึ่งในการพิสูจน์นั้นผู้ที่ทำการละเมิดจะใช้รูปภาพ I' ดังกล่าวเสมือนเป็นรูปภาพต้นฉบับในการตรวจสอบ ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 วิธีการซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว

3.3.3 แนวทางการป้องกันและการพิสูจน์ความถูกต้อง

เทคนิคต่างๆที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.2 มีความทนทานต่อการคุกคามในรูปแบบต่างๆมากน้อยแตกต่างกัน ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีวิธีการใดที่สามารถรองรับปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยลำพัง ในหัวข้อนี้จึงเป็นการเสนอการนำแนวทางอื่นมาใช้ร่วมกับเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลแบบปกติ ซึ่งจะสามารถเพิ่มความทนทานให้กับลายน้ำดิจิตอลต่อการคุกคามได้

3.3.3.1 การกำหนดโปรโตคอลของการซ่อนลายน้ำดิจิตอล

นอกจากการออกแบบลายน้ำดิจิตอลให้มีความคงทนต่อกระบวนการแปลงรูปแบบต่างๆแล้ว เรายังควรคำนึงถึงความปลอดภัยของลายน้ำดิจิตอลต่อการคุกคามของบุคคลที่ต้องการจะละเมิดลิขสิทธิ์ด้วย เช่นในกรณีของการซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้วนั้น เทคนิคลายน้ำดิจิตอลที่ดีควรจะต้องมีมาตรการป้องกันไม่ให้ซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนกันได้มากกว่าหนึ่งชั้น ซึ่งหากมีกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นจะต้องมีวิธีที่สามารถพิสูจน์ลำดับของการซ่อนได้ (เฉพาะลายน้ำดิจิตอลตัวที่ถูกซ่อนเป็นตัวแรกเท่านั้นที่เป็นของเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริง) ซึ่งแนวทางของการป้องกันปัญหาดังกล่าวได้แก่การบันทึกเวลา (Time-stamping) ตลอดจนการลงนามรับรองเอกสารโดยผู้ที่มีอำนาจบนลงรูปภาพเป็นต้น [4] ตัวอย่างอื่นของการควบคุมความปลอดภัยได้แก่ การเข้ารหัสลายน้ำดิจิตอลก่อนที่จะทำการซ่อนลงบนตัวสื่อโดยใช้คีย์สาธารณะ (Public-key encryption) [1] ซึ่งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับลายน้ำดิจิตอลมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ดี เทคนิคลายน้ำดิจิตอลที่มีในปัจจุบันยังไม่มีมาตรการรองรับปัญหาตรงจุดนี้

3.3.3.2 การกำหนดทิศทางในการซ่อนลายน้ำดิจิตอล

แม้ว่าจะมีการกำหนดแบบแผนต่างๆในการซ่อนลายน้ำดิจิตอลซึ่งทำให้ข้อมูลมีความปลอดภัยมากขึ้นก็ตาม แต่แนวทางดังกล่าวยังไม่สามารถรับรองความปลอดภัยได้เต็มที่ เนื่องจากปัจจุบันมีโปรแกรมหรือเครื่องมือต่างๆจำนวนมากที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับนักเจาะระบบคอมพิวเตอร์ (Hacker) ให้สามารถทำให้โปรแกรมละเลยมาตรการดังกล่าวได้ ดังนั้นตราบใดที่ยังไม่มีเทคนิคหรือแนวทางใดที่ให้ความปลอดภัยได้เพียงพอ เราอาจจำเป็นต้องทำการปกป้องลิขสิทธิ์โดยการกำหนดให้การประมวลผลลายน้ำดิจิตอลใดๆกระทำที่ที่แห่งใดแห่งหนึ่งเพียงแห่งเดียวเหมือนกันทั้งหมด เพื่อป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของบุคคลอื่นที่ไม่มีสิทธิ์ [4]

3.3.3.3 การกำหนดโครงร่างของลายน้ำดิจิตอลแบบไม่สามารถผันกลับได้

ตัวอย่างของวิธีการสร้างรูปภาพต้นฉบับปลอมจากรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลซ่อนอยู่ก่อนแล้วดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2.3 นั้น โครงร่างของเทคนิคลายน้ำดิจิตอลประเภทดังกล่าวจะมีลักษณะที่สามารถผันกลับขั้นตอนของกระบวนการสร้างได้ (Invertible) ทำให้สามารถดึงเอาองค์ประกอบบางส่วนของลายน้ำดิจิตอลออกมาได้ ดังนั้นแนวทางในการป้องกันปัญหาดังกล่าวคือการใช้โครงร่างของลายน้ำดิจิตอลให้เป็นแบบไม่สามารถผันกลับกระบวนการสร้างได้ (Noninvertible) แนวทางดังกล่าวอาจกระทำได้โดยการใช้ลายน้ำดิจิตอลที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันแบบทิศทางเดียว (One-way function) ซึ่งแม้จะทำการผันกลับกระบวนการสร้างลายน้ำดิจิตอลได้ แต่ก็ไม่สามารถดึงเอาลายน้ำดิจิตอลออกมาได้ หรือไม่เช่นนั้นแล้ว ในกรณีที่สามารถดึงเอาลายน้ำดิจิตอลออกมาได้การกระทำดังกล่าวจะต้องเป็นผลทำให้รูปภาพมีคุณภาพเสียหายไปอย่างมาก [5], [6]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพที่คืนสภาพได้จากการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน

4.1 รูปแบบของลายน้ำดิจิตอล

เทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอนี้จะยึดหลักตาม Spread spectrum technique โดยที่แพตทิร์นของลายน้ำดิจิตอลที่ใช้สำหรับซ่อนข้อมูลจะมีลักษณะเป็นวงแหวน โดยที่แต่ละรหัสของสัญญาณ (Spreading code) ของแพตเทิร์นนี้จะถูกแทนด้วยวงกลมย่อยๆซ้อนกันในลักษณะวงแหวนดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 แพตเทิร์นของลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอ

กำหนดให้ (r, θ) แทนตำแหน่งใดๆในพิกัดเชิงขั้ว ซึ่งมี (x, y) เป็นตำแหน่งในพิกัดเชิงเส้นที่สอดคล้องกัน และ R แทนขนาดของรัศมีของวงแหวนวงนอกสุดภายในแพตเทิร์นแล้ว พิจารณาสมการต่อไปนี้

$$W(r,\theta) = e^{j(\omega\theta+\phi_r)} \tag{4.1}$$

โดยที่ ω = ค่าความถี่เชิงมุมใดๆ

ϕ_r = เฟสที่เลือกขึ้นมาอย่างสุ่มสำหรับรัศมี r

$1 \le r \le R$

$0 \le \theta < 2\pi$

4.2 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล

รูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอล $F'(u, v)$ ในโดเมนความถี่จะได้จาก

$$F'(u,v) = \left(|F(u,v)| \cdot (1 + \alpha W(x,y))\right) \cdot e^{j\Phi(u,v)} \tag{4.2}$$

โดยที่ $|F(u, v)|$ และ $\Phi(u, v)$ คือ Fourier spectrum และ Phase angle ของ $F(u, v)$ ซึ่งได้จากสมการที่ (3.6) ตามลำดับ ส่วน α คือค่าที่ใช้กำหนดความเข้ม (Amplitude factor) ของลายน้ำดิจิตอลที่จะซ่อนลงในรูปภาพ

สำหรับรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอล $I'(x, y)$ ในโดเมนปกติจะได้จากการทำ Inverse Fourier transform ตามสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$I'(x,y) = \sum_{x=0}^{X-1}\sum_{y=0}^{Y-1} F'(u,v) \cdot e^{j2\pi\left(\frac{ux}{X}+\frac{vy}{Y}\right)} \tag{4.3}$$

อย่างไรก็ดี ลายน้ำดิจิตอล $W(x, y)$ นี้ อาจมีขนาดเท่ากับรูปภาพ $I(x, y)$ หรือเล็กกว่าก็ได้ ในกรณีที่ลายน้ำดิจิตอลมีขนาดเล็กกว่ารูปภาพ ลายน้ำดิจิตอลดังกล่าวนี้ควรจะถูกเติมขอบด้วยค่า 0 (สีดำ) ให้เต็มจนมีขนาดเท่ากับรูปภาพ หากขนาดของลายน้ำดิจิตอลมีขนาดเล็กมากเกินไปจะทำให้มีเฉพาะส่วนความถี่สูงของรูปภาพเท่านั้นที่ถูกซ่อน ซึ่งจะทำให้ลายน้ำดิจิตอลมีความคงทน (Robust) ต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงแก้ไขรูปภาพต่างๆเป็นอย่างสูง แต่ในทางกลับกันก็ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพต่อการมองเห็น (Perceptibility) ของรูปภาพ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีนัยสำคัญต่อการมองเห็นสูงสุด ดังนั้นเพื่อเป็นการประนีประนอมระหว่างความคงทนกับคุณภาพของรูปภาพที่ได้ ใน [13] และ [10] ได้แนะนำให้ซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในบริเวณตรงกลางระหว่างส่วนที่มีความถี่สูงกับความถี่ต่ำของรูปภาพ

4.3 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

กำหนดให้ $G(u, v)$ แทนสัมประสิทธิ์ที่ได้จาก Fourier transform ของรูปภาพที่นำมาตรวจสอบ $J(x, y)$ ซึ่งอาจมีลายน้ำดิจิตอลอยู่หรือไม่ก็ได้ แล้ว

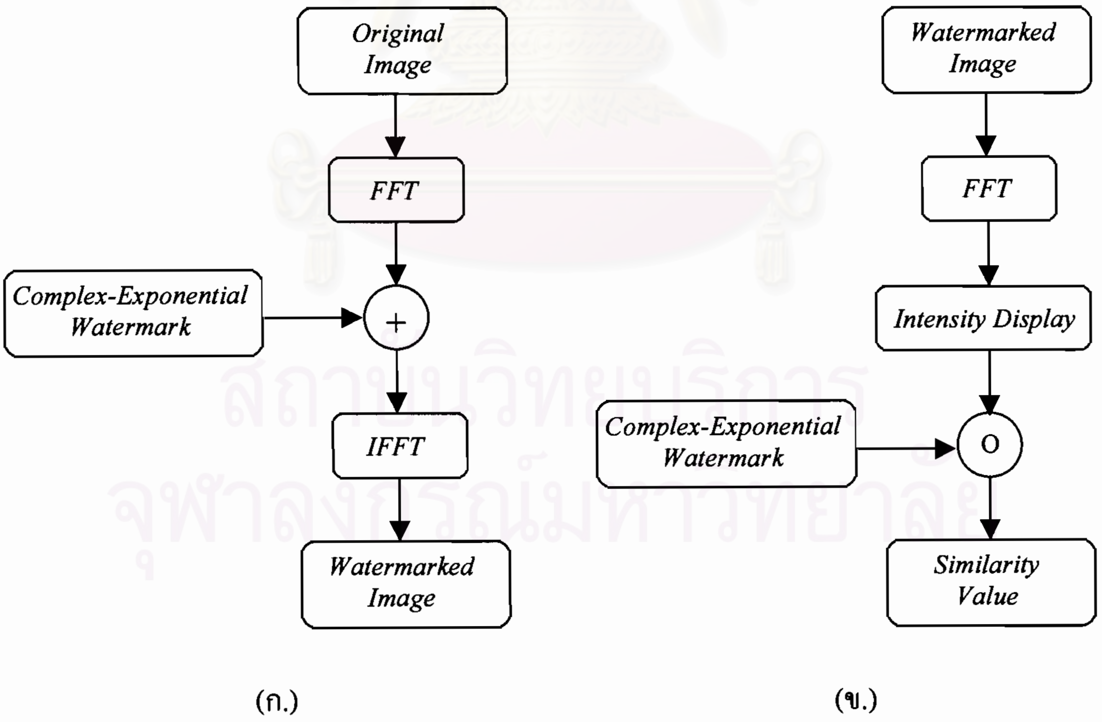
$$D(u,v) = \log(1 + |G(u,v)|) \tag{4.4}$$

จะเป็นฟังก์ชันสำหรับแสดงค่าความสว่าง (Intensity display function) ของสัมประสิทธิ์ซึ่งได้จาก Fourier transform [18] ของรูปภาพ $J(x, y)$ ดังกล่าว โดยกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลสามารถกระทำได้โดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง $D(u, v)$ กับลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ $W(x, y)$ ดังสมการ

$$sim(D,W) = \frac{\sum_{x=u=0}^{X-1} \sum_{y=v=0}^{Y-1} D(u,v) \cdot W^{*}(x,y)}{\sqrt{\sum_{u=0}^{X-1} \sum_{v=0}^{Y-1} D(u,v) \cdot D^{*}(u,v)}} \tag{4.5}$$

รูปภาพดังกล่าวจะสามารถสรุปได้ว่ามีลายน้ำดิจิตอล $W(x, y)$ ซ่อนอยู่หากผลลัพธ์ที่ได้จาก $sim(D, W)$ มีค่ามากกว่าค่า Threshold δ ที่กำหนดไว้ (ในที่นี้กำหนดให้ $\delta = 6$ ตามที่แนะนำไว้ใน [7]) รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพิจารณาเลือกค่า Threshold ดังกล่าวอยู่ในหัวข้อที่ 4.5

รูปที่ 4.2 (ก.) และ (ข.) ด้านล่างแสดงโครงร่างของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล และกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลของเทคนิคที่นำเสนอนี้ ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 โครงร่างของเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอ

(ก.) กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล (ข.) กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

4.4 การพิสูจน์คุณสมบัติ RST invariant

4.4.1 กระบวนการเคลื่อนที่ (Translation)

จากสมการที่ (3.8) ในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ใดๆที่เกิดขึ้นในโดเมนปกติ จะไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของ Fourier transform ในโดเมนความถี่

4.4.2 กระบวนการหมุน (Rotation)

ในกรณีที่รูปภาพถูกหมุนไปด้วยมุมใดๆ ซึ่งมีผลทำให้แพตเทิร์น W ที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพถูกหมุนไปด้วยมุมที่เท่ากัน กำหนดให้ $W_\varepsilon'(r, \theta)$ แทนแพตเทิร์นที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพซึ่งผ่านกระบวนการหมุนด้วยมุม ε ดังสมการ

$$W_\varepsilon'(r,\theta) = e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)} \tag{4.6}$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ภายในรูปภาพ ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ $W(r, \theta)$ กับลายน้ำดิจิตอล $W_\varepsilon'(r, \theta)$ ที่ถูกหมุนไปสำหรับตำแหน่งที่รัศมี r ใดๆสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$W(r,\theta)\circ W_\varepsilon'(r,\theta) = \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_r)}\cdot e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)}d\theta\right| \tag{4.7}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j(-\omega\theta-\phi_r+\omega\theta+\omega\varepsilon+\phi_r)}d\theta\right| \tag{4.8}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j\omega\varepsilon}d\theta\right| \tag{4.9}$$

$$= \left|e^{j\omega\varepsilon}(2\pi-0)\right| \tag{4.10}$$

$$= 2\pi \tag{4.11}$$

จากสมการที่ (4.7) ถึง (4.11) จะเห็นได้ว่าโดยการสร้างแพตเทิร์นตามสมการข้างต้น ทำให้ผลการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล (ค่าสหสัมพันธ์) ที่ได้มีค่าคงที่คือ 2π ซึ่งไม่ขึ้นกับมุมของรูปภาพที่ถูกหมุนไปจากตำแหน่งเดิม ซึ่งจะเป็นผลทำให้การตรวจสอบลายน้ำดิจิตอลด้วยวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องทราบค่าของมุมที่รูปภาพถูกหมุนไป จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผันกลับใดๆ

4.4.3 กระบวนการปรับขนาด (Scaling)

เนื่องจากโครงสร้างของแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิตอลในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นวงแหวนซ้อนกันหลายๆวง โดยที่แต่ละวงนั้นมีความถี่เชิงมุมเหมือนกันหมด แต่ต่างกันที่เฟสเริ่มต้น ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่าวงแหวนที่อยู่ด้านนอกกับวงแหวนที่อยู่ด้านในก็คือเวอร์ชันที่ถูกปรับขนาดของกันและกัน พิจารณาสมการต่อไปนี้

$$W(r_1,\theta)\circ W(r_2,\theta) = \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_{r_1})}\cdot e^{j(\omega\theta+\phi_{r_2})}d\theta\right| \tag{4.12}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j(-\omega\theta-\phi_{r1}+\omega\theta+\phi_{r2})}d\theta\right| \tag{4.13}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j(-\phi_{r1}+\phi_{r2})}d\theta\right| \tag{4.14}$$

$$= \left|e^{j(-\phi_{r1}+\phi_{r2})}(2\pi-0)\right| \tag{4.15}$$

$$= 2\pi \tag{4.16}$$

จากสมการที่ (4.12) ถึง (4.16) จะเห็นได้ว่าค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าคงที่คือ 2π ซึ่งไม่ขึ้นกับเฟสเริ่มต้นของแต่ละวงแหวน อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติจริงขนาดของรูปภาพที่ถูกปรับขนาดไปจะแตกต่างจากขนาดของลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ ดังนั้นก่อนการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์นั้น ในกรณีที่รูปภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น เราจำเป็นจะต้องเติมขอบ (Pad) ของลายน้ำดิจิตอลด้วยค่า 0 เพื่อให้มีขนาดเท่ากับรูปภาพ ในทำนองเดียวกัน หากรูปภาพถูกลดขนาดลง ลายน้ำดิจิตอลควรจะต้องถูกตัดขอบ (Crop) เพื่อให้มีขนาดเท่ากับรูปภาพเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ดีจากหลักการดังกล่าวนี้ คุณสมบัติการปรับขนาดอาจไม่สามารถกล่าวได้ว่า "ไม่แปรผัน" (Invariant) เสียทีเดียว แต่อาจเรียกได้ว่า "ยืดหยุ่น" (Resilient) ต่อการปรับขนาด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ความไม่ซ้ำกันของลายน้ำดิจิตอล (Uniqueness)

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดข้อหนึ่งของลายน้ำดิจิตอลก็คือจะต้องมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียว (Uniqueness) กล่าวคือลายน้ำดิจิตอลแต่ละอันจะต้องมีลักษณะเฉพาะเจาะจงของตัวเอง และต้องไม่ซ้ำกับลายน้ำดิจิตอลอันอื่นแม้ว่าจะถูกสร้างขึ้นมาจากเจ้าของคนเดียวกัน โดยใช้เทคนิคหรือวิธีการตลอดจนค่าพารามิเตอร์ต่างๆชุดเดียวกันก็ตาม

โดยอาศัยวิธีการในการมอดูเลชัน (Modulation) ของ Spread spectrum technique ซึ่งสัญญาณที่นำมาเข้ารหัสนั้นถูกสร้างขึ้นมาจากชุดข้อมูลสุ่มเทียม (Pseudo random) [25], [26] โดยในกรณีของเทคนิคที่นำเสนอนี้ก็คือค่า ϕ_r ซึ่งก็คือเฟสที่เลือกขึ้นมาอย่างสุ่มสำหรับแต่ละรัศมี r นั่นเอง โดยที่ $0 \leq \phi_r < 2\pi$ และเนื่องจาก $\phi_r \in \Re$ ดังนั้นเราสามารถกล่าวได้ว่าโอกาสความเป็นไปได้ของ ϕ_r ที่จะเป็นค่าใดๆภายในช่วงดังกล่าวมีจำนวนเข้าใกล้ระยะอนันต์ (∞)

กำหนดให้ n แทนจำนวนวงแหวนทั้งหมดภายในลายน้ำดิจิตอล W แล้ว โอกาสที่ลายน้ำดิจิตอล V ซึ่งมีจำนวนวงแหวนเท่ากันจะมีค่า ϕ_r ของแต่ละวงแหวนเหมือนกับลายน้ำดิจิตอล W ทุกวงมีค่าเท่ากับ

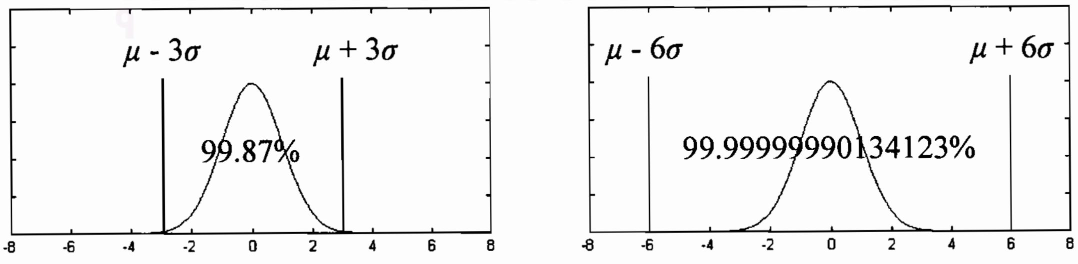
$$p(\underset{n}{\overset{r=1}{\forall}} \phi_{r_W} = \phi_{r_V}) \approx \frac{1}{\infty} \times \frac{1}{\infty} \times \ldots \times \frac{1}{\infty} \text{ (n ครั้ง)} \tag{4.17}$$

$$\approx 0 \tag{4.18}$$

จากสมการที่ (4.17) และ (4.18) ข้างต้น เราสามารถวิเคราะห์ต่อได้ว่า หากรูปภาพ I' ซึ่งมีลายน้ำดิจิตอล W ซ่อนอยู่ถูกนำมาตรวจสอบกับลายน้ำดิจิตอล V (ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กัน)โดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์แล้ว ภายใต้การกระจายแบบปกติ (Normal distribution) ที่มีค่าเฉลี่ย $\mu = 0$ และความแปรปรวน $\sigma^2 = 1$ เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น (Confidence interval) ที่ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จะมีค่าไม่เกิน $\mu \pm 3\ \sigma$ มีค่าประมาณ 99.87% [27]-[29] ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก.)

ใน [7] และ [20] กำหนดให้ค่า Threshold δ ที่ใช้สำหรับตัดสินว่ารูปภาพและลายน้ำดิจิตอลที่นำมาตรวจสอบมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ไว้เท่ากับ $\mu \pm 6\ \sigma$ กล่าวคือรูปภาพดังกล่าวจะพิจารณาว่ามีลายน้ำดิจิตอลที่นำมาตรวจสอบนี้ก็ต่อเมื่อค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่ามากกว่าค่า Threshold δ ที่กำหนด คือมากกว่า 6 นั่นเอง โดยที่ค่าดังกล่าวจะทำให้ระดับเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ 99.99999990134123% [27]-[29] ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข.) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือโอกาสที่ลายน้ำดิจิตอล 2 อันซึ่งถูกสร้างขึ้นมาบนพื้นฐานของเทคนิคที่นำเสนอนี้จะสัมพันธ์กัน (ให้ค่าสหสัมพันธ์ที่มากกว่า 6) โดยบังเอิญ มีความเป็นไปได้เพียง 1 ใน 1,000,000,000 (พันล้าน) เท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก.) (ข.)

รูปที่ 4.3 ระดับเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น (ก.) ที่ $\mu \pm 3\ \sigma$ (ข.) ที่ $\mu \pm 6\ \sigma$

4.6 ประสิทธิภาพของอัลกอริธึม (Algorithmic consideration)

4.6.1 LPM-based technique

จากรูปที่ 3.3 ในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ใช้วิธีการดังกล่าวประกอบด้วยกระบวนการในการคำนวณหลักๆ 4 กระบวนการ ได้แก่ Fast Fourier Transform (FFT), Inverse Fast Fourier Transform (IFFT), Log-Polar Mapping (LPM), และ Inverse Log-Polar Mapping (ILPM) โดยอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณ (The order of complex multiplication) [30], [31] ของกระบวนการทั้ง 4 สามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

4.6.1.1 Fast Fourier Transform และ Inverse Fast Fourier Transform

ใน [32] ได้เสนอวิธีการคำนวณแบบ FFT ซึ่งเป็นรูปแบบที่ปรับปรุงมาจากสมการ Fourier transform ปกติ ดังแสดงในสมการที่ (3.6) ในบทที่ 3 โดยพจน์ของเลขชี้กำลัง (Exponent) ไม่จำเป็นต้องถูกคำนวณใหม่ทุกครั้งที่ตำแหน่ง u และ v ของ Fourier coefficient เปลี่ยนแปลงไป แต่สามารถคำนวณเพียงครั้งเดียวและเก็บผลลัพธ์ไว้เพื่อนำมาใช้ใหม่ได้ โดยใน [32], [33] พิสูจน์ให้เห็นว่าอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณของ FFT 2 มิติมีค่าเท่ากับ $O\,(XY \log_2 XY)$ เมื่อ X และ Y ในที่นี้แทนจำนวนพิกเซลในแนวนอนและแนวตั้งของรูปภาพตามลำดับ

ในทำนองเดียวกัน สมการที่ (3.7) แสดงการคำนวณหา IFFT ของ $F'\,(u, v)$ ซึ่งจากการอาศัยหลักการของ [32] ข้างต้น อันดับของความซับซ้อนในการคำนวณของ IFFT 2 มิติมีค่าเท่ากับ $O\,(XY \log_2 XY)$ เช่นเดียวกัน

4.6.1.2 Log-Polar Mapping และ Inverse Log-Polar Mapping

ตำแหน่ง (x, y) ใดๆในพิกัดเชิงเส้นปกติ จะถูกคำนวณให้อยู่ในรูปของพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วโดยใช้สมการที่ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ ดังนั้นอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณของ LPM จึงมีค่าเท่ากับ $O\,(XY)$ และเช่นเดียวกันสำหรับ ILPM

จากรูปที่ 3.3 (ก.) กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอลของเทคนิคดังกล่าวต้องใช้การคำนวณ FFT 1 ครั้ง, IFFT 2 ครั้ง, และ ILPM อีก 1 ครั้ง (ไม่นับรวมขั้นตอนการบวกลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพ) ดังนั้นอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$Embed_{\text{LPM}}\,(I, W) \in O\,(3 \times XY \log_2 XY + XY) \tag{4.19}$$

ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 3.3 (ข.) แสดงกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลของเทคนิคดังกล่าว ซึ่งต้องใช้การคำนวณ FFT 2 ครั้ง และ LPM อีก 1 ครั้ง (ไม่นับรวมขั้นตอนการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์) ดังนั้นอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$Detect_{\text{LPM}}(J, W) \in O(2 \times XY \log_2 XY + XY) \tag{4.20}$$

4.6.2 Complex Exponential-based technique

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยกระบวนการในการคำนวณหลักๆ 3 กระบวนการ ได้แก่ FFT, IFFT, และ Intensity Displaying Function (IDF) โดยอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณของ IDF จะเท่ากับ $O(XY)$

ในรูปที่ 4.2 (ก.) กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอลของเทคนิคที่นำเสนอนี้ใช้การคำนวณ FFT 1 ครั้ง และ IFFT อีก 1 ครั้ง (ไม่นับรวมขั้นตอนการบวกลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพ) ดังนั้นอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$Embed_{\text{CE}}(I, W) \in O(2 \times XY \log_2 XY) \tag{4.21}$$

และจากรูปที่ 4.2 (ข.) กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลของเทคนิคที่นำเสนอนี้จะต้องใช้การคำนวณ FFT 1 ครั้ง และการคำนวณหา Intensity display function อีก 1 ครั้ง (ไม่นับรวมขั้นตอนการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์) ดังนั้นอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$Detect_{\text{CE}}(J, W) \in O(XY \log_2 XY + XY) \tag{4.22}$$

4.6.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

4.6.3.1 กระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล

$$\text{Complexity}\left(\frac{Embed_{LPM}}{Embed_{CE}}\right) = \lim_{X\to\infty, Y\to\infty} \frac{3XY\log_2 XY + XY}{2XY\log_2 XY} \tag{4.23}$$

$$= \lim_{X\to\infty, Y\to\infty} \frac{3}{2} + \frac{1}{2\log_2 XY} \tag{4.24}$$

$$= \frac{3}{2} + \frac{1}{\infty} \tag{4.25}$$

$$= \frac{3}{2} \tag{4.26}$$

$$\therefore Embed_{\text{LPM}} \in Embed_{\text{CE}} \in \Theta(XY \log_2 XY) \tag{4.27}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.3.2 กระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

$$\text{Complexity}\left(\frac{Detect_{LPM}}{Detect_{CE}}\right) = \lim_{X\to\infty,Y\to\infty} \frac{2XY\log_2 XY + XY}{XY\log_2 XY + XY} \tag{4.28}$$

$$= \lim_{X\to\infty,Y\to\infty} \frac{2XY\log_2 XY + 2XY - XY}{XY\log_2 XY + XY} \tag{4.29}$$

$$= \lim_{X\to\infty,Y\to\infty} \frac{2(XY\log_2 XY + XY) - XY}{XY\log_2 XY + XY} \tag{4.30}$$

$$= \lim_{X\to\infty,Y\to\infty} 2 - \frac{XY}{XY(\log_2 XY + 1)} \tag{4.31}$$

$$= \lim_{X\to\infty,Y\to\infty} 2 - \frac{1}{\log_2 XY + 1} \tag{4.32}$$

$$= 2 - \frac{1}{\infty} \tag{4.33}$$

$$= 2 \tag{4.34}$$

$$\therefore Detect_{\text{LPM}} \in Detect_{\text{CE}} \in \Theta\,(XY\log_2 XY) \tag{4.35}$$

จากสมการที่ (4.27) และ (4.35) สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้มีอันดับของความซับซ้อนในการคำนวณเท่ากันกับเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว ซึ่งมีค่าอยู่ใน Exact order ของ $\Theta\,(XY\log_2 XY)$

4.7 คุณภาพต่อการมองเห็นของผลลัพธ์ (Perceptibility)

ในการวัดคุณภาพต่อการมองเห็น (Perceptibility) ของผลลัพธ์จากรูปภาพที่ได้หลังจากทำการซ่อนลายน้ำดิจิตอลแล้วนั้น [8], [11], [12] และ [20] ใช้ฟังก์ชัน Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) ในการวัดเปรียบเทียบกับรูปภาพต้นฉบับ ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้ [15]

$$PSNR = \frac{\sum_{x=0}^{X-1}\sum_{y=0}^{Y-1} I'(x,y)^2}{\sum_{x=0}^{X-1}\sum_{y=0}^{Y-1}\left(I'(x,y) - I(x,y)\right)^2} \tag{4.36}$$

แม้ว่าจะยังไม่มีค่า Threshold ของ PSNR ที่เป็นมาตรฐานสำหรับการวัดคุณภาพของรูปภาพภายหลังจากการซ่อนลายน้ำดิจิตอลในปัจจุบัน ใน [20] แนะนำให้ PSNR ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 40 dB เป็นต้นไป

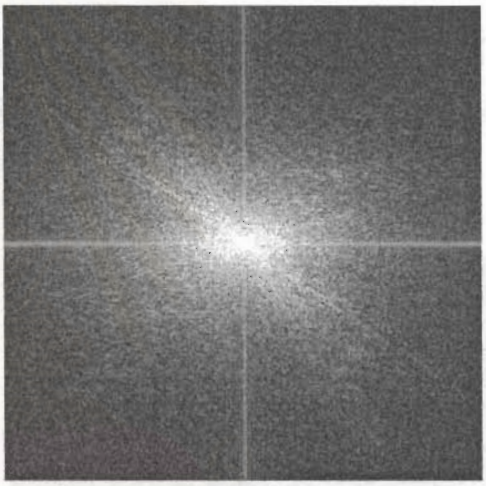
บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 การซ่อนลายน้ำดิจิตอลและการตรวจหา

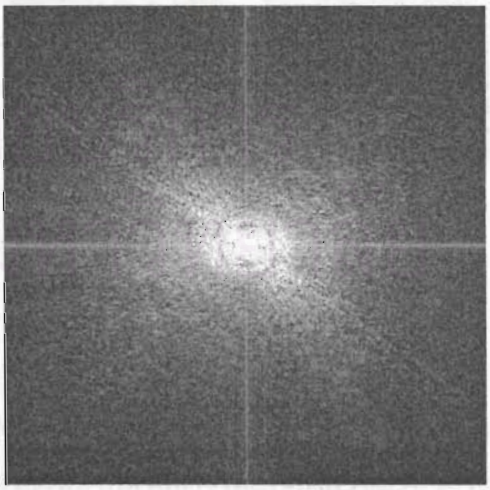
ในการทดลองแรก เราได้ทำการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพที่ชื่อ *Lena* ซึ่งเป็นรูปภาพแบบ Grayscale ที่มีความละเอียด 8 บิตต่อพิกเซล และมีขนาด 512 × 512 พิกเซล ดังปรากฏในรูปที่ 5.1 (ก.) ส่วนรูปที่ 5.1 (ข.) คือ Fourier spectrum ของรูปดังกล่าว

(ก.)



(ข.)

(ค.)



(ง.)

รูปที่ 5.1 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ *Lena* และ (ข.) Fourier spectrum ของรูปดังกล่าว (ค.) รูปภาพภายหลังจากที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลแล้ว (ง.) Fourier spectrum ของรูปที่ถูกซ่อนแล้ว

ในการทดลองนี้เราได้สร้างลายน้ำดิจิตอล W_1 ซึ่งมีขนาดเท่ากับรูปภาพถูกสร้างขึ้น โดยใช้สมการที่ (4.1) ซึ่งกำหนดให้จำนวนวงแหวน R = 256 ความถี่เชิงมุม ω = 32 แล้วซ่อนลงในรูปภาพดังกล่าวโดยใช้ค่าความเข้มของลายน้ำดิจิตอล α = 0.2 รูปที่ 5.1 (ค.) แสดงผลลัพธ์ของรูปภาพที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลแล้ว ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า ส่วน Fourier spectrum ของรูปดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.1 (ง.) โดยในรูป (ง.) นี้จะปรากฏให้เห็นถึงร่องรอยของแพตเทิร์นวงแหวนที่ซ่อนลงใน Spectrum ดังกล่าวลางๆ ซึ่งในกรณีนี้ ค่า PSNR ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 44.3799 dB และค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 47.7859 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า Threshold δ ที่กำหนดไว้เท่ากับ 6 แสดงว่าลายน้ำดิจิตอลสามารถถูกตรวจหาได้อย่างถูกต้อง

5.2 การเคลื่อนที่ (Translation)

ในการทดลองกับการเคลื่อนที่นี้ เราได้นำรูปภาพต้นฉบับ *Lena* มาเติมขอบ (Padded) ด้วยค่า 0 (สีดำ) ทั้งสี่ด้านของรูปภาพ ด้านละ 100 พิกเซล ทำให้ขนาดของรูปภาพอันใหม่เท่ากับ 712 × 712 พิกเซลดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก.)

(ก.) (ข.)

รูปที่ 5.2 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ *Lena* ที่ถูกเติมขอบ และ
(ข.) รูปภาพเดียวกันภายหลังจากที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลและทำการเคลื่อนที่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลายน้ำดิจิตอล W_2 ซึ่งมีขนาดเท่ากับรูปภาพดังกล่าวถูกสร้างขึ้น โดยกำหนดให้จำนวนวงแหวน R = 356 ความถี่เชิงมุม ω = 32 แล้วซ่อนลงในรูปภาพดังกล่าวโดยใช้ค่าความเข้มของลายน้ำดิจิตอล α = 0.2 เช่นเดิม จากนั้นแทนที่บริเวณขอบสีดำด้วยค่า 0 ใหม่อีกครั้ง เพื่อประโยชน์ในแง่การวัดผลที่แน่นอนของการเคลื่อนที่ ซึ่งการแทนที่ดังกล่าวนี้แน่นอนว่าย่อมทำให้เนื้อหาของลาย

น้ำดิจิตอลบางส่วนถูกทำลายไปด้วย จากนั้นจึงทำการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนที่เป็นรูปภาพไปครั้งละ 100 พิกเซล ไปยังด้านบน, ด้านล่าง, ด้านซ้าย, และด้านขวา ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.2 (ข.) แล้วคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองกับการเคลื่อนที่ของรูปภาพ

Translation	*Correlation*
100 pixels left & up	52.0730
100 pixels up	52.0730
100 pixels right & up	52.0730
100 pixels left	52.0730
No translation	52.0730
100 pixels right	52.0730
100 pixels left & down	52.0730
100 pixels down	52.0730
100 pixels right & down	52.0730

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง ไม่ว่ารูปภาพจะถูกเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใดก็ตาม เป็นการยืนยันว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้ไม่แปรผันต่อกระบวนการเคลื่อนที่ของรูปภาพแต่อย่างใด

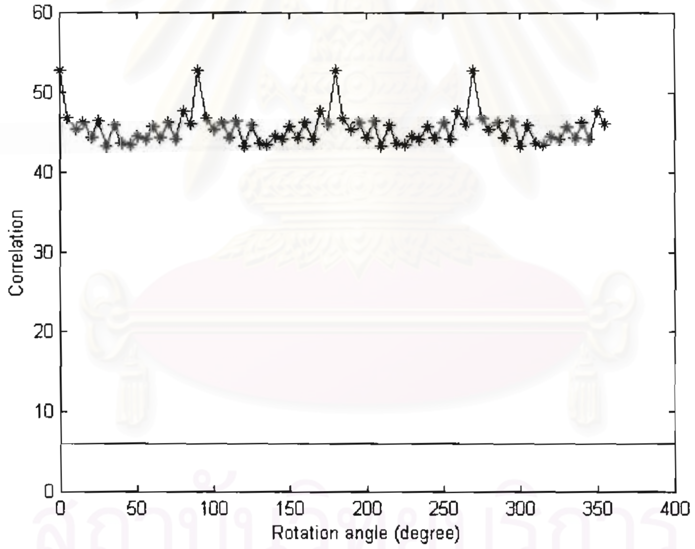
5.3 การหมุน (Rotation)

ในการทดลองถัดมา รูปภาพต้นฉบับ *Lena* ถูกนำมาเติมขอบด้วยค่า 0 (สีดำ) เช่นเดียวกับการทดลองที่ 5.2 แต่ขนาดของขอบที่เติมไปพิจารณาจากขนาดสูงสุดที่เป็นไปได้ภายหลังจากที่รูปภาพถูกหมุนไป ทั้งนี้เพื่อให้ขนาดของรูปภาพมีขนาดเดียวกันตลอดการทดลอง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.3 (ก.) และ (ข.) สำหรับในกรณีนี้คือที่มุม 45 องศา ซึ่งรูปภาพจะมีขนาดเท่ากับ 725×725 พิกเซล

ลายน้ำดิจิตอล W_3 ซึ่งมีขนาดเท่ากับรูปภาพดังกล่าวถูกสร้างขึ้น โดยกำหนดให้จำนวนวงแหวน $R = 362$ ความถี่เชิงมุม $\omega = 32$ แล้วซ่อนลงในรูปภาพดังกล่าวโดยใช้ค่าความเข้มของลายน้ำดิจิตอล $\alpha = 0.2$ จากนั้นทำการหมุนรูปภาพที่ได้ด้วยมุมต่างๆ ตั้งแต่ที่ 0 องศาไปจนถึง 360 องศา โดยขยับไปครั้งละ 5 องศา โดยใช้อัลกอริธึมในการประมาณค่าขาดหาย (Interpolation) แบบ Bicubic และตัดขอบของรูปภาพใหม่ที่ได้ทิ้งให้มีขนาดเท่ารูปภาพเดิม (Cropped) ซึ่งการตัดขอบทิ้งดังกล่าวนี้แน่นอนว่าย่อมทำให้เนื้อหาของลายน้ำดิจิตอลบางส่วนถูกทำลายไปด้วย จากนั้นทำการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ของรูปภาพที่ถูกหมุนไปแต่ละมุม ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 5.4

(ก.) (ข.)

รูปที่ 5.3 (ก.) รูปภาพต้นฉบับ *Lena* ที่ถูกเติมขอบ และ
(ข.) รูปภาพเดียวกันภายหลังจากที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลและทำการหมุน



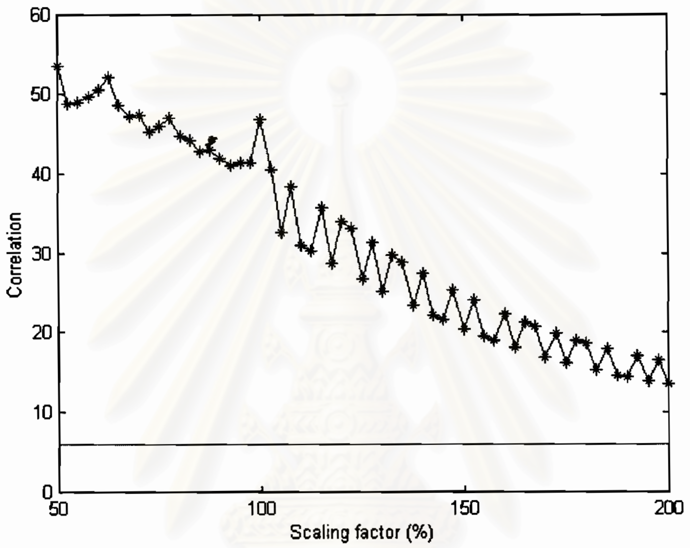
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองกับการหมุนของรูปภาพ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสูงเกินกว่าค่า Threshold $\delta = 6$ ตลอดการทดลอง ไม่ว่ารูปภาพจะถูกหมุนไปอย่างไรก็ตาม เป็นการยืนยันว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้ไม่แปรผันต่อกระบวนการหมุนของรูปภาพเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ดี ผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ปรากฏในกราฟไม่ได้มีลักษณะเป็นค่าคงที่หรือเส้นตรงตามที่พิสูจน์ไว้ในสมการที่ (4.7) ถึง (4.11) ในบทที่ 4 เนื่องจากการการประมาณค่าขาดหายที่เกิดขึ้นในทุกๆมุมที่รูปภาพถูกหมุนไป ซึ่งเป็นผลโดยตรงทำให้คุณภาพของรูปภาพลดลงตามไป ดังนั้นผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จึงมีค่าบิดเบือนไปจากค่าที่ได้ในทางทฤษฎีนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 การปรับขนาด (Scaling)

ในการทดลองนี้ เราซ่อนลายน้ำดิจิตอล W_1 ลงในรูปภาพต้นฉบับ *Lena* ปกติ (ไม่มีการเติมขอบ) แล้วทำการปรับขนาดของรูปภาพที่ได้ด้วยขนาดต่างๆ ตั้งแต่ 50% ไปจนถึง 200% โดยขยับค่าไปครั้งละ 2.5% โดยใช้อัลกอริธึมในการประมาณค่าขาดหาย (Interpolation) แบบ Bicubic จากนั้นทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ภายในรูปภาพ ดังแสดงผลในรูปที่ 5.5



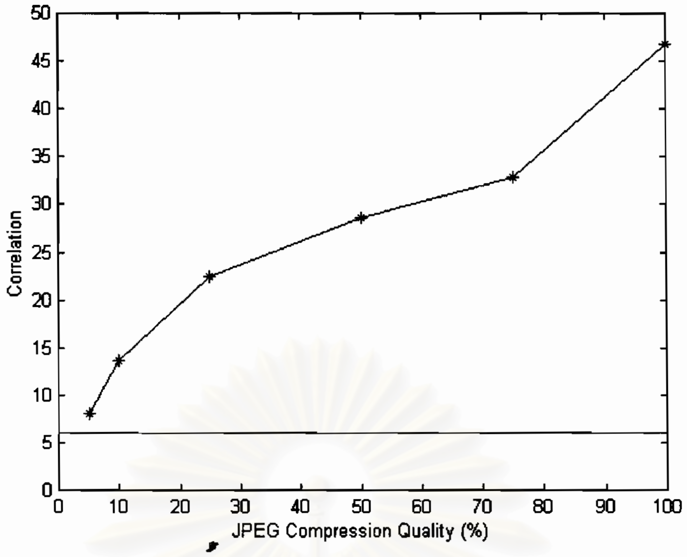
รูปที่ 5.5 ผลการทดลองกับการปรับขนาดของรูปภาพ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิตอลสามารถถูกตรวจพบตลอดการทดลอง อย่างไรก็ดี กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นฟันปลาหยักขึ้นๆลงๆ เนื่องจากความไม่ทับกันสนิทพอดีระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับรูปภาพที่ถูกปรับขนาดไป

หัวข้อที่ 6.3 ในบทที่ 6 แสดงการวิเคราะห์เพิ่มเติมในกรณีของการปรับขนาดของรูปภาพ

5.5 การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG (JPEG compression)

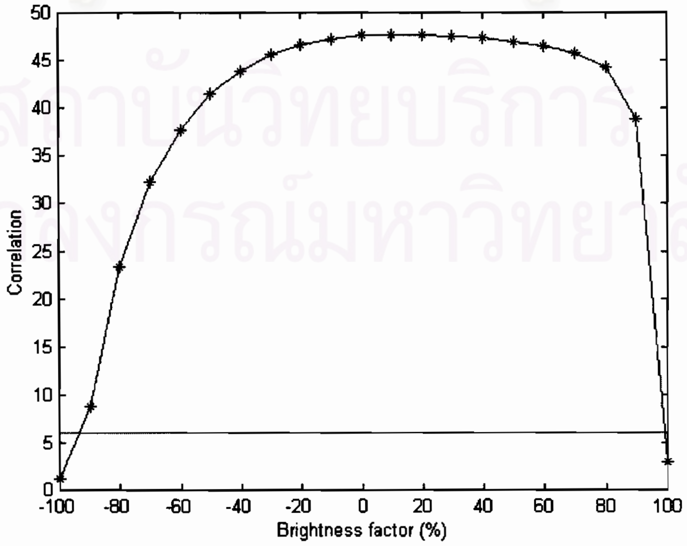
ในการทดลองนี้ รูปภาพต้นฉบับ *Lena* ถูกซ่อนด้วยลายน้ำดิจิตอล W_1 หลังจากนั้นได้ทำการบีบอัดรูปภาพด้วยอัลกอริธึมของ JPEG ที่ระดับคุณภาพที่ 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, และ 100% ตามลำดับ แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ รูปที่ 5.6 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับคุณภาพ ซึ่งพบว่าลายน้ำดิจิตอลสามารถถูกตรวจพบได้อย่างถูกต้องในทุกระดับคุณภาพ



รูปที่ 5.6 ผลการทดลองกับการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG

5.6 การปรับความสว่าง (Brightness adjustment)

ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับความสว่างของรูปภาพ ตั้งแต่ –100% ไปจนถึง 100% โดยปรับความสว่างไปครั้งละ 10% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ รูปที่ 5.7 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับความสว่าง พบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิตอลได้อย่างถูกต้อง มีเพียงเฉพาะระดับความสว่างที่ –100% (มืดสนิท) และ 100% (สว่างสนิท) เท่านั้นที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำกว่าค่า Threshold ที่กำหนดไว้

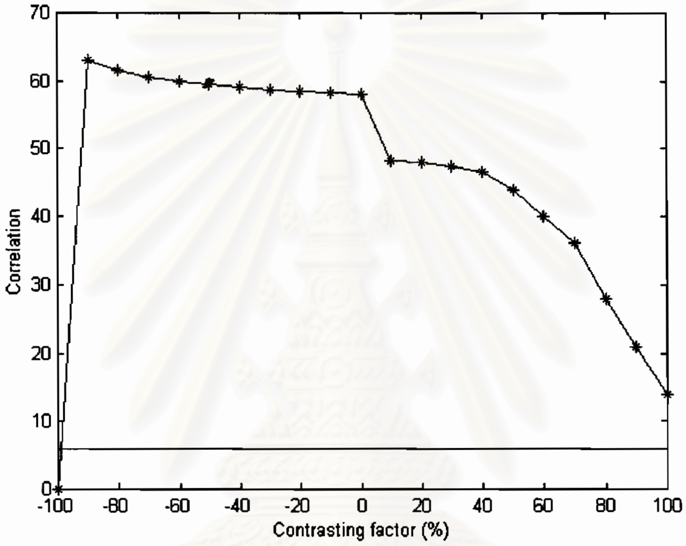


รูปที่ 5.7 ผลการทดลองกับการปรับความสว่างของรูปภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.7 การปรับการตัดกันของสี (Contrast adjustment)

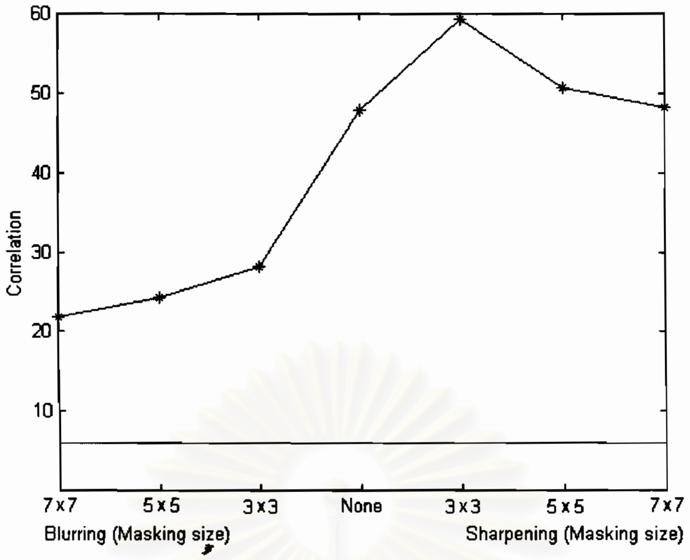
ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพตั้งแต่ –100% ไปจนถึง 100% โดยปรับระดับไปครั้งละ 10% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ รูปที่ 5.8 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละระดับการตัดกันของสี พบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิตอลได้อย่างถูกต้อง มีเพียงเฉพาะที่ระดับ –100% เท่านั้น (ไม่มีการตัดกันของสีเลย) ที่ให้ค่าสหสัมพันธ์ต่ำกว่าค่า Threshold ที่กำหนดไว้



รูปที่ 5.8 ผลการทดลองกับการปรับการตัดกันของสีภายในรูปภาพ

5.8 การปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ (Filtering)

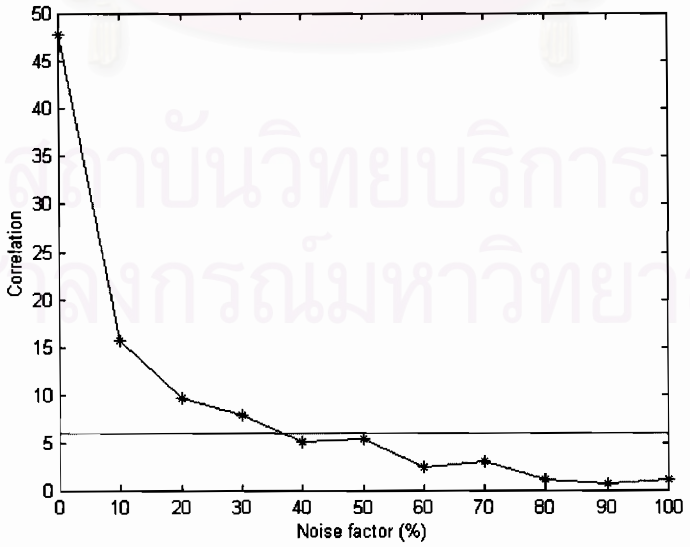
การทดลองนี้เป็นการทดสอบความทนทานของลายน้ำดิจิตอลต่อกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ โดยได้ทำการทดลองใน 2 ลักษณะ คือการปรับรูปภาพให้มัวลง (Blurring) และการปรับรูปภาพให้คมชัดขึ้น (Sharpening) โดยใช้ฟิลเตอร์ที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.2.3 ในบทที่ 2 ซึ่งกำหนดให้ฟิลเตอร์มีขนาดต่างๆ ได้แก่ 3×3, 5×5, และ 7×7 ตามลำดับ รูปที่ 5.9 แสดงผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจสอบหาลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ในรูปภาพดังกล่าว



รูปที่ 5.9 ผลการทดลองกับการปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์

5.9 การเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพ (Noise adding)

ในการทดลองนี้ได้ทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพแบบ Salt and pepper [34], [35] ไปครั้งละ 10% ตั้งแต่ 10% จนถึง 100% แล้วทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ภายในรูปภาพ รูปที่ 5.10 แสดงผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองดังกล่าว



รูปที่ 5.10 ผลการทดลองกับการเพิ่มสัญญาณรบกวนภายในรูปภาพ

5.10 การพิมพ์และการสแกนรูปภาพ (Printing and scanning)

ในการทดลองนี้ เราได้ทำการพิมพ์รูปภาพ *Lena* ที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลแล้วออกทางเครื่องพิมพ์ซึ่งมีความละเอียด 1200 × 1200 จุดต่อนิ้ว[1] จากนั้นทำการสแกนรูปภาพกลับเข้ามาใหม่ผ่านเครื่องสแกนเนอร์ที่มีความละเอียด 1200 × 1200 จุดต่อนิ้ว[2] ผลลัพธ์ของรูปภาพแสดงไว้ในรูปที่ 5.11 ในกรณีนี้ค่า PSNR มีค่าเท่ากับ 27.6441 dB จากนั้นทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ในรูปภาพ พบว่ายังคงสามารถตรวจหาลายน้ำดิจิตอลเจอ โดยค่าสหสัมพันธ์ที่ได้เท่ากับ 32.9223

รูปที่ 5.11 รูปภาพ *Lena* ที่ถูกพิมพ์และสแกนกลับเข้ามา

5.11 การตัดรูปภาพ (Cropping)

ในการทดลองนี้ เราได้ทำการตัดเนื้อหาของรูปภาพบางส่วนทิ้งในลักษณะต่างๆกัน คือ

- ตัด 128 พิกเซลตามแนวตั้งทางด้านขวาของรูปภาพทิ้ง (เหลือเนื้อหาเดิมของรูปภาพประมาณ 75%)
- ตัด 128 พิกเซลตามแนวนอนด้านบน และ 128 พิกเซลตามแนวตั้งด้านซ้ายของรูปภาพทิ้ง (เหลือเนื้อหาเดิมของรูปภาพประมาณ 56.25%)
- ตัดกรอบด้านนอกทั้ง 4 ด้านของรูปภาพ 128 พิกเซลทิ้ง (เหลือเนื้อหาเดิมของรูปภาพประมาณ 25%)

รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างของรูปภาพที่ถูกตัดในลักษณะดังกล่าว

---

[1] เครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องพิมพ์แบบเลเซอร์ยี่ห้อ HP รุ่น LaserJet 4000 PCL (มีอายุการใช้งานมาประมาณ 3 ปี)

[2] เครื่องสแกนเนอร์ที่ใช้ในการทดลองยี่ห้อ Lexmark รุ่น X1150 (มีอายุการใช้งานมาประมาณ 1 ปี)

(ก.) (ข.) (ค.)

รูปที่ 5.12 รูปภาพที่ถูกตัดเนื้อหาบางส่วนออกในลักษณะต่างๆกัน
(ก.) 128 พิกเซลด้านขวา (ข.) 128 พิกเซลด้านบนและซ้าย (ค.) กรอบด้านนอก 128 พิกเซล

จากนั้นทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ในรูปภาพทั้ง 3 ภาพได้ค่าสหสัมพันธ์เป็นดังนี้

- รูปที่ 5.12 (ก.) ค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 39.4144
- รูปที่ 5.12 (ข.) ค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 30.2204
- รูปที่ 5.12 (ค.) ค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 25.8304

จะเห็นได้ว่าค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ของรูปภาพทั้งสามยังคงมีค่าสูงเกินกว่าค่า Threshold ที่กำหนดอยู่มาก โดยในกรณีของรูปที่ 5.12 (ค.) มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ถึง 54.0544% ของค่าสหสัมพันธ์เดิม แม้ว่าเนื้อหาของรูปภาพดังกล่าวจะเหลืออยู่เพียง 1 ใน 4 ของรูปภาพเดิมก็ตาม

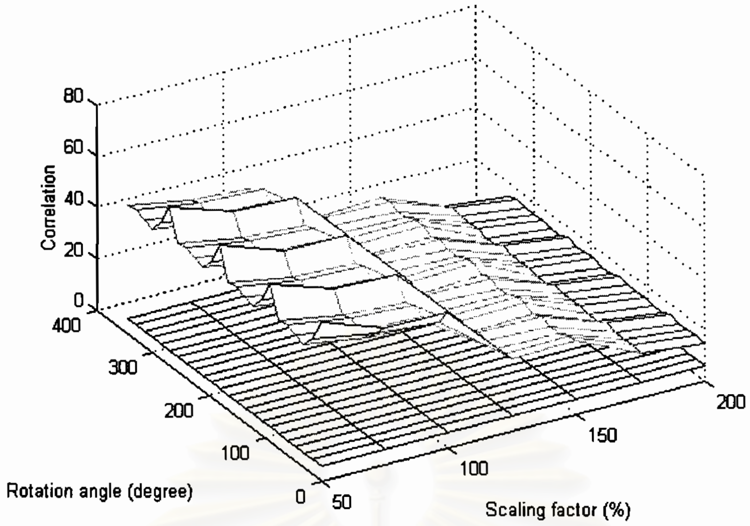
หัวข้อที่ 6.4 ในบทที่ 6 แสดงแนวคิดเพิ่มเติมในการปรับปรุงค่าสหสัมพันธ์ให้ดีขึ้นในกรณีของการตัดรูปภาพ

5.12 การเปลี่ยนแปลงแก้ไขรูปภาพที่มากกว่า 1 กระบวนการ

5.12.1 การหมุนและการปรับขนาด

ในหัวข้อนี้ เราได้ทำการทดลองกับการหมุนและการปรับขนาดของรูปภาพไปพร้อมๆกัน โดยรูปภาพต้นฉบับ *Lena* ถูกนำมาเติมขอบด้วยค่า 0 (สีดำ) ในลักษณะเดียวกับการทดลองที่ 5.3 จากนั้นก็ทำการหมุนรูปภาพทีครั้งละ 15 องศา ตั้งแต่มุมที่ 0 ไปจนถึง 360 องศา โดยทุกๆครั้งของการหมุนก็ทำการปรับขนาดรูปภาพไปทีละ 25% ตั้งแต่ 50% ไปจนถึง 200% ซึ่งใช้การประมาณค่าขาดหายแบบ Bicubic interpolation แล้วคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละตำแหน่งของการหมุนและการปรับขนาด ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.13

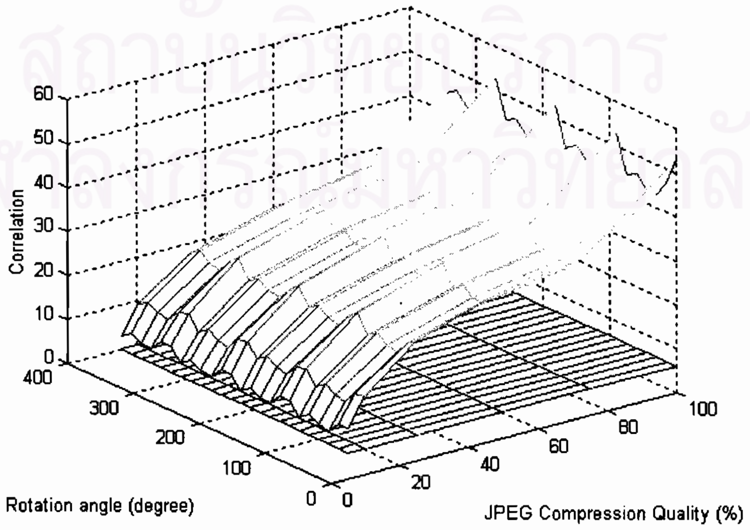
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.13 ผลการทดลองกับการหมุนและการปรับขนาดไปพร้อมๆกัน

5.12.2 การหมุนและการบีบอัดรูปภาพ

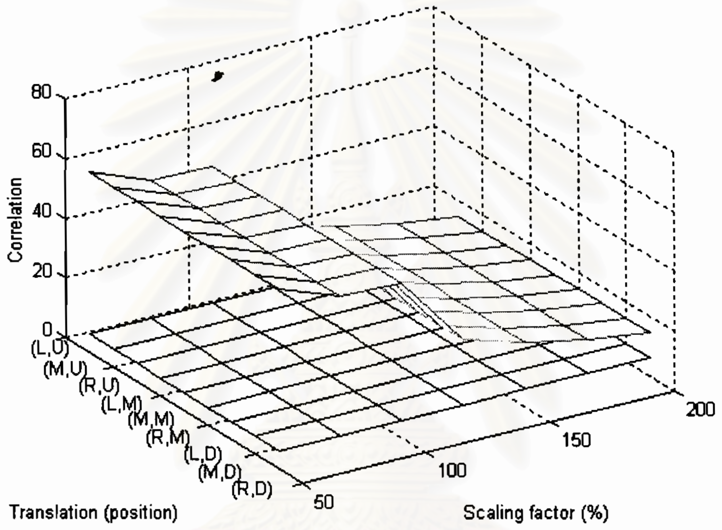
ในการทดลองนี้ รูปภาพได้ถูกทำการหมุนและบีบอัดขนาดแบบ JPEG ไปพร้อมๆกัน โดยรูปภาพต้นฉบับ *Lena* ถูกนำมาเติมขอบด้วยค่า 0 ในลักษณะเดียวกับการทดลองที่ 5.3 จากนั้นได้ทำการหมุนรูปภาพทีครั้งละ 15 องศา ตั้งแต่มุมที่ 0 ไปจนถึง 360 องศา โดยใช้การประมาณค่าขาดหายแบบ Bicubic interpolation ซึ่งทุกๆครั้งของการหมุนก็ทำการบีบอัดรูปภาพด้วยระดับคุณภาพต่างๆกันที่ 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, และ 100% ตามลำดับ แล้วคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละตำแหน่งของการหมุนและการบีบอัดขนาด ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ผลการทดลองกับการหมุนและการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG ไปพร้อมๆกัน

5.12.3 การเคลื่อนที่และการปรับขนาด

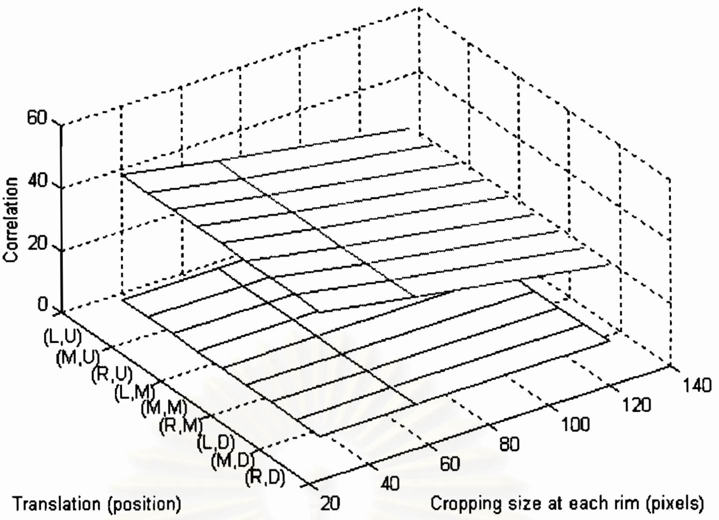
การทดลองถัดมาคือการทดลองกับการเคลื่อนที่และการปรับขนาดของรูปภาพไปพร้อมๆ กัน โดยรูปภาพต้นฉบับ *Lena* ถูกนำมาเติมขอบด้วยค่า 0 ทั้งสี่ด้านของรูปภาพในลักษณะเดียวกับในการทดลองที่ 5.2 จากนั้นจึงทำการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนที่เป็นรูปภาพไปครั้งละ 100 พิกเซล ไปยังด้านบน, ด้านล่าง, ด้านซ้าย, และด้านขวา โดยทุกๆครั้งของการเคลื่อนที่ก็ทำการปรับขนาดรูปภาพไปทีละ 25% ตั้งแต่ 50% ไปจนถึง 200% โดยใช้การประมาณค่าขาดหายแบบ Bicubic interpolation แล้วคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละตำแหน่งดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ผลการทดลองกับการเคลื่อนที่และการปรับขนาดไปพร้อมๆกัน

5.12.4 การเคลื่อนที่และการตัดรูปภาพ

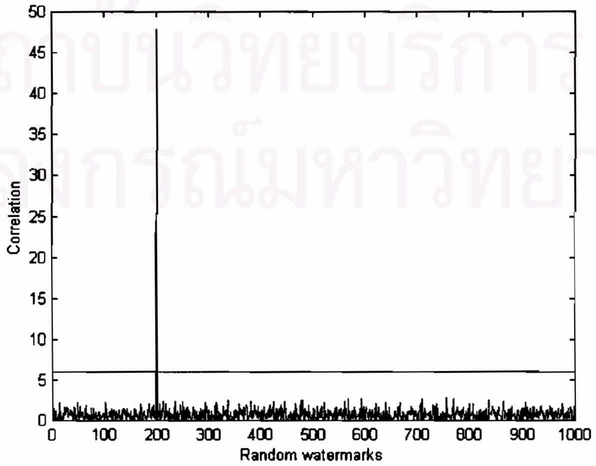
ในการทดลองนี้ เราได้ทำการเคลื่อนที่และตัดรูปภาพไปพร้อมๆกัน โดยรูปภาพต้นฉบับ *Lena* ถูกนำมาเติมขอบด้วยค่า 0 ทั้งสี่ด้านของรูปภาพในลักษณะเดียวกับในการทดลองที่ 5.2 จากนั้นจึงทำการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนที่เป็นรูปภาพไปครั้งละ 100 พิกเซล ไปยังด้านบน, ด้านล่าง, ด้านซ้าย, และด้านขวา โดยทุกๆครั้งของการเคลื่อนที่ก็ทำการตัดเอาขอบนอกของรูปภาพออกไปด้วยจำนวน 32, 64, และ 128 พิกเซล ตามลำดับ แล้วคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในแต่ละตำแหน่งดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ผลการทดลองกับการเคลื่อนที่และการตัดรูปภาพไปพร้อมๆกัน

5.13 การตรวจหาด้วยลายน้ำดิจิตอลที่ไม่มีความสัมพันธ์กับรูปภาพ (Watermark counterfeiting)

การทดลองนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติเฉพาะของลายน้ำดิจิตอลแต่ละตัว (Uniqueness) โดยเราได้นำรูปภาพ *Lena* ที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลแล้วมาตรวจหากับลายน้ำดิจิตอลที่ไม่มีความสัมพันธ์กับในรูปภาพ (ไม่ใช่ตัวที่ถูกซ่อนอยู่ในรูปภาพ) 999 ตัว เปรียบเทียบกับลายน้ำดิจิตอลตัวจริง พบว่าค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากลายน้ำดิจิตอลทั้ง 999 ตัวดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ 0 กล่าวคือไม่มีความสัมพันธ์กับในรูปภาพเลย มีเพียงเฉพาะลายน้ำดิจิตอลตัวจริงเท่านั้นที่ให้ค่าสหสัมพันธ์ที่มากกว่าค่า Threshold ที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (4.17) และ (4.18) ในหัวข้อที่ 4.5



รูปที่ 5.17 ผลการทดลองกับลายน้ำดิจิตอลตัวจริงที่อยู่ในรูปภาพ
เปรียบเทียบกับลายน้ำดิจิตอล (ปลอม) ที่ไม่สัมพันธ์กันอีก 999 ตัว

5.14 การซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว (Collision attacking)

การทดลองถัดมา รูปภาพ *Lena* ที่ถูกซ่อนลายน้ำดิจิตอลครั้งแรกได้ถูกนำมาซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้ำอีก 4 ครั้งด้วยลายน้ำดิจิตอลที่แตกต่างกัน (ใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวกันทั้งหมด) จากนั้นทำการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลทั้ง 5 ตัวในรูปภาพเวอร์ชันสุดท้าย พบว่าลายน้ำดิจิตอลทั้ง 5 ตัวสามารถตรวจพบจากรูปภาพดังกล่าวได้ทั้งหมด กล่าวคือทุกตัวให้ค่าสหสัมพันธ์ที่มากกว่าค่า Threshold ที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองกับการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว

Random Watermark	*Correlation*
First	45.5228
Second	44.6738
Third	43.8915
Fourth	45.6696
Fifth	44.3965

ถึงแม้ว่าลายน้ำดิจิตอลปลอมทั้ง 4 ตัวจะสามารถตรวจพบได้ในรูปภาพเวอร์ชันสุดท้ายได้ทั้งหมดก็ตาม แต่ในความเป็นจริงแล้ว “รูปภาพต้นฉบับ” ในแต่ละเวอร์ชันจะมีลายน้ำดิจิตอลของตัวก่อนหน้าอยู่เสมอ และจะมี “รูปภาพต้นฉบับ” เพียงเวอร์ชันเดียวที่ไม่มีลายน้ำดิจิตอลใดๆเลยอยู่ (คือรูปภาพต้นฉบับในเวอร์ชันแรก) ดังนั้นในกรณีนี้การพิสูจน์สามารถทำได้โดยการแสดงรูปภาพต้นฉบับตัวจริงเพื่อตัดสินความเป็นเจ้าของที่แท้จริง

5.15 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริธึม

ในหัวข้อนี้เราได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริธึมระหว่างเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว (Log-Polar mapping) กับเทคนิคที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ โดยทำการทดลองบนเครื่อง Intel Pentium ™ (32-bit ISA) ซึ่งใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 5.3 ในการคำนวณ โดยในการทดลองนี้เทคนิคที่กระทำในลอการิธึมเชิงขั้วใช้การประมาณค่าขาดหายแบบ Bicubic interpolation ที่ความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 512×512 และใช้จำนวน Element ของลายน้ำดิจิตอลเท่ากับ 262,144 จุด เพื่อให้เท่ากันกับเทคนิคที่นำเสนอ

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบจำนวนครั้งในการคูณกันด้วยเลขจำนวนจริง (Floating Point Operations: FLOPs) ระหว่างเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วกับเทคนิคที่นำเสนอของกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล และตารางที่ 5.4 ในกรณีของการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบจำนวน FLOPs ที่ใช้ในกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล

Step	*The original LPM-based scheme*	*The proposed scheme*
FFT	20,089,856	20,089,856
IFFT (1)	21,662,722	-
ILPM	60,278,401	-
IFFT (2)	21,662,722	21,662,722
Add watermark	786,432	5,767,176
Total	*124,480,133*	*47,519,754*

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบจำนวน FLOPs ที่ใช้ในกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล

Step	*The original LPM-based scheme*	*The proposed scheme*
FFT (1)	20,089,856	20,089,856
Intensity Display	-	1,572,868
LPM	58,760,305	-
FFT (2)	20,089,856	-
Correlation	4,194,320	2,622,987
Total	*103,134,337*	*24,285,711*

จากตารางที่ 5.3 และ 5.4 จะเห็นได้ว่าทั้งในกระบวนการซ่อนและการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล เทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วใช้การคำนวณที่มากกว่าเทคนิคที่ใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อนทั้งสองกรณี โดยในกรณีของการซ่อนนั้น เทคนิคที่นำเสนอนี้ใช้การคำนวณเพียง 38.1745% ของเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วเท่านั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วใช้การคำนวณที่มากกว่าถึง 2.6195 เท่า ส่วนในกรณีของการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลนั้น เทคนิคที่นำเสนอใช้การคำนวณเพียง 23.5476% ของเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วใช้การคำนวณที่มากกว่าถึง 4.2467 เท่า

ทั้งนี้หากพิจารณาจำนวนครั้งในการคำนวณจากตารางทั้งสองจะพบว่า ในขั้นตอนของการคำนวณ ILPM และ LPM เป็นขั้นตอนที่ใช้การคำนวณมากที่สุด คือในกรณีของการซ่อน เฉพาะขั้นตอน ILPM ใช้การคำนวณไปถึง 48.4241% ของการคำนวณทั้งหมด ในขณะที่ในกรณีของการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลนั้น ขั้นตอน LPM ใช้การคำนวณถึง 56.9745% ของการคำนวณทั้งหมด ดังนั้นเทคนิคที่นำเสนอนี้จึงมีข้อดีกว่าเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วในแง่ของการคำนวณ เนื่องจากสามารถละทิ้งส่วนที่ฟุ่มเฟือยของการคำนวณนี้ได้นั่นเอง

5.16 การทดสอบกับรูปภาพอื่นๆ

ในการทดลองสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้ เราได้ทำการทดลองซ่อนและตรวจหาลายน้ำดิจิตอลเพิ่มเติมกับรูปภาพต่างๆจำนวน 16 ภาพ (รูปภาพทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ก.) โดยกำหนดให้ลายน้ำดิจิตอลสำหรับแต่ละรูปภาพมีขนาดเท่ากับขนาดของรูปภาพนั้นๆ โดยมีความถี่เชิงมุม $\omega = 32$ และค่าความเข้มของลายน้ำดิจิตอล $\alpha = 0.2$

ตารางที่ 5.5 แสดงระดับคุณภาพต่อการมองเห็นของรูปภาพทั้ง 16 รูปดังกล่าวภายหลังจากที่ทำการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงไปแล้ว พร้อมทั้งค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลในรูปภาพเหล่านั้น

ตารางที่ 5.5 การทดลองเพิ่มเติมกับรูปภาพต่างๆ

Picture	*Dimension*	*PSNR*	*Correlation*
Aerial	256 × 256	46.4016	51.4790
Autumn	206 × 345	47.4849	43.4358
Baboon	339 × 339	43.7693	51.2546
Barbara	512 × 512	45.7361	46.0615
Bavarian couple	480 × 314	43.9615	51.9627
Boat	256 × 256	41.6260	49.9123
Cameraman	256 × 256	45.1488	54.5114
F16	512 × 512	44.5167	45.3786
Flowers	362 × 500	43.5413	44.1221
Goldhill	512 × 512	45.3458	38.7225
Kids	400 × 318	46.4441	54.8743
Lena	512 × 512	44.3799	47.7859
Peppers	512 × 512	43.3151	42.7451
Racing bike	250 × 385	43.5667	52.3237
San Francisco	256 × 256	43.0578	51.3614
Trees	258 × 350	40.7699	39.7106

จากตารางที่ 5.5 ระดับคุณภาพต่อการมองเห็นโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 44.3166 และค่าสหสัมพันธ์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 47.8526

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่มีความทนทานต่อกระบวนการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ สำหรับรูปภาพดิจิตอลโดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน (Complex exponential function) วิธีการดังกล่าวเป็นการประยุกต์เอาเทคนิคการมอดูเลชันในกระบวนการสื่อสารแบบ Spread spectrum technique ซึ่งมีความคงทนสูงมาใช้ โดยกระทำในโดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยการกำหนดให้แพตเทิร์นของลายน้ำดิจิตอลมีลักษณะเป็นวงแหวนซ้อนกันหลายๆวงซึ่งสร้างขึ้นจากฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน และจากการพิสูจน์ในเชิงคณิตศาสตร์ในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิตอลดังกล่าวสามารถตรวจหาได้โดยไม่ขึ้นกับกระบวนการหมุน กระบวนการปรับขนาด หรือกระบวนการเคลื่อนที่ใดๆของรูปภาพ อีกทั้งยังใช้การคำนวณที่น้อยกว่าเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลที่มีความทนทานต่อกระบวนการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ สำหรับรูปภาพดิจิตอลที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้ว (Log-Polar mapping) แบบอื่นๆ ซึ่งนอกจากจะใช้การคำนวณที่ซับซ้อนกว่ามากแล้ว คุณภาพของรูปภาพที่ได้ยังมีคุณภาพไม่ดีนัก [9] นอกจากนี้แล้ว เทคนิคที่นำเสนอนี้ยังไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิตอล อันจะเป็นการประหยัดเนื้อที่ในการจัดเก็บ รวมไปถึงเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการค้นหารูปภาพต้นฉบับอีกด้วย

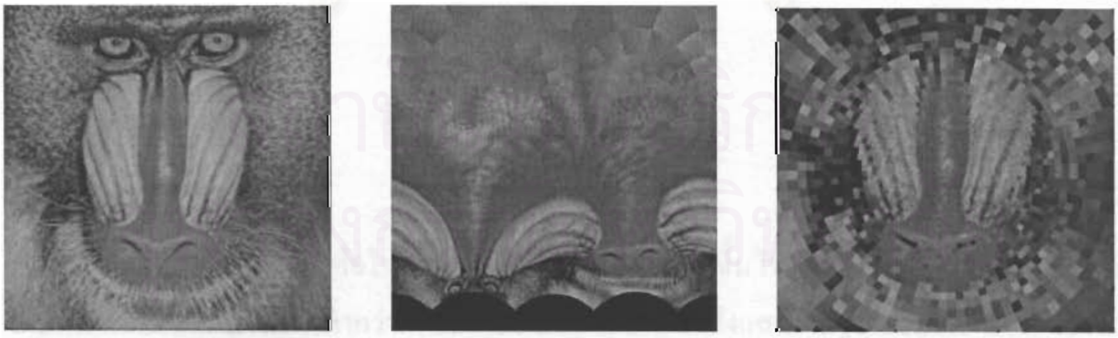
จากผลการทดลองในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิตอลมีความคงทนต่อกระบวนการแปลงทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ทั้งในเชิงเรขาคณิตและไม่เรขาคณิต อันได้แก่ กระบวนการเคลื่อนที่, การหมุน, การปรับขนาด, การบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG, การปรับความสว่าง, การปรับการตัดกันของสี, การปรับคุณภาพของรูปภาพโดยใช้ฟิลเตอร์, การเพิ่มสัญญาณรบกวน, การพิมพ์และการสแกน, การตัดรูปภาพ, ตลอดจนกระบวนการแปลงรูปภาพที่มากกว่าหนึ่งกระบวนการ นอกจากนี้ในบทดังกล่าวยังได้มีการทดลองอื่นๆนอกเหนือไปจากกระบวนการปรับปรุงรูปภาพทั่วๆไปอีก อันได้แก่กระบวนการปลอมแปลงลายน้ำดิจิตอลแบบต่างๆ เช่นการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่ไม่สัมพันธ์กับรูปภาพ, การซ่อนลายน้ำดิจิตอลซ้อนลงในรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก่อนแล้ว รวมไปถึงการทดสอบซ่อนและตรวจหาลายน้ำดิจิตอลกับรูปภาพอื่นๆที่มีลักษณะต่างๆกันอีกจำนวนหนึ่งอีกด้วย โดยในทุกการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาพบว่าสามารถตรวจพบลายน้ำดิจิตอลที่ถูกซ่อนอยู่

ได้อย่างถูกต้อง (ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าเกิน 6 ทั้งสิ้น) โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการผันกลับกระบวนการแปลงใดๆ หรือใช้รูปภาพต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิตอลแต่อย่างใด

นอกจากนี้แล้ว เรายังได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริธึมของเทคนิคที่นำเสนอเปรียบเทียบกับเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วแบบอื่นๆอีกด้วย ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้ใช้การคำนวณที่น้อยกว่าเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วแบบอื่นๆประมาณ 1 ใน 4

6.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.2.5 ในบทที่ 3 ถึงข้อจำกัดที่สำคัญของเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วคือเรื่องของคุณภาพของรูปภาพที่ได้ภายหลังจากที่ทำการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงไปแล้ว และความซับซ้อนในการคำนวณ ซึ่งข้อจำกัดทั้งสองข้อนี้มักสวนทางกัน กล่าวคือเพื่อต้องการให้รูปภาพที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น เราจำเป็นจะต้องเพิ่มระดับของความถี่ในการประมาณค่าขาดหาย (Interpolation) ให้มากขึ้น ซึ่งก็เป็นผลทำให้การคำนวณที่ได้มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกัน หากต้องการให้การคำนวณมีความซับซ้อนน้อยลง เราจำเป็นจะต้องลดระดับของความถี่ในการประมาณค่าขาดหายให้น้อยลง อันจะเป็นผลทำให้คุณภาพของรูปภาพที่ได้ลดน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งในทางทฤษฎีนั้น ตามที่ [9] กล่าวไว้คือ เพื่อให้ระดับคุณภาพของรูปภาพที่ได้เป็นที่ยอมรับได้ ความถี่ในการประมาณค่าขาดหายดังกล่าวจะต้องไม่ต่ำกว่า 256 × 256 พิกเซล รูปที่ 6.1 แสดงผลลัพธ์ของรูปภาพในกรณีที่ใช้ระดับของความถี่ในการประมาณค่าขาดหายน้อยเกินไป



(ก.) (ข.) (ค.)

รูปที่ 6.1 ตัวอย่างการใช้ความถี่ในการประมาณค่าขาดหายที่ระดับ 100 × 100

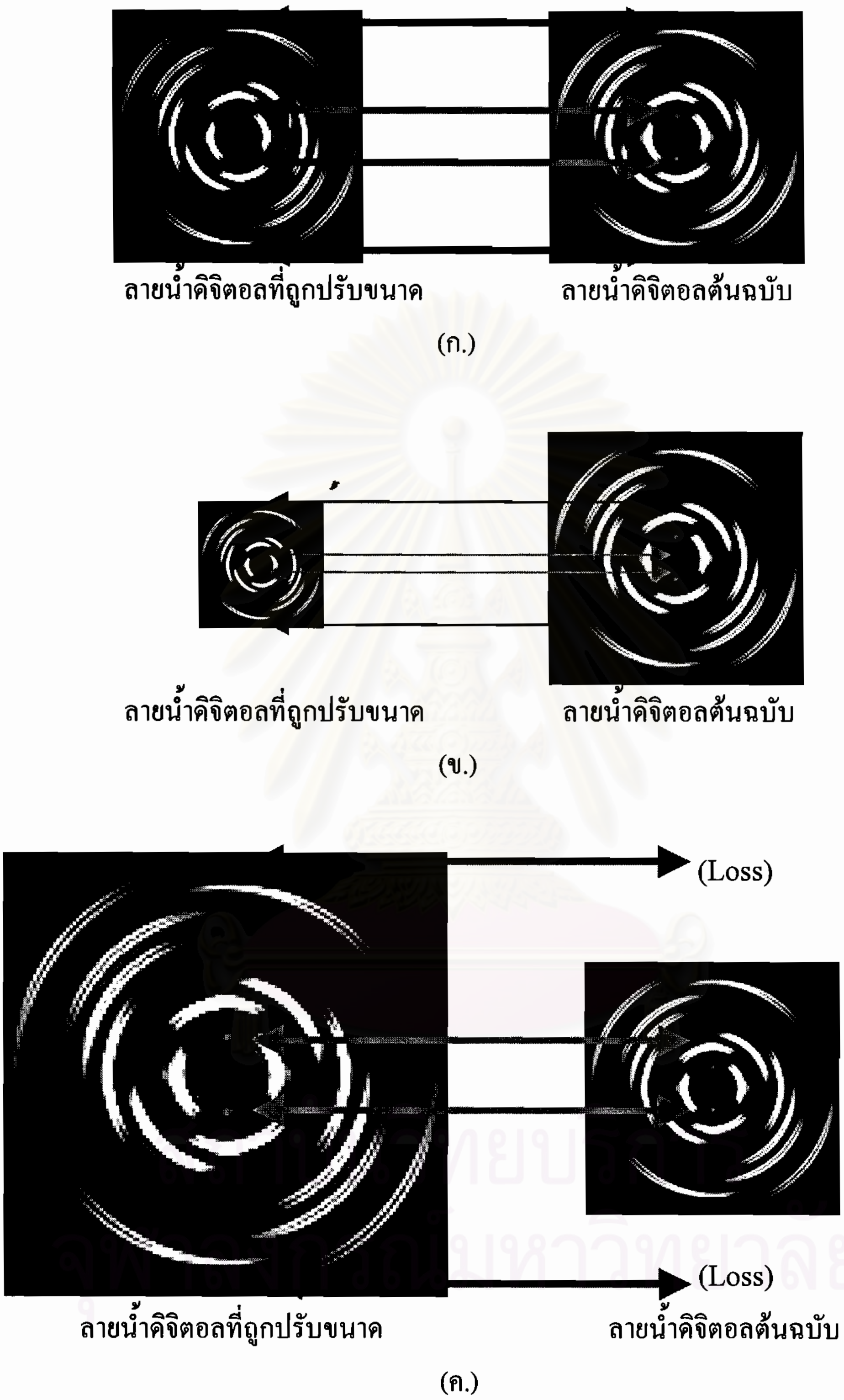
(ก.) รูปภาพต้นฉบับ (ข.) ภายหลังจากทำการ LPM และ (ค.) ภายหลังจากทำการ ILPM

จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.15 ในบทที่ 5 เราใช้ความถี่ในการประมาณค่าขาดหายที่ระดับ 512 × 512 พิกเซล ซึ่งที่ระดับดังกล่าวผลลัพธ์ของรูปภาพที่ได้ออกมามีคุณภาพดีและไม่เป็นที่สังเกตเห็นได้ โดยในกรณีนี้ เทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วต้องใช้การคำนวณที่มากกว่าถึง 2.6195 เท่าของเทคนิคที่อาศัยฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อนสำหรับกระบวนการซ่อนลายน้ำดิจิตอล และใช้การคำนวณที่มากกว่าถึง 4.2467 เท่าในกรณีของการตรวจหา ดังนั้นจึงนับได้ว่าปัญหาในเรื่องของความซับซ้อนในการคำนวณเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้จริงของเทคนิคดังกล่าว

อย่างไรก็ดี เทคนิคดังกล่าวใช้แต่ละ Element ของลายน้ำดิจิตอลแทน Spreading code เลย ดังนั้นจำนวน Spreading code ในเทคนิคดังกล่าวจึงมีมากกว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้ เนื่องจากจำนวน Spreading code ของเทคนิคที่นำเสนอนี้แปรผันโดยตรงตามจำนวนวงแหวนที่มีในแพตเทิร์นของลายน้ำดิจิตอล เช่นจากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นที่ลายน้ำดิจิตอลของทั้งสองเทคนิคมีขนาด 512 × 512 หรือเท่ากับ 262,144 พิกเซล ในกรณีของเทคนิคที่กระทำในพิกัดลอการิธึมเชิงขั้วนั้นจะมีจำนวนของ Spreading code เท่ากับ 262,144 ตัว ในขณะที่เทคนิคที่นำเสนอนี้จะมีเพียง 256 ตัว ตามจำนวนวงแหวนที่มี ซึ่งการที่เทคนิคดังกล่าวนั้นมีจำนวน Spreading code ที่มากกว่าจึงเป็นข้อดี เนื่องจากมีโอกาสที่ลายน้ำดิจิตอลชุดอื่นที่มีขนาดเท่ากันจะมี Spreading code แต่ละตัวเหมือนกันหมดเป็นไปได้น้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าเท่ากับ 0 ในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ดี แม้ว่าจำนวน Spreading code ในลายน้ำดิจิตอลของเทคนิคที่นำเสนอนี้จะมีน้อยกว่าก็ตาม แต่จากจำนวนที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวคือ 256 ตัวนี้ถือว่ามากพอที่จะไม่มีลายน้ำดิจิตอลชุดใดที่จะมีค่าเหมือนกันหมดโดยบังเอิญ ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ (4.17) และ (4.18) ในบทที่ 4 และในการทดลองที่ 5.13 ซึ่งลายน้ำดิจิตอลที่ขนาดดังกล่าวจำนวน 1,000 ตัว มีเพียงหนึ่งตัวซึ่งคือตัวที่ถูกซ่อนอยู่ในรูปภาพเท่านั้นที่ให้ค่าสหสัมพันธ์ที่มากกว่าค่า Threshold ที่กำหนดไว้

6.3 ปัญหาที่พบ

ปัญหาที่สำคัญที่พบคือในกรณีที่รูปภาพถูกเพิ่มขนาดขึ้นไปมากจะทำให้ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าลดลงมากตามจนอาจต่ำกว่าค่า Threshold ที่กำหนดไว้ (ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ของบทที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลซ่อนอยู่ถูกปรับขนาดให้ใหญ่ขึ้น จะทำให้ลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ภายในมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ซึ่งจะเป็นผลทำให้วงแหวนวงนอกๆของลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ภายในรูปภาพอยู่นอกเหนือขอบเขตไปจากลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับในการตรวจหา ซึ่งวงแหวนวงนอกๆดังกล่าวจะมีตำแหน่งตรงกับค่า 0 เมื่อนำมาเทียบในขอบเขตของลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ ทำให้ค่าสหสัมพันธ์ที่ควรจะได้จากบริเวณเหล่านี้ต้องสูญเสียไป ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างของลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพเปรียบเทียบกับลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ (ก.) กรณีที่ไม่มีการปรับขนาดของรูปภาพ (ข.) กรณีที่รูปภาพถูกลดขนาดลง และ (ค.) กรณีที่รูปภาพถูกเพิ่มขนาดขึ้น

ดังนั้นความสามารถที่เราจะสามารถตรวจหาลายน้ำดิจิตอลในกรณีที่รูปภาพที่เพิ่มขนาดขึ้นนั้นแปรผันโดยตรงตามขนาดของวงแหวนวงในสุด ยิ่งวงแหวนวงในสุดมีขนาดเล็กมากเท่าใดก็จะยิ่งมีโอกาสที่จะมีบางวงแหวนที่ยังซ้อนทับกันอยู่ได้ อย่างไรก็ดีเมื่อรูปภาพถูกเพิ่มขนาดไปจนถึงระดับหนึ่งซึ่งวงแหวนวงในสุดของลายน้ำดิจิตอลที่อยู่ในรูปภาพอยู่เกินขอบเขตของลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับแล้ว จะทำให้ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าต่ำมากจนเข้าใกล้ 0 เนื่องจากไม่มีวงแหวนใดที่ซ้อนทับกันได้เลย

แต่ในทางกลับกัน ปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นกับกรณีของการลดขนาด เนื่องจากวงแหวนทุกวงของลายน้ำดิจิตอลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพยังคงอยู่ในขอบเขตของลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับอยู่ ดังนั้นค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จึงยังคงมีค่าใกล้เคียงกับในกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ อย่างไรก็ดี ในกรณีที่รูปภาพถูกลดขนาดลงไปมากจนทำให้เหลือเนื้อหาของรูปภาพอยู่น้อยมากอาจทำให้ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าต่ำลงไปมากจนเข้าใกล้ 0 ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้เกิดขึ้นกับเทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลทุกประเภท เช่นเดียวกับปัญหาอื่นๆที่เนื้อหาของรูปภาพส่วนใหญ่ถูกทำลายจนเหลือเนื้อหาของรูปภาพอยู่น้อยมาก เช่นการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพต่ำมากๆ (ในที่นี้คือต่ำกว่า 5%) หรือการตัดรูปภาพจนเหลือเนื้อหาของรูปภาพอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เป็นต้น

6.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

อีกทางเลือกหนึ่งของการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพด้วยลายน้ำดิจิตอลขนาดใหญ่เพียงอันเดียว เราอาจแบ่งรูปภาพออกเป็นส่วนย่อยๆแล้วทำการซ่อนด้วยลายน้ำดิจิตอลขนาดเล็กๆลงในแต่ละส่วนเหล่านั้น ส่วนในกระบวนการตรวจหานั้นก็ทำการหาค่าสหสัมพันธ์ทีละส่วนเช่นเดียวกัน การแบ่งการซ่อนลายน้ำดิจิตอลออกเป็นส่วนๆดังกล่าวนี้จะเหมาะกับกรณีที่รูปภาพถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขเพียงบางส่วน โดยจะมีเฉพาะส่วนที่ถูกแก้ไขเท่านั้นที่ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จะลดลงไป ในขณะที่ส่วนอื่นๆจะยังคงมีค่าสหสัมพันธ์คงที่เท่าเดิมอยู่ ตัวอย่างของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแก้ไขที่กระทำเพียงบางส่วนของรูปภาพได้แก่การตัดรูปภาพ (Crop) เป็นต้น อย่างไรก็ดี ข้อเสนอแนะดังกล่าวนี้ยังคงเป็นเพียงแนวคิดอยู่เท่านั้น ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าอาจเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยท่านอื่นๆที่สนใจในงานด้านนี้ โดยแนวคิดดังกล่าวนี้จำเป็นจะต้องมีการวิเคราะห์ พิสูจน์ และทำการทดลองเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

รายการอ้างอิง

[1] Fridrich, J. Methods for tamper detection in digital images. Proceedings of the Multimedia and Security Workshop at ACM Multimedia'99 ACM ed. Orlando, Florida, USA (October 1999): 29-33.

[2] Swanson, M., M. Kobayashi, and A. Tewfik. Multimedia data-embedding and watermarking technologies. Proceedings of the IEEE 86, 6 (June 1998): 1064-1087.

[3] Bender, W., D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu. Techniques for data hiding. IBM Systems Journal 35, 3&4 (1996): 313-336.

[4] Petitcolas, F. A. P., R. J. Anderson, and M. G. Kuhn. Attacks on copyright marking systems. Second Workshop on Information Hiding 1525 (April 1998): 218-238.

[5] Craver, S., N. Memon, B. L. Yeo, and M. Yeung. Can invisible watermark resolve rightful ownerships?. Proceedings of the IS&T/SPIE Conference on Storage and Retrieval for Image and Video Databases V 3022, San Jose, USA (February 1997): 310-321.

[6] Craver, S., N. Memon, B. L. Yeo, and M. Yeung. Resolving rightful ownerships with invisible watermarking techniques: Limitations, attacks, and implications. IEEE Journal of Selected Areas in Communications 16, 4 (May 1998): 573-586.

[7] Cox, I. J., J. Kiliant, T. Leighton, and T. Shamoon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Transactions on Image Processing 6, 12 (December 1997): 1673-1687.

[8] Lin, C. Y., M. Wu, J. A. Bloom, I. J. Cox, M. L. Miller, and Y. M. Lui. Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images. IEEE Transactions on Image Processing 10, 5 (May 2001): 767-782.

[9] O'Ruanaidh, J. J. K., and T. Pun. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking. Signal Processing 66 (1998): 303-317.

[10] Zheng, D., J. Zhao, and A. E. Saddik. RST-invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology 13, 8 (August 2003): 753-765.

[11] Zheng, D., and J. Zhao. LPM-based RST invariant digital image watermarking. Proceedings of IEEE Canada Conference of Electrical and Computer Engineering Montreal, Canada. (May 2003): 1951-1954.

[12] Zheng, D., and J. Zhao. RST invariant digital image watermarking: importance of phase information. Proceedings of IEEE Canada Conference of Electrical and Computer Engineering Montreal, Canada (May 2003): 785-788.

[13] Solachidis, V., and I. Pitas. Circularly symmetric watermark embedding in 2-D DFT domain. IEEE Transactions on Image Processing 10, 11 (November 2001): 1741-1753.

[14] Chotikakamthorn, N., and S. Pholsomboon. Ring-shaped digital watermark for rotated and scaled images using random-phase sinusoidal function. IEEE Region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology (August 2001): 321-325.

[15] สิริพร ผลสมบูรณ์. เทคนิคการทำลายน้ำดิจิตอลสำหรับรูปภาพที่ผ่านกระบวนการหมุนและการปรับขนาด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

[16] Baxes, G. A. Digital image processing: Principles and applications. (n.p.): John Wiley & Sons, 2002.

[17] Castleman, K. R. Digital image processing. Singapore: Prentice-Hall, 2001.

[18] Gonzalez, R. C., and R. E. Woods. Digital image processing. NJ, USA: Prentice-Hall, 2004.

[19] Lu, N. Fractal imaging. (n.p.): Academic press, 2002.

[20] Miller, M. L., and J. A. Bloom. Computing the probability of false watermark detection. Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Hiding Dresden, Germany (1999): 146-158.

[21] Fridrich, J., R. Du, and M. Long. Steganalysis of LSB encoding in color images. Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo NY, USA (August 2000): 1279-1282.

[22] Pickholtz, R. L., D. L. Schilling, and L. B. Millstein. Theory of spread spectrum communications – A tutorial. IEEE Transactions on Communications COM-30, 5 (May 1982): 855-884.

[23] Keener, J. P. Principles of applied mathematics: Transformation and approximation. (n.p.): Addison-Wesley, 2001.

[24] Press, W. H., et al. Numerical recipes in Pascal: The art of scientific computing. UK: Cambridge university press, 2002.

[25] Peterson, L. L., and B. S. Davie. Computer network: A systems approach. 2nd ed. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 2000.

[26] Stallings, W. Data and computer communications. NJ, USA: Prentice-Hall, 2001.

[27] Feller, W. An introduction to probability theory and its applications. vol. 1, 3rd ed. New delhi, India: Wiley eastern private, 1968.

[28] Hald, A. Statistical tables and formulas. NY, USA: Wiley, 1952.

[29] Volk, W. Applied statistics for engineers. USA: McGraw-Hill, 1958.

[30] Brassard, G., and P. Bratley. Fundamentals of algorithmics. NJ, USA: Prentice-Hall international, 2001.

[31] Rosen, K. H. Discrete mathematics and its applications. 5th ed. NY, USA: McGraw-Hill, 2004.

[32] Cooley, J. W., and J. W. Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation 19 (April 1965): 297-301.

[33] Lim, J. S. Two-dimensional signal and image processing. NJ, USA: Prentice-Hall international, 1990.

[34] Russ, J. C. The image processing handbook. 2nd ed. (n.p.): CRC Press, 2001.

[35] Umbaugh, S. E. Computer vision and image processing: A practical approach using CVIP tools. (n.p.): Prentice-Hall international, 2000.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

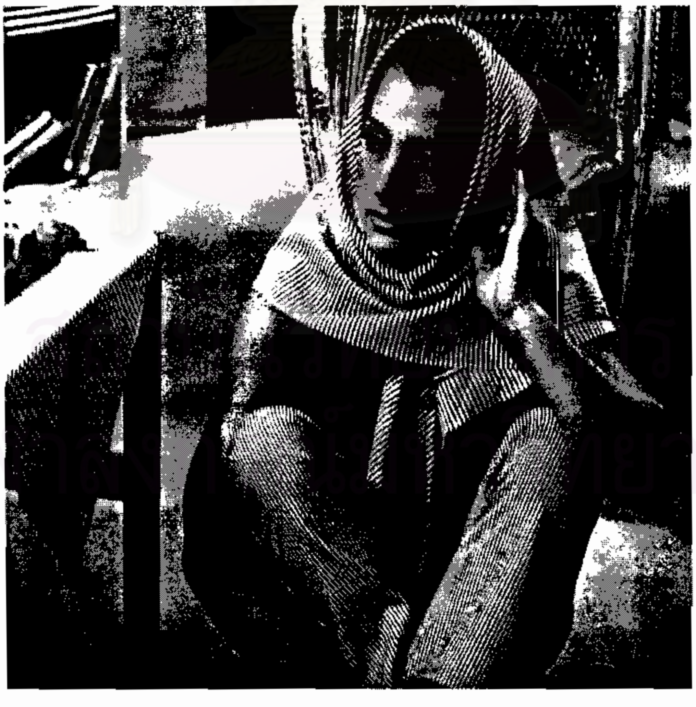
ภาคผนวก ก.

รูปภาพที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ ก.1 รูปภาพ *Aerial* ขนาด 256 × 256 พิกเซล

รูปที่ ก.2 รูปภาพ *Autumn* ขนาด 206 × 345 พิกเซล

รูปที่ ก.3 รูปภาพ *Baboon* ขนาด 339 × 339 พิกเซล



รูปที่ ก.4 รูปภาพ *Barbara* ขนาด 512 × 512 พิกเซล

รูปที่ ก.5 รูปภาพ *Bavarian Couple* ขนาด 480 × 314 พิกเซล

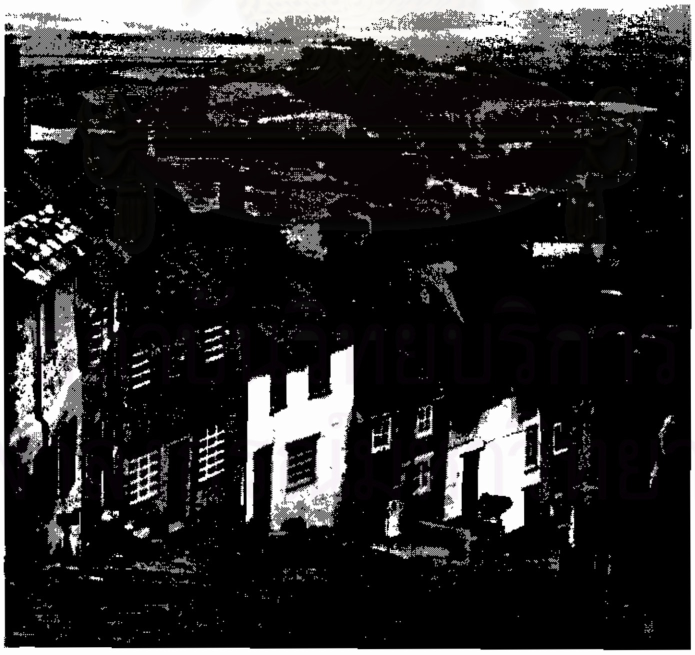
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.6 รูปภาพ *Boat* ขนาด 256 × 256 พิกเซล

รูปที่ ก.7 รูปภาพ *Cameraman* ขนาด 256 × 256 พิกเซล

รูปที่ ก.8 รูปภาพ *F16* ขนาด 512 × 512 พิกเซล

รูปที่ ก.9 รูปภาพ *Flowers* ขนาด 362 × 500 พิกเซล

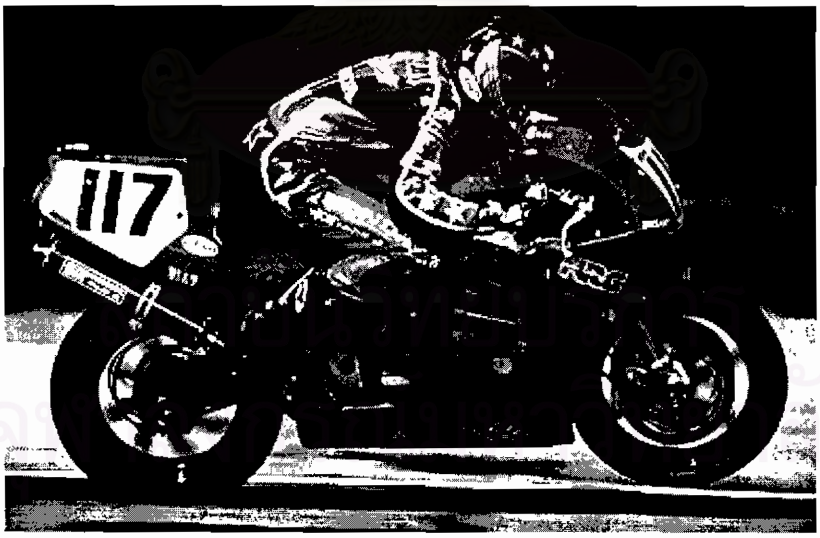


รูปที่ ก.10 รูปภาพ *Goldhill* ขนาด 512 × 512 พิกเซล

รูปที่ ก.11 รูปภาพ *Kids* ขนาด 400 × 318 พิกเซล

รูปที่ ก.12 รูปภาพ *Lena* ขนาด 512 × 512 พิกเซล

รูปที่ ก.13 รูปภาพ *Peppers* ขนาด 512 × 512 พิกเซล



รูปที่ ก.14 รูปภาพ *Racing bike* ขนาด 250 × 385 พิกเซล

รูปที่ ก.15 รูปภาพ *San Francisco* ขนาด 256 × 256 พิกเซล

รูปที่ ก.16 รูปภาพ *Trees* ขนาด 258 × 350 พิกเซล

<u>หมายเหตุ</u> รูปภาพที่นำมาแสดงในภาคผนวกนี้ถูกปรับขนาดให้พอดีกับหน้ากระดาษ

ภาคผนวก ข.

บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. 11th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP) 2004 Poznan, Poland (September 13-15, 2004): 419-422.
2. IEEE Region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology (TENCON) 2004 Chiang Mai, Thailand (November 21-24, 2004).
3. ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications 2, 2 (August 2004): 40-48.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IWSSIP'04
ambient multimedia

11[th] International Workshop
on Systems, Signals and Image Processing
September 13-15, 2004 - Poznań, Poland
Just in the Centre of Europe

International Workshop on Systems, Signals and Image Processing
IWSSIP' 2004
September 13-15, 2004
Poznań, POLAND

Siriporn Pholsomboon
Chulalongkorn University
Department of Computer Engineering
Phyathai Road, Pathumwan
10330 Bangkok
Thailand

INVITATION

Dear Author,

It is our pleasure to invite you to participate in the International Workshop on Systems, Signals and Image Processing IWSSIP' 2004 to be held on 13-15 September, 2004 in Poznań, Poland. The Workshop is organised by the Institute of Electronics and Telecommunications, Poznań University of Technology, Poland, together with Polish Society for Theoretical and Applied Electrical Engineering (Poznań Section) with technical co-sponsorship of IEEE Signal Processing Society and with co-operation with European Association for Signal, Speech and Image Processing, and Signals, Circuits and Electronic Systems Section of the Electronics and Telecommunications Committee of Polish Academy of Sciences.

Your paper 2349 titled "Rotation, Scale, And Translation Resilient Digital Watermarking Based On Complex Exponential Function" has been ACCEPTED to be presented during the conference. We are looking forward seeing you in Poznań.

สถาบันวิทยบริการ

Sincerely yours,

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

prof. Marek Domański
IWSSIP'2004 Chairman

Rotation, Scale, and Translation Resilient Digital Watermarking Based on Complex Exponential Function

Siriporn Pholsomboon and Sartid Vongpradhip

Digital System Engineering Laboratory
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330 Thailand

Abstract - **In this paper, a novel digital image watermarking scheme has been proposed based on spread spectrum technique. By exploiting complex exponential function to generate a multiple-rings shaped pattern, the watermark is invariant to rotation and translation, and resilient to scaling without truly inverse transformation needed. The proposed technique is performed in regular frequency domain without additional Log-Polar mapping required which can reduce computational complexity of such transformation. Furthermore, the original image is not needed for detection in this technique. Experimental results demonstrate performance of the proposed scheme that the watermark is correctly detected although the image was undergone by geometric and non-geometric transforms.**

Keywords: Digital Image Watermarking, Copyright Protection, Rotation, Scale, and Translation (RST) Resilient, Complex Exponential Function

I. INTRODUCTION

The rapid growth of information technology makes accessing information much easier than before and causes many multimedia data needed to be protected from piracy at the same time. Researches on copyright protections have greatly been spent in these several years. This leads to an application of digital watermarking that embeds small information about copyright or ownership without introducing of visible change on digital media.

Many robust digital watermarking schemes for images have been proposed, mainly based on spread spectrum principle [1]. Some of them are invariant to RST (Rotate, Scale, and Translation) transformations in which no additional inverse operation needed in detection [2]-[4]. The schemes are performed in log-polar coordinate of Fourier domain called Fourier-Mellin. The concept is perfect in theory but very difficult in practice. Those techniques require additional Log-Polar mapping (LPM) and inverse Log-Polar mapping (ILPM) beyond fundamental frequency transformation in both embedding and extraction processes. As described in the literatures, there are many difficulties and problems in practical implementation. Furthermore, to obtain an adequately fine quality of embedded image, the resolution of the LPM and ILPM at least 256×256 must be used [2]. As a result, sophisticated algorithm must be investigated in order to avoid unacceptable computational imprecision of such samplings. This is clearly additional complexity other than essential watermarking process.

In this paper, we propose a novel watermarking technique for digital image that is invariant to rotation and translation, and resilient to scaling. The watermarking pattern of this technique is created from complex exponential function with random phase as spreading code. Embedding and detection are performed in frequency domain, i.e. discrete Fourier transform (DFT). The watermark has a multiple-rings shape, which is not exactly circularly symmetric. This is contrasted to the circularly symmetric watermark technique as proposed in [5] that their watermarking pattern is constructed from a binary sequence ({-1, 1}). To allow for arbitrary rotating angle, the watermark pattern along each ring of their technique needs to be kept constant. This greatly limits the 'spreading' capability of the watermark pattern. As a result, larger watermarking pattern is needed to achieve reliable detection [6].

The technique proposed here can reduce complexity in not only the inverse transformation needed, but also additional calculation for conversions between regular frequency domain and Log-Polar domain required in those LPM-based techniques. Furthermore, the technique does not even require an original image in detection process. This can reduce unnecessary computation time

of searching for the original image. However, the technique can also be applied in spatial domain as described in [6].

II. PROPOSED SCHEME

The proposed watermarking pattern is constructed in circular shape, based on spread spectrum technique. The watermark is separated into rings in which each one represents each spreading code of the watermark. Fig.1 shows an example of the pattern.

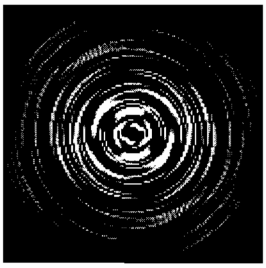


Fig. 1: The proposed circular-shaped watermark.

Let (r, θ) be a position in polar coordinate with a corresponding (x, y) in Cartesian coordinate. By exploiting complex exponential function, the watermarking pattern is represented by

$$W(r,\theta) = e^{j(\omega\theta+\phi_r)} \quad (1)$$

where ω and ϕ_r are arbitrary angular frequency and random phase, respectively. Let R be radius of the outermost ring, $1 \le r \le R$ and $0 \le \theta < 2\pi$.

Let $f(x, y)$ be an image of size $M \times N$, the DFT and the inverse discrete Fourier transform (IDFT) of $f(x, y)$ are defined as follows [7]:

$$F(u,v) = \frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)} \quad (2)$$

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} F(u,v)\cdot e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)}. \quad (3)$$

The watermarked image $F'(u, v)$ in frequency domain is obtained by

$$F'(u,v) = \left(|F(u,v)|\cdot(1+\alpha W(x,y))\right)\cdot e^{j\Phi(u,v)} \quad (4)$$

where $|F(u, v)|$ and $\Phi(u, v)$ are Fourier spectrum and phase angle of $F(u, v)$, respectively. α is a watermarking strength factor. Note that $W(x, y)$ may have the same size as that of $f(x, y)$ or smaller. In case that the watermark is smaller than the image, zeros must be padded to the outside of the watermark as wrapping around. If the size of the watermark is too small, then only the high frequency components in the magnitude spectrum of image will be embedded (see Fig. 2 in Section 4). This is contrary to [4] and [5] which suggested that watermark should be spread between the most and the least significant frequency components in order to keep robustness against lossy compression or filtering processes and fidelity of the image at the same time. For our proposed watermark, the larger the pattern, the wider the range of magnitude spectrum of image is embedded.

To yield the watermarked image $f'(x, y)$, simply apply IDFT to $F'(u, v)$

$$f'(x,y) = \mathrm{IDFT}(F'(u,v)). \quad (5)$$

Detection process for the presence of the watermark can be done without needing of original image which avoids unnecessary computation for the searching. Let $g(x, y)$ be a possibly watermarked image, we have

$$D(u,v) = \log(1+|G(u,v)|) \quad (6)$$

as an intensity displaying function for Fourier spectra of $g(x, y)$. The watermark is detected by computing the correlation between $D(u, v)$ and the original watermark $W(x, y)$ by using similarity function [1]

$$sim(D,W) = \frac{\sum_{x=u=0}^{M-1}\sum_{y=v=0}^{N-1} D(u,v)\cdot W^*(x,y)}{\sqrt{\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} D(u,v)\cdot D^*(u,v)}} \quad (7)$$

where $W^*(x, y)$ and $D^*(u, v)$ are the complex conjugates.

Assuming that $D(u, v)$ and $W(x, y)$ are independently distributed according to $N(0, 1)$ (where $N(\mu, \sigma^2)$ denotes a normal distribution with mean μ and variance σ^2), then $sim(D, W)$ will be distributed according to $N(0, 1)$. This watermark detection function follows that of [1]. The watermark is successfully detected if $sim(D, W)$ is greater than predefined threshold δ (for example, $\delta = 6$ as suggested in [1]).

III. RESILIENT PROPERTIES

To show how the described watermark is invariant to translation and rotation, and resilient to scaling, consider the properties of the Fourier representations below.

A. Translation invariant

Shifts in spatial domain do not effect the magnitude of its Fourier transform [7]

$$f(x-x_0, y-y_0) \Leftrightarrow F(u,v)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux_0+vy_0}{N}\right)} \quad (8)$$

$$\left|F(u,v)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux_0+vy_0}{N}\right)}\right| = |F(u,v)|. \quad (9)$$

It is clear that spatial shifts affect only the phase components of an image, which is known as *circular translation invariant* [2].

B. Rotation invariant

Rotation in the spatial domain causes the Fourier components to be rotated through the same angle in frequency domain [7]

$$f(r,\theta+\theta_0) \Leftrightarrow F(\Omega,\Phi+\theta_0) \quad (10)$$

where (Ω, Φ) is a corresponding polar-coordinate point of (u, v) in frequency domain.

For any rotated angle ε, $W_\varepsilon'(r, \theta)$ can be rewritten as

$$W_\varepsilon'(r,\theta) = e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)}. \quad (11)$$

Correlation between the original watermark $W(r, \theta)$ and the rotated one $W_\varepsilon'(r, \theta)$ is defined by

$$W(r,\theta) \circ W_\varepsilon'(r,\theta) = \left| \int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_r)} \cdot e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)} d\theta \right|. \quad (12)$$

By using standard trigonometry and the well-known Euler's formula, it can be shown that $W(r, \theta) \circ W_\varepsilon'(r, \theta) = 2\pi$ irrespectively of the rotated angle ε. This is proven that the proposed watermark gives a constant result of correlation without additional inverse rotation process required.

C. Scale resilient

Scaling the image in the spatial domain causes an inverse scaling in the frequency domain [7]

$$f(ax,by) \Leftrightarrow \frac{1}{|ab|} F\left(\frac{u}{a},\frac{v}{b}\right). \quad (13)$$

As the pattern of the proposed watermark has a multiple-rings shape in which each ring is constructed by same property, i.e. same angular frequency, but different random phases, this implies that inner and outer rings are scaled versions of each other. Consider the correlation between two different rings below

$$W(r_1,\theta) \circ W(r_2,\theta) = \left| \int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_{r1})} \cdot e^{j(\omega\theta+\phi_{r2})} d\theta \right|. \quad (14)$$

By using the same derivation as that of equation (12), the result of $W(r_1, \theta) \circ W(r_2, \theta) = 2\pi$, regardless of random phase ϕ_r. This is shown that scaling the size of the pattern does not effect the value of correlation when consider to a particular pair of rings. Thus, if the watermarked image is scaled, the original watermark does not need to be resized correspondingly to the new size of scaled image in detection. However, in practice, the new size of scaled image will differ from the original size of watermark. Therefore, if the watermarked image is enlarged, zeros must be padded to the outside of the watermark to avoid wrap-around error. In case that the image is reduced, then only center of the watermark of the corresponding size should be cropped and remained. No further sophisticated calculation is required before the similarity function. The property of such multiple-rings shape is not exactly 'invariant' to scale, but rather 'resilient'.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, we illustrate performance of the proposed scheme against scaling, JPEG compression, and rotation.

We first performed experiments with scaling. The proposed watermark was constructed using (1) with size R = 256 and angular frequency ω = 32. The watermark was embedded into original image *Lena* of size 512×512 using watermarking strength factor α = 0.2. The watermarked image was imperceptible without the original one. Fig. 2 shows the original image and its watermarked version with their Fourier spectrums.

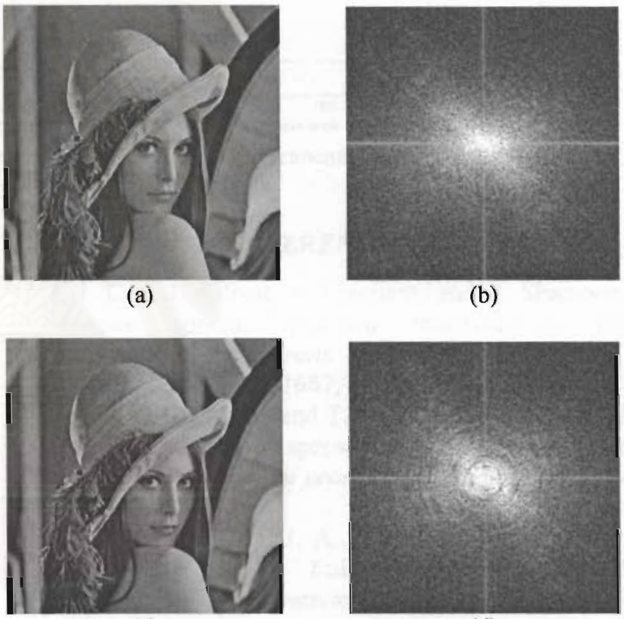


Fig. 2: (a) Original image and (b) its Fourier spectrum. (c) Watermarked image and (d) its Fourier spectrum.

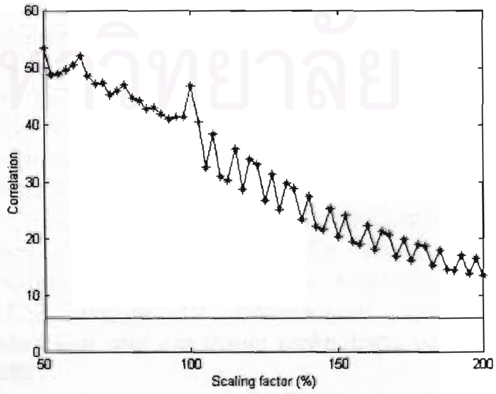


Fig. 3: Experiments on scaling.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The watermarked image was resized by different factors with step of 2.5% from 50% to 200%. Fig. 3 shows the similarity value obtained from each scaling factor using (7). As the result, the watermark was correctly detected at all scaled sizes, using detection threshold $\delta = 6$. Note that the value changes up and down alternatively due to incompletely matching between rings of the original watermark and the scaled image.

We next experimented on JPEG compression. The watermarked image was compressed by quality factors at 75%, 50%, 25%, 10%, and 5%. Fig. 4 shows the result of similarity value.

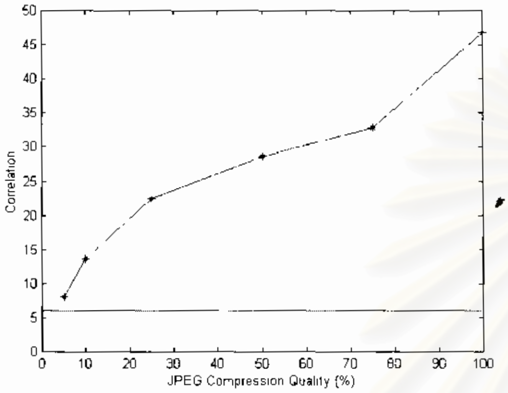


Fig. 4: Experiments on JPEG compression.

Finally, we performed experiments with rotation. The outside of the original image was padded with zeros to the possibly maximum size when it is rotated. In this case, the image was padded to 725×725 as shown in Fig. 5 (a). Second watermark was constructed with size $R = 362$ and $\omega = 32$. The watermark was then embedded into the padded original image using $\alpha = 0.2$. Rotation was applied to the image at various degrees with step size of 5 degrees from 0 to 355. At each step of rotation, the image was cropped to the original padded size as shown in Fig. 5 (b). This obviously removed some watermark components off. The result presented in Fig. 6 shows that the watermark was successfully detected at all angles of rotation.

(a) (b)

Fig. 5: (a) Padded original image; (b) cropped rotated one.

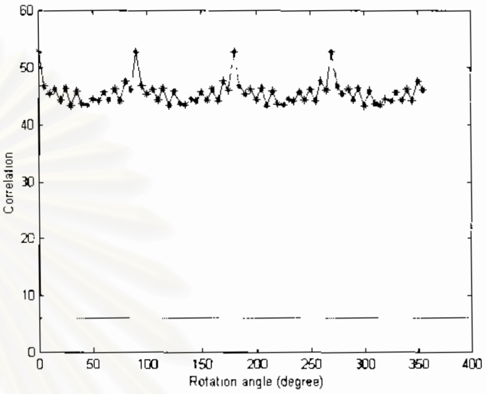


Fig. 6: Experiments on rotation.

V. CONCLUSION

In this paper, we proposed a novel digital watermarking technique that is invariant to rotation and translation, and also resilient to scaling. The described technique has circular shape with multiple rings constructed by exploiting complex exponential formula. Experimental results shown in Section 4 demonstrate performance of the watermark that is robust against all angles of rotation and reasonable range of scaling. The watermark was correctly detected without inverse transformation or original image required. Further experiments on translation and filtering have been investigated, but are not reported here.

REFERENCES

[1] I. J. Cox, J. Kiliant, T. Leighton, and T. Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia," *IEEE Trans. on image processing*, vol. 6, no. 12, page 1673-1687, 1997.

[2] J. J. K. O'Ruanaidh, and T. Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," *Signal processing*, vol. 66, page 303-317, 1998.

[3] C. Y. Lin, M. Wu, J. A. Bloom, I. J. Cox, M. L. Miller, and Y. M. Lui, "Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images," *IEEE Trans. on image processing*, vol. 10, no. 5, page 767-782, 2001.

[4] D. Zheng, J. Zhao, and A. E. Saddik, "RST-invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation," *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 13, no. 8, page 753-765, 2003.

[5] V. Solachidis, and I. Pitas, "Circularly symmetric watermark embedding in 2-D DFT domain," *IEEE transactions on image processing*, vol. 10, no. 11, page 1741-1753, 2001.

[6] N. Chotikakamthorn, and S. Pholsomboon, "Ring-shaped digital watermark for rotated and scaled images using random-phase sinusoidal function," *IEEE region 10 international conference on electrical and electronic technology*, page 321-325, 2001.

[7] R. C. Gonzalez, and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, 1993.

No. TENCON 2004/008

12 August 2004

Subject: Invitation letter to present a paper at IEEE TENCON 2004
Paper ID: 1305
Title: ROTATION, SCALE, AND TRANSLATION RESILIENT DIGITAL WATERMARKING BASED ON COMPLEX EXPONENTIAL FUNCTION
Submitting author(s): Siriporn Pholsomboon and Sartid Vongpradhip

Dear TENCON 2004 author(s)

You are invited to present the above paper at IEEE TENCON 2004 between 21-24 November 2004 in Chiang Mai,Thailand.

Please login at www.TENCON2004.com/paper to download informations about how to submit its final manuscript and its IEEE copyright form. Both submissions must reach the organization committee before 7 September 2004.

The registration form is also attached. Note that at least one author of the accepted paper must register before 30 September 2004. Otherwise, the paper will not be included in the proceedings. We recommend that you make your hotel reservation at www.lotuspskhotel.com/tencon2004.htm as soon as possible since November is within the high tourist season here. Please also visit www.TENCON2004.com at times for updated information.

TENCON 2004 is an official international conference sponsored by IEEE Region 10. All papers are peer reviewed by up to 3 international referees from various institutions. Note that poster/oral papers are of the same technical quality. If the IEEE copyright form is submitted, the paper will also be accessible via IEEE eXplore online publication.

Thank you for your contributions. We sincerely welcome you to Chiang Mai.

Best regards

Ekachai Leelarasmee Ph.D (Associate Professor)
TENCON 2004 Technical Program Chair
Chulalongkorn University, Electrical Engineering Dept.
Phaya-Thai Road, Patumwan, Bangkok 10330, Thailand
Email: technical@tencon2004.com

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROTATION, SCALE, AND TRANSLATION RESILIENT DIGITAL WATERMARKING BASED ON COMPLEX EXPONENTIAL FUNCTION

Siriporn Pholsomboon and Sartid Vongpradhip

Digital System Engineering Laboratory
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330 Thailand
e-mail: siriporn.pho@student.chula.ac.th

ABSTRACT

In this paper, a novel digital image watermarking scheme has been proposed based on spread spectrum technique. By exploiting complex exponential function to generate a multiple-rings shaped pattern, the watermark is invariant to rotation and translation, and resilient to scaling without truly inverse transformation needed. The proposed technique is performed in regular frequency domain without additional Log-Polar mapping required which can reduce computational complexity of such transformation. Furthermore, the original image is not needed for detection in this technique. Experimental results demonstrate performance of the proposed scheme that the watermark is correctly detected although the image was undergone by geometric and non-geometric transforms.

1. INTRODUCTION

The rapid growth of information technology makes accessing information much easier than before and causes many multimedia data needed to be protected from piracy at the same time. Researches on copyright protections have greatly been spent in these several years. This leads to an application of digital watermarking that embeds small information about copyright or ownership without introducing of visible change on digital media.

Many robust digital watermarking schemes for images have been proposed, mainly based on spread spectrum principle [1]. Some of them are invariant to RST (Rotate, Scale, and Translation) transformations in which no additional inverse operation needed in detection [2]-[4]. The schemes are performed in log-polar coordinate of Fourier domain called Fourier-Mellin. The concept is perfect in theory but very difficult in practice. Those techniques require additional Log-Polar mapping (LPM) and inverse Log-Polar mapping (ILPM) beyond fundamental frequency transformation in both embedding and extraction processes. As described in the literatures, there are many difficulties and problems in practical implementation. Furthermore, to obtain an adequately fine quality of embedded image, the resolution of the LPM and ILPM at least 256×256 must be used [2].

As a result, sophisticated algorithm must be investigated in order to avoid unacceptable computational imprecision of such samplings. This is clearly additional complexity other than essential watermarking process.

In this paper, we propose a novel watermarking technique for digital image that is invariant to rotation and translation, and resilient to scaling. The watermarking pattern of this technique is created from complex exponential function with random phase as spreading code. Embedding and detection are performed in frequency domain, i.e. discrete Fourier transform (DFT). The watermark has a multiple-rings shape, which is not exactly circularly symmetric. This is contrasted to the circularly symmetric watermark technique as proposed in [5] that their watermarking pattern is constructed from a binary sequence ({-1, 1}). To allow for arbitrary rotating angle, the watermark pattern along each ring of their technique needs to be kept constant. This greatly limits the 'spreading' capability of the watermark pattern. As a result, larger watermarking pattern is needed to achieve reliable detection [6].

The technique proposed here can reduce complexity in not only the inverse transformation needed, but also additional calculation for conversions between regular frequency domain and Log-Polar domain required in those LPM-based techniques. Furthermore, the technique does not even require an original image in detection process. This can reduce unnecessary computation time of searching for the original image. However, the technique can also be applied in spatial domain as described in [6].

2. PROPOSED SCHEME

The proposed watermarking pattern is constructed in circular shape, based on spread spectrum technique. The watermark is separated into rings in which each one represents each spreading code of the watermark. Fig.1 shows an example of the pattern.

Let (r, θ) be a position in polar coordinate with a corresponding (x, y) in Cartesian coordinate. By exploiting complex exponential function, the watermarking pattern is represented by

0-7803-8560-8/04/$20.00©2004IEEE

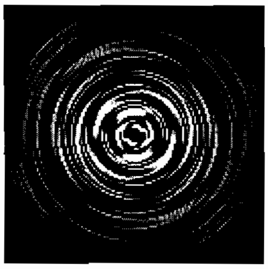


Fig. 1. The proposed circular-shaped watermark.

$$W(r,\theta) = e^{j(\omega\theta+\phi_r)} \tag{1}$$

where ω and ϕ_r are arbitrary angular frequency and random phase, respectively. Let R be radius of the outermost ring, $1 \le r \le R$ and $0 \le \theta < 2\pi$.

Let $f(x, y)$ be an image of size $M \times N$, the DFT and the inverse discrete Fourier transform (IDFT) of $f(x, y)$ are defined as follows [7]:

$$F(u,v) = \frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)} \tag{2}$$

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} F(u,v)\cdot e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)}. \tag{3}$$

The watermarked image $F'(u, v)$ in frequency domain is obtained by

$$F'(u,v) = \left(|F(u,v)|\cdot(1+\alpha W(x,y))\right)\cdot e^{j\Phi(u,v)} \tag{4}$$

where $|F(u, v)|$ and $\Phi(u, v)$ are Fourier spectrum and phase angle of $F(u, v)$, respectively. α is a watermarking strength factor. Note that $W(x, y)$ may have the same size as that of $f(x, y)$ or smaller. In case that the watermark is smaller than the image, zeros must be padded to the outside of the watermark as wrapping around. If the size of the watermark is too small, then only the high frequency components in the magnitude spectrum of image will be embedded (see Fig. 2 in Section 4). This is contrary to [4] and [5] which suggested that watermark should be spread between the most and the least significant frequency components in order to keep robustness against lossy compression or filtering processes and fidelity of the image at the same time. For our proposed watermark, the larger the pattern, the wider the range of magnitude spectrum of image is embedded.

To yield the watermarked image $f'(x, y)$, simply apply IDFT to $F'(u, v)$

$$f'(x,y) = \mathrm{IDFT}(F'(u,v)). \tag{5}$$

Detection process for the presence of the watermark can be done without needing of original image which avoids unnecessary computation for the searching. Let $g(x, y)$ be a possibly watermarked image, we have

$$D(u,v) = \log(1+|G(u,v)|) \tag{6}$$

as an intensity displaying function for Fourier spectra of $g(x, y)$. The watermark is detected by computing the correlation between $D(u, v)$ and the original watermark $W(x, y)$ by using similarity function [1]

$$sim(D,W) = \frac{\sum_{x=u=0}^{M-1}\sum_{y=v=0}^{N-1} D(u,v)\cdot W^{*}(x,y)}{\sqrt{\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} D(u,v)\cdot D^{*}(u,v)}} \tag{7}$$

where $W^{*}(x, y)$ and $D^{*}(u, v)$ are the complex conjugates.

Assuming that $D(u, v)$ and $W(x, y)$ are independently distributed according to $N(0, 1)$ (where $N(\mu, \sigma^2)$ denotes a normal distribution with mean μ and variance σ^2), then $sim(D, W)$ will be distributed according to $N(0, 1)$. This watermark detection function follows that of [1]. The watermark is successfully detected if $sim(D, W)$ is greater than predefined threshold δ (for example, $\delta = 6$ as suggested in [1]).

3. RESILIENT PROPERTIES

To show how the described watermark is invariant to translation and rotation, and resilient to scaling, consider the properties of the Fourier representations below.

3.1. Translation invariant

Shifts in spatial domain do not effect the magnitude of its Fourier transform [7]

$$f(x-x_0, y-y_0) \Leftrightarrow F(u,v)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux_0+vy_0}{N}\right)} \tag{8}$$

$$\left|F(u,v)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux_0+vy_0}{N}\right)}\right| = |F(u,v)|. \tag{9}$$

It is clear that spatial shifts affect only the phase components of an image, which is known as *circular translation invariant* [2].

3.2. Rotation invariant

Rotation in the spatial domain causes the Fourier components to be rotated through the same angle in frequency domain [7]

$$f(r,\theta+\theta_0) \Leftrightarrow F(\Omega,\Phi+\theta_0) \tag{10}$$

where (Ω, Φ) is a corresponding polar-coordinate point of (u, v) in frequency domain.

For any rotated angle ε, $W_\varepsilon'(r, \theta)$ can be rewritten as

$$W_\varepsilon'(r,\theta) = e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)}. \tag{11}$$

Correlation between the original watermark $W(r, \theta)$ and the rotated one $W_\varepsilon'(r, \theta)$ is defined by

$$W(r,\theta)\circ W_{\varepsilon}'(r,\theta)=\left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_r)}\cdot e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)}d\theta\right|. \quad (12)$$

By using standard trigonometry and the well-known Euler's formula, it can be shown that $W(r, \theta) \circ W_{\varepsilon}'(r, \theta) = 2\pi$ irrespectively of the rotated angle ε. This is proven that the proposed watermark gives a constant result of correlation without additional inverse rotation process required.

3.3. Scale resilient

Scaling the image in the spatial domain causes an inverse scaling in the frequency domain [7]

$$f(ax,by)\Leftrightarrow \frac{1}{|ab|}F\left(\frac{u}{a},\frac{v}{b}\right). \quad (13)$$

As the pattern of the proposed watermark has a multiple-rings shape in which each ring is constructed by same property, i.e. same angular frequency, but different random phases, this implies that inner and outer rings are scaled versions of each other. Consider the correlation between two different rings below

$$W(r_1,\theta)\circ W(r_2,\theta)=\left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_{r1})}\cdot e^{j(\omega\theta+\phi_{r2})}d\theta\right|. \quad (14)$$

By using the same derivation as that of (12), the result of $W(r_1, \theta) \circ W(r_2, \theta) = 2\pi$, regardless of random phase ϕ_r. This is shown that scaling the size of the pattern does not effect the value of correlation when consider to a particular pair of rings. Thus, if the watermarked image is scaled, the original watermark does not need to be resized correspondingly to the new size of scaled image in detection. However, in practice, the new size of scaled image will differ from the original size of watermark. Therefore, if the watermarked image is enlarged, zeros must be padded to the outside of the watermark to avoid wrap-around error. In case that the image is reduced, then only center of the watermark of the corresponding size should be cropped and remained. No further sophisticated calculation is required before the similarity function. The property of such multiple-rings shape is not exactly 'invariant' to scale, but rather 'resilient'.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, we illustrate performance of the proposed scheme against scaling, JPEG compression, and rotation.

We first performed experiments with scaling. The proposed watermark was constructed using (1) with size $R = 256$ and angular frequency $\omega = 32$. The watermark was embedded into original image "*Lenna*" of size 512×512 using watermarking strength factor $\alpha = 0.2$. The watermarked image was imperceptible without the original one. Fig. 2 shows the original image and its watermarked version with their Fourier spectrums.

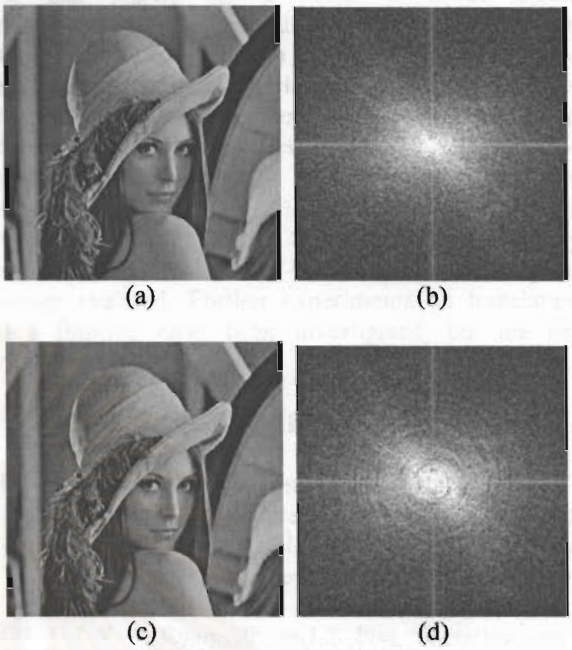


Fig. 2 (a) Original image and (b) its Fourier spectrum. (c) Watermarked image and (d) its Fourier spectrum.

The watermarked image was resized by different factors with step of 2.5% from 50% to 200%. Fig. 3 shows the similarity value obtained from each scaling factor using (7). As the result, the watermark was correctly detected at all scaled sizes, using detection threshold δ = 6. Note that the value changes up and down alternatively due to incompletely matching between rings of the original watermark and the scaled image.

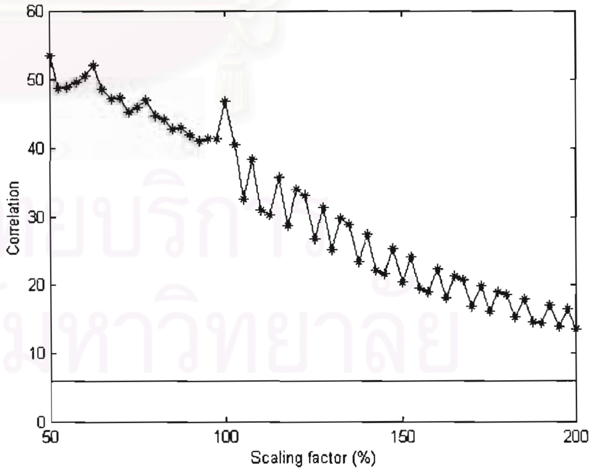


Fig. 3. Experiments on scaling.

We next experimented on JPEG compression. The watermarked image was compressed by quality factors at 75%, 50%, 25%, 10%, and 5%. Fig. 4 shows the result of similarity value.

Finally, we performed experiments with rotation. The outside of the original image was padded with zeros to the possibly maximum size when it is

rotated. In this case, the image was padded to 725× 725 as shown in Fig. 5 (a). Second watermark was constructed with size R = 362 and ω = 32. The watermark was then embedded into the padded original image using α = 0.2. Rotation was applied to the image at various degrees with step size of 5 degrees from 0 to 355. At each step of rotation, the image was cropped to the original padded size (Fig. 5 (b)). This obviously removed some watermark components off. The result presented in Fig. 6 shows that the watermark was successfully detected at all angles of rotation.

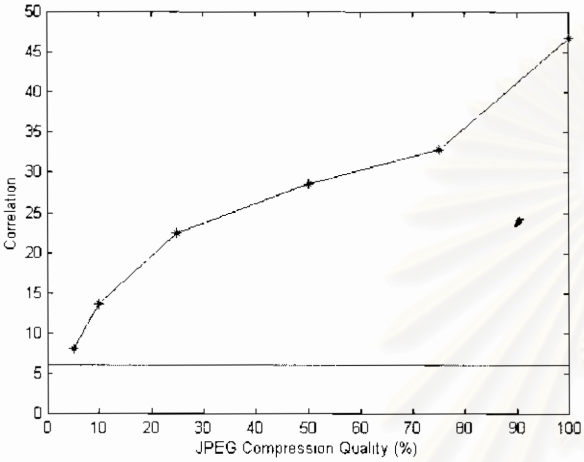


Fig. 4. Experiments on JPEG compression.

(a) (b)

Fig. 5. (a) Padded original image; (b) cropped rotated one.

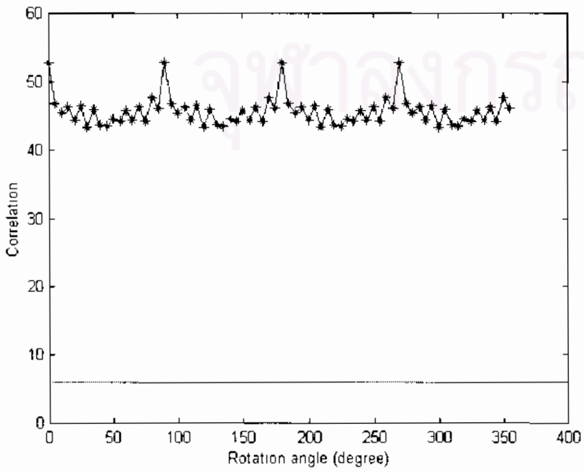


Fig. 6. Experiments on rotation.

5. CONCLUSION

In this paper, we proposed a novel digital watermarking technique that is invariant to rotation and translation, and also resilient to scaling. The described technique has circular shape with multiple rings constructed by exploiting complex exponential formula. Experimental results shown in Section 4 demonstrate performance of the watermark that is robust against all angles of rotation and reasonable range of scaling. The watermark was correctly detected without inverse transformation or original image required. Further experiments on translation and filtering have been investigated, but are not reported here.

6. REFERENCES

[1] I. J. Cox, J. Kiliant, T. Leighton, and T. Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia," *IEEE Trans. on image processing*, vol. 6, no. 12, page 1673-1687, 1997.

[2] J. J. K. O'Ruanaidh, and T. Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," *Signal processing*, vol. 66, page 303-317, 1998.

[3] C. Y. Lin, M. Wu, J. A. Bloom, I. J. Cox, M. L. Miller, and Y. M. Lui, "Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images," *IEEE Trans. on image processing*, vol. 10, no. 5, page 767-782, 2001.

[4] D. Zheng, J. Zhao, and A. E. Saddik, "RST-invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation," *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 13, no. 8, page 753-765, 2003.

[5] V. Solachidis, and I. Pitas, "Circularly symmetric watermark embedding in 2-D DFT domain," *IEEE transactions on image processing*, vol. 10, no. 11, page 1741-1753, 2001.

[6] N. Chotikakamthorn, and S. Pholsomboon, "Ring-shaped digital watermark for rotated and scaled images using random-phase sinusoidal function," *IEEE region 10 international conference on electrical and electronic technology*, page 321-325, 2001.

[7] R. C. Gonzalez, and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, 1993.

ECTI TRANSACTIONS ON ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS
E-mail: editorec@ecti.org.th
Website: http://www.ecti.or.th/transactions/

ECTI Association
C/O Sirindhorn International
Institute of Technology (SIIT)
PO Box 22, Thammasat Rangsit
Post Office
Pathumtani, 12121, Thailand
E-mail: general@ecti.org.th
Website: http://www.ecti.or.th/

November 25, 2004

Dear sir,

The **ECTI TRANSACTIONS ON ELETRICAL/ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS** is an International Journal published bi-annually by the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Communications and Information Technology Association (ECTI). Contributed papers are original that advance the state-of-the art and applications of Electronics and Communications.

It is a great pleasure to inform you that your paper coded **SP2R30** entitled, "**Rotation, Scale, and Translation Resilient Digital Watermark Based on Complex Exponential Function,**" authored by **Siriporn Pholsomboon** and **Sartid Vongpradhip** has been **accepted** as a **full paper** to publish in **ECTI TRANSACTIONS ON ELECTRICAL/ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS, vol.2, no.2, August 2004.**

Sincerely yours,

W. [signature]

Wanlop Surakampontorn
(Editor, ECTI Trans.EEC)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Rotation, Scale, and Translation Resilient Digital Watermark Based on Complex Exponential Function

Siriporn Pholsomboon and Sartid Vongpradhip

Digital System Engineering Laboratory
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330 Thailand
e-mail: siriporn.pho@student.chula.ac.th

ABSTRACT

In this paper, a novel digital image watermarking scheme has been proposed based on spread spectrum technique. By exploiting complex exponential function to generate a multiple-rings shaped pattern, the watermark is invariant to rotation and translation, and resilient to scaling without truly inverse transformation needed. The proposed scheme is performed in regular frequency domain without additional log-polar mapping required which can reduce computational complexity of such transformation. Furthermore, the original image is not needed for detection in this scheme. Experimental results against translation, rotation, scaling, JPEG compression, brightness adjustment, image filtering, noise adding, printing-and-scanning, watermark counterfeiting, and collision attacking demonstrate performance of the proposed scheme that the watermark is correctly detected although the image was undergone by various geometric and non-geometric transformations.

Keywords: Digital Image Watermarking, Copyright Protection, Rotation, Scale, and Translation (RST) Resilient, Complex Exponential Function

1. INTRODUCTION

The rapid growth of information technology makes accessing information much easier than before and causes many multimedia data needed to be protected from piracy at the same time. Researches on copyright protections have greatly been spent in these several years. This leads to an application of digital watermarking that embeds small information about copyright or ownership without introducing of visible change on digital media [1-2], A robust digital watermark must be recognizable although the embedded media have been severely degraded by most transformations [3-4].

Many robust digital watermarking schemes for images have been proposed, mainly based on spread spectrum principle [5]. The original proposed scheme requires inverse operation in detection if a test image has been geometrically transformed. For instance, if the image is rotated by any angle, the image is needed to be rotated back to its original orientation. Such operation requires huge calculation and this becomes more complex when more transformations have been applied.

Although there are some spread-spectrum-watermarking schemes invariant to RST (Rotate, Scale, and Translation) transformations in which no additional inverse operation is needed in detection [6-10]. The schemes are performed in log-polar coordinate of Fourier domain called Fourier-Mellin. The concept is perfect in theory but very difficult in practice. Those schemes require additional Log-Polar mapping (LPM) and inverse Log-Polar mapping (ILPM) beyond fundamental frequency transformation in both processes of embedding and detection. As described in the literatures, there are many difficulties and problems in practical implementation. Furthermore, to obtain an adequately fine quality of embedded image, the resolution of the LPM and ILPM at least 256×256 must be used [6]. As a result, sophisticated algorithm must be investigated in order to avoid unacceptable computational imprecision of such samplings. This is clearly additional complexity other than essential watermarking process.

In this paper, we propose a novel watermarking scheme for digital image that is invariant to rotation and translation, and resilient to scaling. The watermarking pattern of this scheme is created from complex exponential function with random phase as spreading code. Embedding and detection are performed in frequency domain, i.e. discrete Fourier transform (DFT). The watermark has a multiple-rings shape, which is not exactly circularly symmetric. This is contrasted to the circularly symmetric watermark scheme as proposed in [11] that their watermarking pattern is constructed from a binary sequence ({-1, 1}). To allow for arbitrary rotating angle, the watermark pattern along each ring of their scheme needs to be kept constant. This greatly limits the 'spreading' capability of the watermark pattern. As a result, larger watermarking pattern is needed to achieve reliable detection [12].

The scheme proposed here can reduce complexity in not only the inverse transformation needed, but also additional calculation for conversions between regular frequency domain and log-polar domain required in those LPM-based schemes. Furthermore, the scheme does not even require an original image in detection process. This can reduce unnecessary computation time of searching for the original image as well as ignore space needed for keeping. However, the scheme can also be applied in spatial domain as described in [12-13].

The paper is organized as follows. First, a general introduction to data embedding and digital watermark is briefly described. In Section 2, a description of the proposed scheme with the processes of embedding and detection are addressed. Proofs of robustness against geometrical transformations are located in Section 3. Experiments performed on standard tested image against various geometric and non-geometric transformations are demonstrated in Section 4. Section 5, we conclude this work with a brief overview.

2. PROPOSED SCHEME

The proposed watermarking pattern is constructed in circular shape, based on spread spectrum technique. The watermark is separated into rings in which each one represents each spreading code of the watermark. Fig.1 shows an example of the pattern.

***Fig. 1:** The Proposed Circular-Shaped Watermark.*

Let (r, θ) be a position in polar coordinate with a corresponding (x, y) in Cartesian coordinate. By exploiting complex exponential function, the watermarking pattern is represented by

$$W(r,\theta) = e^{j(\omega\theta + \phi_r)} \tag{1}$$

where ω and ϕ_r are arbitrary angular frequency and random phase, respectively. Let R be radius of the outermost ring, $1 \leq r \leq R$ and $0 \leq \theta < 2\pi$.

Let $f(x, y)$ be an image of size $M \times N$, the DFT and the inverse discrete Fourier transform (IDFT) of $f(x, y)$ are defined as follows [14]:

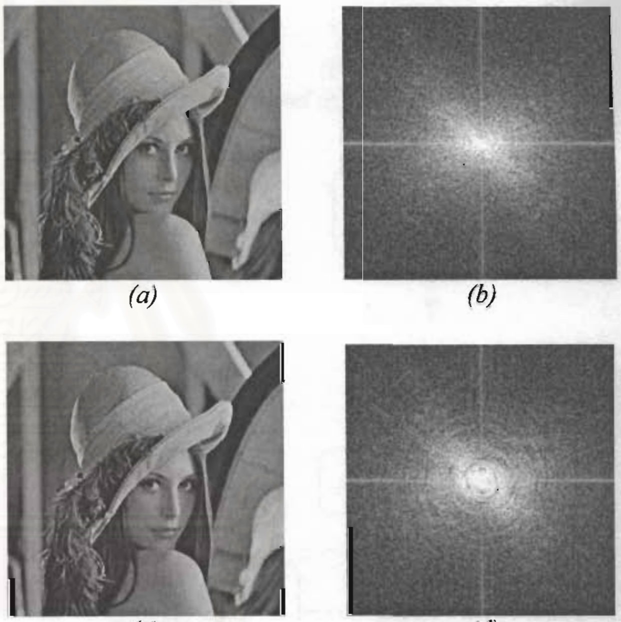
$$F(u,v) = \frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)} \tag{2}$$

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} F(u,v)\cdot e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)}. \tag{3}$$

The watermarked image $F'(u, v)$ in frequency domain is obtained by

$$F'(u,v) = \left(\left|F(u,v)\right|\cdot(1+\alpha W(x,y))\right)\cdot e^{j\Phi(u,v)} \tag{4}$$

where $|F(u, v)|$ and $\Phi(u, v)$ are Fourier spectrum and phase angle of $F(u, v)$, respectively. An α is a watermarking strength factor which can be viewed as a relative measure of how much the image should be modified to alter the perceptual quality. Choice of α may vary based on some general assumption as suggested in [5]. Note that $W(x, y)$ may have the same size as that of $f(x, y)$ or smaller. In case that the watermark is smaller than the image, zeros must be padded to the outside of the watermark as wrapping around. If the size of the watermark is too small, then only the high frequency components in the magnitude spectrum of image will be embedded. This is contrary to [8] and [11] which suggested that watermark should be spread between the most and the least significant frequency components in order to keep robustness against lossy compression or filtering processes and fidelity of the image at the same time. For our proposed watermark, the larger the pattern, the wider the range of magnitude spectrum of image is embedded. Fig. 2 shows an example of watermarked image compared with its original one using watermarking strength factor $\alpha = 0.2$.



(a) (b) (c) (d)

***Fig. 2:** (a) Original Image and (b) Its Fourier Spectrum. (c) Watermarked Image and (d) Its Fourier Spectrum.*

To yield the watermarked image $f'(x, y)$, simply apply IDFT to $F'(u, v)$

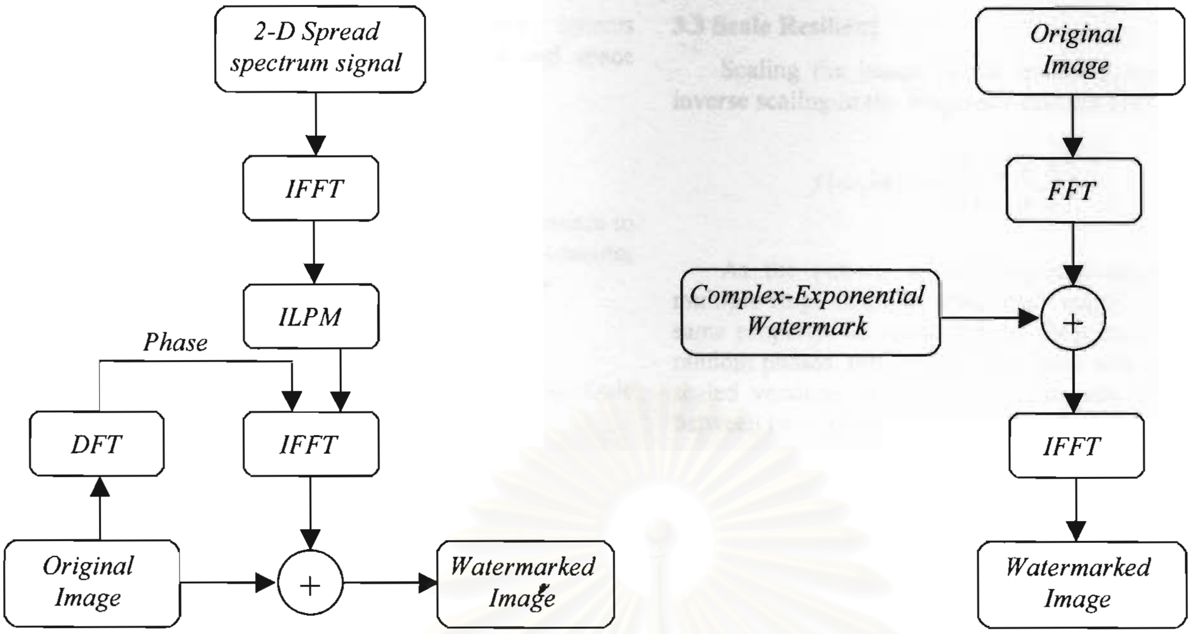
$$f'(x,y) = \text{IDFT}(F'(u,v)). \tag{5}$$

Fig. 3 compares frameworks of embedding process between LPM-based scheme (from [6]) and the proposed scheme which clearly manifests that the proposed scheme requires less computation since it does not need LPM and ILPM conversions.

Detection process for the presence of the watermark can be done without needing of original image which avoids unnecessary computation for the searching. Let $g(x, y)$ be a possibly watermarked image, we have

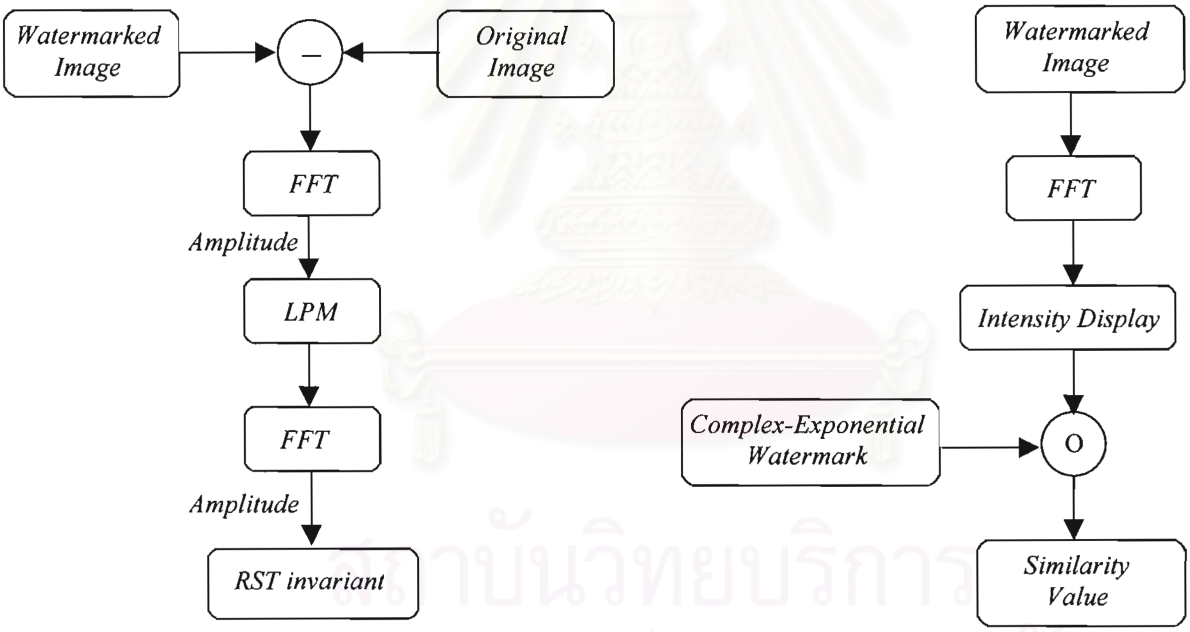
$$D(u,v) = \log(1+\left\|G(u,v)\right\|) \tag{6}$$

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a) (b)

***Fig. 3:** Frameworks of Embedding Process between (a) LPM-Based Scheme [6] and (b) the Proposed Scheme.*



(a) (b)

***Fig. 4:** Frameworks of Detection Process between (a) LPM-Based Scheme [6] and (b) the Proposed Scheme.*

as an intensity displaying function for Fourier spectra of $g(x, y)$ [14]. The watermark is detected by computing the correlation between $D(u, v)$ and the original watermark $W(x, y)$ by using similarity function [5], [15]

$$sim(D,W) = \frac{\sum_{x=u=0}^{M-1}\sum_{y=v=0}^{N-1} D(u,v)\cdot W^{*}(x,y)}{\sqrt{\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} D(u,v)\cdot D^{*}(u,v)}} \quad (7)$$

where $W^{*}(x, y)$ and $D^{*}(u, v)$ are the complex conjugates.

Assuming that $D(u, v)$ and $W(x, y)$ are independently distributed according to $N(0, 1)$ (where $N(\mu, \sigma^2)$ denotes a normal distribution with mean μ and variance σ^2), then $sim(D, W)$ will be distributed according to $N(0, 1)$. This watermark detection function follows that of [5]. The watermark is successfully detected if $sim(D, W)$ is greater than predefined threshold δ (for example, $\delta = 6$ as suggested in [5]).

Fig. 4 compares frameworks of detection process between LPM-based scheme (from [6]) and the proposed scheme. Again, it is clearly that the proposed scheme requires less complexity since it does not need LPM

conversion nor the original image that ignores unnecessary computation time of searching and space needed for keeping the image.

3. ROBUSTNESS TO GEOMETRICAL TRANSFORMATIONS

To show how the described watermark is invariant to translation and rotation, and resilient to scaling, consider the properties of the Fourier representations below.

3.1 Translation Invariant

Shifts in spatial domain do not effect the magnitude of its Fourier transform [14]

$$f(x-x_0, y-y_0) \Leftrightarrow F(u,v)\cdot e^{-j2\pi\left(\frac{ux_0+vy_0}{N}\right)} \tag{8}$$

$$\left|F(u,v)\cdot e^{j2\pi\left(\frac{ux_0+vy_0}{N}\right)}\right| = |F(u,v)|. \tag{9}$$

It is clear that spatial shifts affect only the phase components of an image, which is known as *circular translation invariant* [6].

3.2 Rotation Invariant

Rotation in the spatial domain causes the Fourier components to be rotated through the same angle in frequency domain [14]

$$f(r,\theta+\theta_0) \Leftrightarrow F(\Omega,\Phi+\theta_0) \tag{10}$$

where (Ω, Φ) is a corresponding polar-coordinate point of (u, v) in frequency domain.

For any rotated angle ε, W_ε' (r, θ) can be rewritten as

$$W_\varepsilon'(r,\theta) = e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)}. \tag{11}$$

Correlation between the original watermark W (r, θ) and the rotated one W_ε' (r, θ) is defined by

$$W(r,\theta)\circ W_\varepsilon'(r,\theta) = \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_r)}\cdot e^{j(\omega(\theta+\varepsilon)+\phi_r)}d\theta\right| \tag{12}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j(-\omega\theta-\phi_r+\omega\theta+\omega\varepsilon+\phi_r)}d\theta\right| \tag{13}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j\omega\varepsilon}d\theta\right| \tag{14}$$

$$= \left|e^{j\omega\varepsilon}(2\pi-0)\right| \tag{15}$$

$$= 2\pi. \tag{16}$$

By using standard trigonometry and the well-known Euler's formula, it can be shown that W (r, θ) $\circ$ W_ε' (r, θ) = 2π irrespectively of the rotated angle ε. This is proven that the proposed watermark gives a constant result of correlation without additional inverse rotation required.

3.3 Scale Resilient

Scaling the image in the spatial domain causes an inverse scaling in the frequency domain [14]

$$f(ax,by) \Leftrightarrow \frac{1}{|ab|}F\left(\frac{u}{a},\frac{v}{b}\right). \tag{17}$$

As the pattern of the proposed watermark has a multiple-rings shape in which each ring is constructed by same property, i.e. same angular frequency, but different random phases, this implies that inner and outer rings are scaled versions of each other. Consider the correlation between two different rings below

$$W(r_1,\theta)\circ W(r_2,\theta) = \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-j(\omega\theta+\phi_{r1})}\cdot e^{j(\omega\theta+\phi_{r2})}d\theta\right| \tag{18}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j(\omega\theta-\phi_{r1}+\omega\theta+\phi_{r2})}d\theta\right| \tag{19}$$

$$= \left|\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{j(-\phi_{r1}+\phi_{r2})}d\theta\right| \tag{20}$$

$$= \left|e^{j(\phi_{r1}+\phi_{r2})}(2\pi-0)\right| \tag{21}$$

$$= 2\pi. \tag{22}$$

By using the same derivation as that of (12-16), the result of W (r_1, θ) $\circ$ W (r_2, θ) = 2π, regardless of random phase ϕ_r. This is shown that scaling the size of the pattern does not effect the value of correlation when consider to a particular pair of rings. Thus, if the watermarked image is scaled, the original watermark does not need to be resized correspondingly to the new size of scaled image in detection. However, in practice, the new size of scaled image will differ from the original size of watermark. Therefore, if the watermarked image is enlarged, zeros must be padded to the outside of the watermark to avoid wrap-around error. In case that the image is reduced, then only center of the watermark of the corresponding size should be cropped and remained. No further sophisticated calculation is required before the similarity function. The property of such multiple-rings shape is not exactly 'invariant' to scale, but rather 'resilient'.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, we illustrate performance of the proposed scheme against translation, rotation, scaling, JPEG compression, brightness adjustment, filtering, noise adding, printing-and-scanning, watermark counterfeiting, and collision attacking. Experimental results on dominant horizontal and vertical structured images are also provided as well as the performance comparison against the original LPM-based scheme. The original image *Lena* of size 512×512 was tested using watermarking strength factor α = 0.2. The watermarked image was imperceptible without comparing to the original one (as shown in Fig. 2). The PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) of the watermarked image was 44.3799 dB.

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1 Translation

We first performed experiment with translation. The outside of the original image was padded with 100 zeros each that made the image became size 712×712. Fig. 5 (a) shows the result. The proposed watermark was constructed using (1) with size R = 356 and angular frequency ω = 32. The padded image was watermarked and then replaced with zeros again to the padded area in order to see the result of translation-invariant property. Translation experiment was performed by shifting only the image part by 100 pixels up, down, left, and right. Fig. 5 (b) shows an example of the shifted image.

(a) *(b)*

Fig. 5: *(a) Padded Original Image and (b) Translated Watermarked Version.*

Table 1 shows the similarity values obtained from each translation using (7). From the result, it is clear that translation does not effect the correlation result since the magnitude part of image is not changed.

Table 1: *Experiment on Translation.*

Translation	*Correlation*
100 pixels left & up	52.0730
100 pixels up	52.0730
100 pixels right & up	52.0730
100 pixels left	52.0730
No translation	52.0730
100 pixels right	52.0730
100 pixels left & down	52.0730
100 pixels down	52.0730
100 pixels right & down	52.0730

4.2 Rotation

Next, we performed experiment with rotation. The outside of the original image was padded with zeros to the possibly maximum size when it is rotated. In this case, the image was padded to 725×725. A second watermark was constructed with size R = 362 and ω = 32. The watermark was then embedded into the padded original image. Rotation was applied to the image at various degrees with step size of 5 degrees from 0 to 355. At each step of rotation, the image was cropped to the original padded size. This obviously removed some watermark components off. Fig. 6 shows an example of the experiment.

Fig. 6: *Cropped Rotated Watermarked Image.*

Fig. 7 shows the similarity values obtained from each rotation angle. As the result, the watermark was correctly detected at all degrees of rotation, using detection threshold δ = 6. Note that the correlation results decrease as the watermarked part was cropped larger.

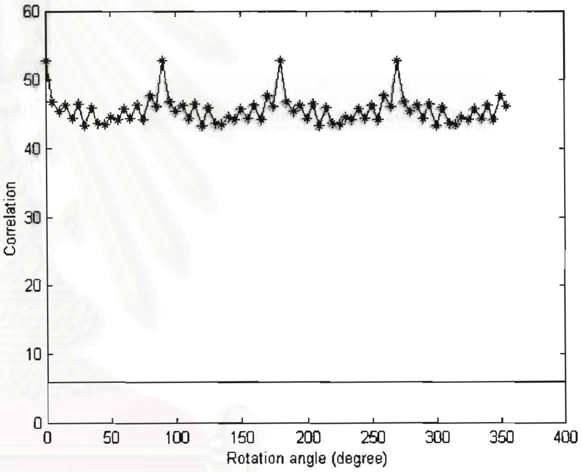


Fig. 7: *Experiment on Rotation.*

4.3 Scaling

We next performed experiment with scaling. Third watermark was constructed with size R = 256 and ω = 32 (This watermark is used in the all following experiments.) The watermark was embedded into the original image without padding. The watermarked image was then resized by different factors with step of 2.5% from 50% to 200%. The result presented in Fig. 8 shows that the watermark was successfully detected at all experimented scaling sizes. Note that the value changes up and down alternatively due to incompletely matching between rings of the original watermark and the scaled image.

4.4 JPEG Compression

We next experimented on JPEG compression. The watermarked image was compressed by quality factors at 75%, 50%, 25%, 10%, and 5%. Fig. 9 shows the result of similarity values. The watermark was still detectable although the image was severely compressed.

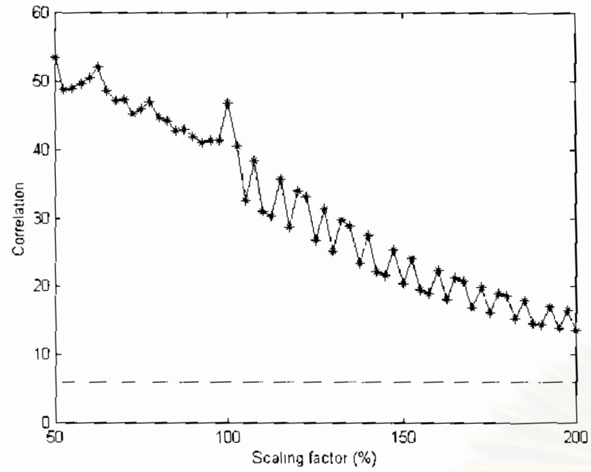


Fig. 8: Experiment on Scaling.

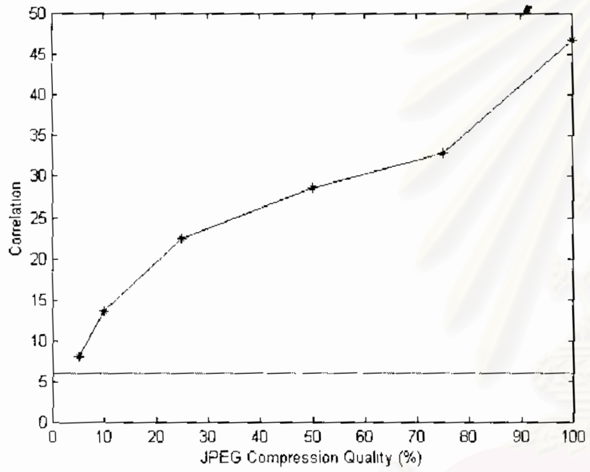


Fig. 9: Experiment on JPEG Compression.

4.5 Brightness Adjustment

We next experimented on brightness adjustment. The watermarked image was adjusted the brightness by factors from –100% to 100% with step of 10%. Fig. 10 shows the result of similarity values.

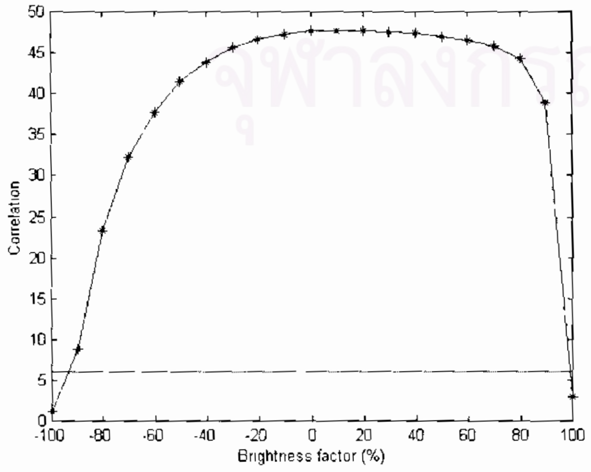


Fig. 10: Experiment on Brightness Adjustment.

4.6 Filtering

We next experimented on image filtering. The watermarked image was blurred and sharpened using different sizes of masking: 3×3, 5×5, and 7×7. Fig. 11 shows the result of similarity values.

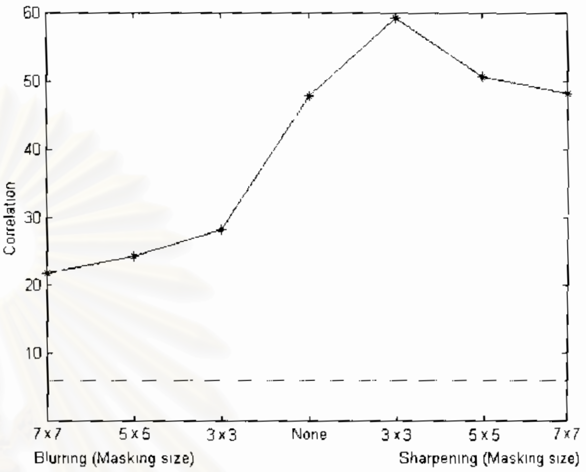


Fig. 11: Experiment on Filtering.

4.7 Noise Adding

We next experimented on noise adding. The watermarked image was added *Salt & Pepper* noise at different intensities from 10% to 100% with step of 10%. Fig. 12 shows the result of similarity values.

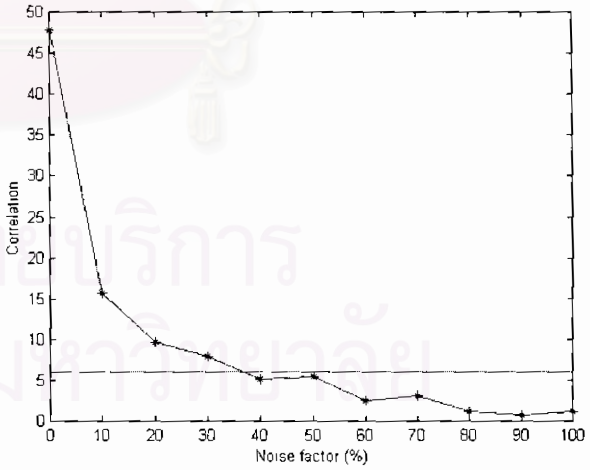


Fig. 12: Experiment on Noise Adding.

4.8 Printing and Scanning

We next experimented on printing and scanning. The watermarked image was laser printed at 1200×1200 dpi and then scanned back at 1200×1200 dpi. Fig. 13 shows result of the image. The watermark was still detected and the similarity value was 32.9223.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Fig. 13: Printed and Scanned Watermarked Image.

4.9 Watermark Counterfeiting

We next experimented on watermark counterfeiting. The watermarked image was tested for the presence of 999 uncorrelated watermarks. Fig. 14 shows the result of similarity values obtained from each watermark. Only one (true) watermark matched gives high correlation value, while the other 999 uncorrelated watermarks have the similarity values distributed between 0 and 3 according to [5].

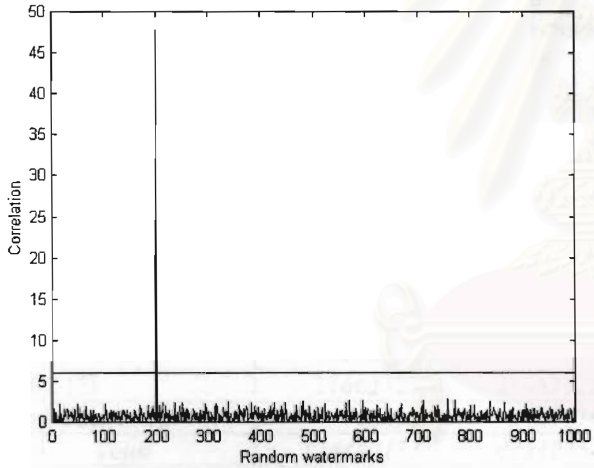


Fig. 14: Experiment on Watermark Counterfeiting.

4.10 Collision Attacking

We next experimented on collision attacking. The *original watermarked image* was re-watermarked again with another 4 different random watermarks. Detection process was then performed. All 5 watermarks were successfully detected on the final watermarked image. Table 2 shows the similarity values obtained from each watermark.

Table 2: Experiment on Collision Attacking.

Random Watermark	*Correlation*
First	45.5228
Second	44.6738
Third	43.8915
Fourth	45.6696
Fifth	44.3965

Although all 4 versions of *fake* watermarks are successfully detected on the final multi-watermarked image, but in fact there is only one version of watermarked image that contains only the first (true) watermark. In this case, therefore, the genuine owner can prove his true ownership by showing the first watermarked image version that contains no other watermarks.

4.11 Perceptibility Measuring

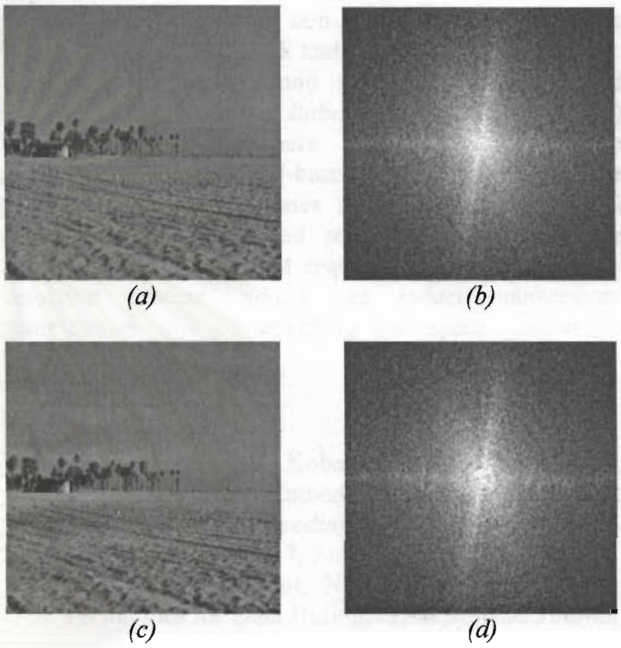


Fig. 15: *(a) Image with Dominant Structure in Horizon and (b) Its Fourier Spectrum.*
(c)The Watermarked Image and (d) Its Fourier Spectrum.

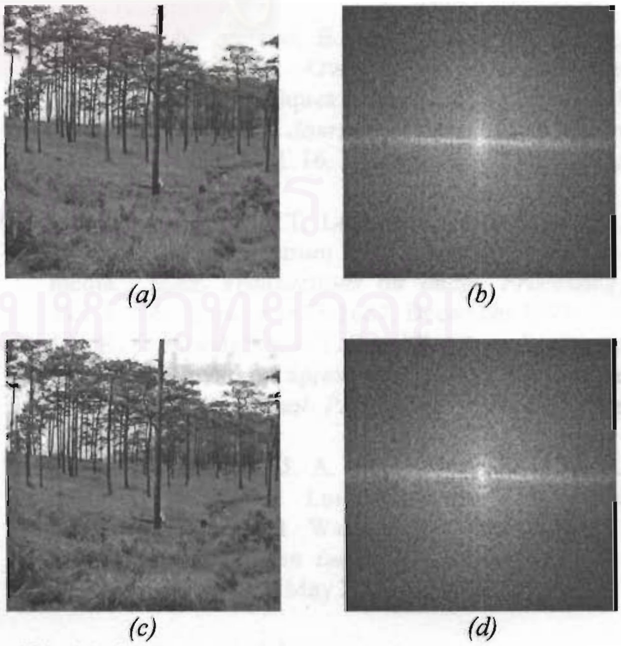


Fig. 16: *(a) Image with Dominant Structure in Vertical and (b) Its Fourier Spectrum.*
(c)The Watermarked Image and (d) Its Fourier Spectrum.

We also performed measurement on perceptibility against specific structures of image. Images with a particular structure usually have a large amount of energy in one group of directions while having much lower energy in an orthogonal way [7]. In this experiment, a dominant horizontal structured image *Beach* of size 512×512 (Fig. 15) and a dominant vertical structured image *Timberland* of size 512×512 (Fig. 16) were tested using watermarking strength factor α = 0.2. Both watermarked images were a little noticeable. The PSNR of Fig. 15 was 33.93 and was 31.80 in Fig. 16.Correlation values at no transformation taken were 34.81 and 37.27, respectively. However, to compensate the quality of the watermarked image, the watermarking strength factor can be slightly decreased in order to improve the value of PSNR.

4.12 Performance Comparison

Finally, we measured performance of the proposed scheme against the original LPM-based scheme as proposed in [6]. Table 3 and 4 compare the number of Floating Point Operations (FLOPs) performed on a gray-scale image *Lena* of size 512×512 at each step of embedding and detection processes, respectively, of both schemes. Note that Bicubic Interpolation was used in both LPM and ILPM, and the number of *random watermark* for the original LPM-based scheme was 262144 (same number as the proposed scheme's).

***Table 3:** Number of FLOPs of Embedding Process.*

Step	*The original LPM-based scheme*	*The proposed scheme*
FFT	20089856	20089856
IFFT (1)	21662722	-
ILPM	60278401	-
IFFT (2)	21662722	21662722
Add watermark	786432	5767176
Total	*124480133*	*47519754*

***Table 4:** Number of FLOPs of Detection Process.*

Step	*The original LPM-based scheme*	*The proposed scheme*
FFT (1)	20089856	20089856
Intensity Display	-	1572868
LPM	58760305	-
FFT (2)	20089856	-
Correlation	4194320	2622987
Total	*103134337*	*24285711*

From the result, it is proven that the proposed scheme requires much less computation than the original LPM-based scheme. This advantage conquers limitation in practical implementation of those LPM-based schemes.

5. CONCLUSION

In this paper, we proposed a novel digital watermarking scheme that is invariant to rotation and translation, and also resilient to scaling. The described scheme has circular shape with multiple rings constructed by exploiting complex exponential formula. Experimental results shown in Section 4 demonstrate performance of the watermark that is robust to translation, rotation, and reasonable range of scaling. The watermark was correctly detected without inverse transformation or original image required. The watermark is also robust to JPEG compression as well as other non-geometric transformations including subterfuge attack and watermark counterfeiting. Similar results were found on other standard tested images (e.g. *Cameraman*, *Baboon*, *Peppers*, for example) but are not reported here. Performance comparison against the original LPM-based scheme shows that the proposed scheme consumes much less computational complexity. The proposed scheme also profits more advantage that it does not require the original image in detection process, which can reduce unnecessary computation time of searching and space needed for keeping the image.

6. REFERENCES

[1] M. Swanson, M. Kobayashi, and A. Tewfik, "Multimedia Data-Embedding and Watermarking Technologies," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 6, page 1064-1087, June 1998.

[2] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu, "Techniques for Data Hiding," *IBM Systems Journal*, Vol. 35, NOS 3&4, 1996.

[3] F. A. P. Petitcolas, R. J. Anderson, and M. G. Kuhn, "Attacks on Copyright Marking Systems," *Second Workshop on Information Hiding*, Vol. 1525, page 218-238, April 1998.

[4] S. Craver, N. Memon, B. L. Yeo, and M. Yeung, "Resolving Rightful Ownerships with Invisible Watermarking Techniques: Limitations, Attacks, and Implications," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol. 16, No. 4, page 573-586, May 1998.

[5] I. J. Cox, J. Kiliant, T. Leighton, and T. Shamoon, "Secure Spread Spectrum Watermarking For Multi-media," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 6, No. 12, page 1673-1687, December 1997.

[6] J. J. K. O'Ruanaidh and T. Pun, "Rotation, Scale and Translation Invariant Spread Spectrum Digital Image Watermarking," *Signal Processing*, Vol. 66, page 303-317, 1998.

[7] C. Y. Lin, M. Wu, J. A. Bloom, I. J. Cox, M. L. Miller, and Y. M. Lui, "Rotation, Scale, and Translation Resilient Watermarking for Images," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 10, No. 5, page 767-782, May 2001.

[8] D. Zheng, J. Zhao, and A. E. Saddik, "RST-Invariant Digital Image Watermarking Based on Log-Polar Mapping and Phase Correlation," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 13, No. 8, page 753-765, August 2003.

[9] D. Zheng and J. Zhao, "LPM-based RST Invariant Digital Image Watermarking," *Proceedings of IEEE Canada Conference of Electrical and Computer Engineering*, Montreal, Canada, page 1951-1954, May 2003.

[10] D. Zheng and J. Zhao, "RST Invariant Digital Image Watermarking: Importance of Phase Information," *Proceedings of IEEE Canada Conference of Electrical and Computer Engineering*, Montreal, Canada, page 785-788, May 2003.

[11] V. Solachidis and I. Pitas, "Circularly Symmetric Watermark Embedding in 2-D DFT Domain," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 10, No. 11, page 1741-1753, November 2001.

[12] N. Chotikakamthorn and S. Pholsomboon, "Ring-Shaped Digital Watermark for Rotated and Scaled Images Using Random-Phase Sinusoidal Function," *IEEE Region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology*, page 321-325, August 2001.

[13] S. Pholsomboon, *Digital Watermarking Technique for Rotated and Scaled Image*, Faculty of Information Technology Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2001.

[14] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Prentice-Hall, NJ, 2002.

[15] M. L. Miller and J. A. Bloom, "Computing the Probability of False Watermark Detection," *Proceedings of the Workshop on Information Hiding*, Dresden, Germany, 1999.

Siriporn Pholsomboon was born in Bangkok, Thailand, in 1977. She received the B.S. degree in computer science from Ramkhamhaeng University in 1995. She was with Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT) and received the M.S. degree in information technology from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) in 2000. She is currently pursuing the Ph.D. degree in Computer Engineering at Chulalongkorn University where she has joined Digital System Engineering Laboratory (DSEL) since 2002. Her research interests include digital image processing, data hiding, digital watermarking, and information security.

Sartid Vongpradhip was born in Bangkok, Thailand, in 1954. He received his Bachelor degree (honors) in Electrical and Electronic Engineering from Newcastle Upon Tyne Polytechnic in 1979 and Master degree in Electronics Engineering from King's College University of London in 1981. He became a lecturer at the Department of Computer Engineering, Chulalongkorn University in 1983. He received a scholarship from Chulalongkorn University, in 1990, to continue his study in Digital System Engineering at The University of Technology Sydney, Australia, and received his Ph.D. in 1994. Now he is an Associate Professor at the Department of Computer Engineering, Chulalongkorn University. His research interests include fault tolerant computing, hardware testing, information security and hiding, and digital watermarking.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

สิริพร ผลสมบูรณ์ เกิดวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520 ในจังหวัดกรุงเทพมหานครฯ เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิตที่มหาวิทยาลัยรามคำแหง สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ในปี 2536 และสำเร็จการศึกษาในปี 2538 ได้รับการประดับยศ ว่าที่ ร้อยตรี หญิง โดยกองทัพบกในปี 2540

ผู้เขียนเข้าศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตในปี 2540 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นนักวิจัยประจำโครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)) ได้รับทุนการศึกษาจากกองทุนคุณจันทร์พร พิศาลบุตร ในเดือนมกราคม 2542, ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย ในเดือนมกราคม 2543, และทุนงบประมาณจากสถาบันฯ ในเดือนสิงหาคม 2543 ก่อนจะสำเร็จการศึกษาสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศในปี 2543

ในปี 2545 ผู้เขียนเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับทุนจากกองทุน Toshiba International Foundation (TIFO) เพื่อไปศึกษางานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่น ในระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ ถึง มีนาคม 2546

ผู้เขียนเคยทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ระบบคอมพิวเตอร์ ที่บริษัท First Pacific Media (Thailand) จำกัด ระหว่างเดือนกันยายน 2539 ถึง เดือนมีนาคม 2540 และตำแหน่งเจ้าหน้าที่สารสนเทศ ที่ Bank of Tokyo-Mitsubishi สาขากรุงเทพฯ ในเดือนมิถุนายน 2544 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย