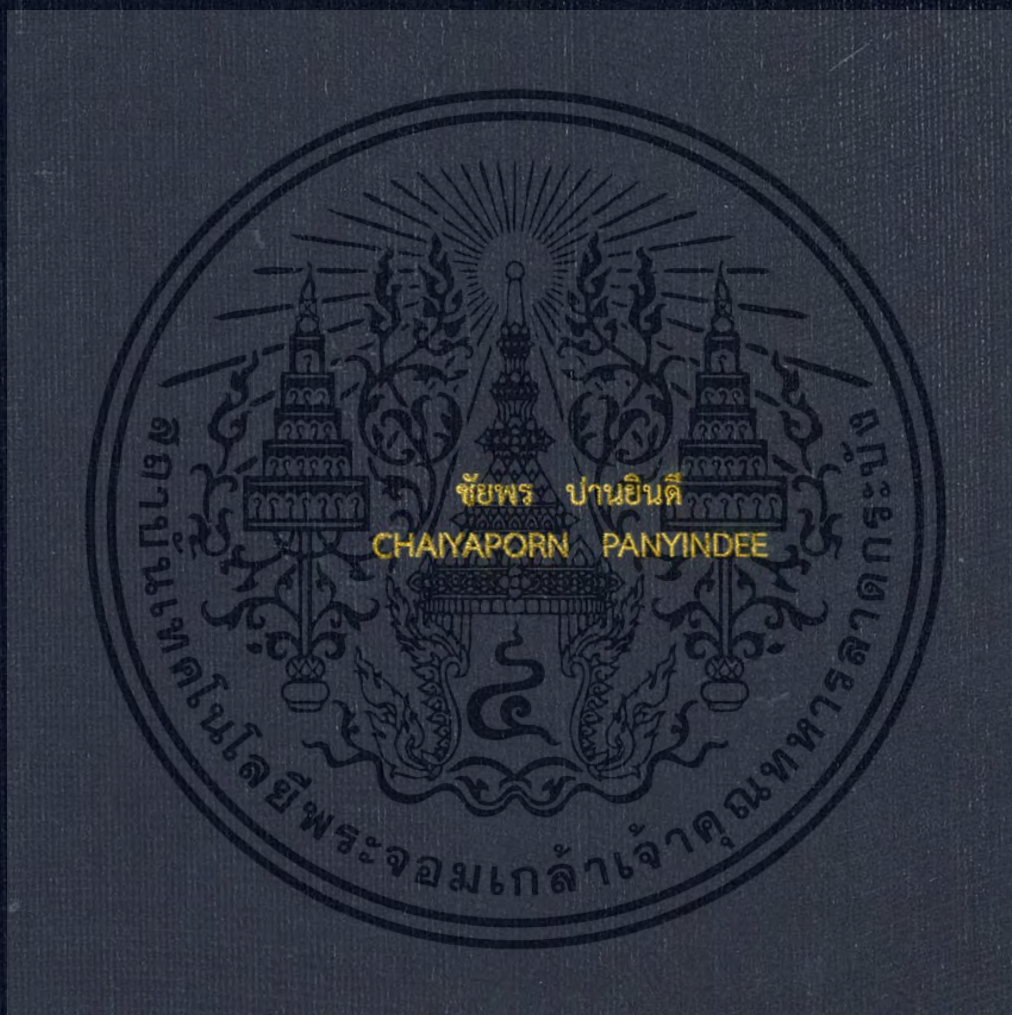


การทำนายเกาส์เขียนแบบถ่วงน้ำหนัก และการเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับกระบวนการฝังลายน้ำ

GAUSSIAN WEIGHT PREDICTOR AND SORTING USING GENETIC
ALGORITHM FOR WATERMARKING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-D-018-183

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำนายเกาส์เขียนแบบถ่วงน้ำหนัก และการเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับกระบวนการฝังลายน้ำ

GAUSSIAN WEIGHT PREDICTOR AND SORTING USING GENETIC
ALGORITHM FOR WATERMARKING



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148738**
ในเดือนปี **23** พ.ย. 2559

b. 00265364
.....
.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GAUSSIAN WEIGHT PREDICTOR AND SORTING USING GENETIC
ALGORITHM FOR WATERMARKING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-EN-D-018-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก และการเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้ขั้นตอนวิธี
เชิงพันธุกรรมสำหรับกระบวนการฝังลายน้ำ

Thesis Title Gaussian Weight Predictor and Sorting using Genetic Algorithm for
Watermarking

นักศึกษา นายชัยพร ปานยินดี






รหัสประจำตัว 54610145

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

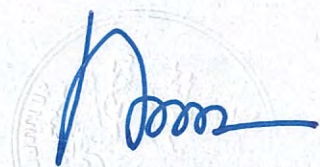
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-183

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย	
ผศ.ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น	
รศ.ดร.มนัส สัจวรศิลป์	
รศ.ดร.สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์	
รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559

Thesis Title	GAUSSIAN WEIGHT PREDICTOR AND SORTING USING GENETIC ALGORITHM FOR WATERMARKING
Student	Mr. Chaiyaporn Panyindee
Student ID.	54610145
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Chuchart Pintavirooj

ABSTRACT

This thesis proposes a reversible watermarking scheme. A high performance reversible watermarking technique is proposed. The proposed technique which involves adaptable predictor and sorting parameter to suit each image and each payload in order to get lowest image distortion. Our method relies on a well-known prediction error expansion (PEE) technique and histogram shifting (HS). Using small prediction error values and a harmonious PE, sorting parameter greatly decreases image distortion. In order to exploit adaptable tools, Gaussian weight predictor and expanded variance mean (EVM) are used as parameters. A genetic algorithm is applied to optimize all parameters for the best possible results. Our results show an improvement in image quality when compared with previous conventional works.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ และบุคคลหลายท่าน ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ ปิณฑวิรุจน์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณา อบรม และฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถและมีระเบียบวินัยในการทำงานวิจัย รวมทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้กับผู้เขียนให้สามารถเป็นนักวิจัยที่ดี ตลอดจนสั่งสอนให้แนวความคิดต่างๆในการดำเนินชีวิต ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.มนัส สังวรศิลป์ คณะวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต ผู้ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ ในเรื่องของงานวิจัย และรองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ แก่ผู้เขียน ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งคำสอนอันมีค่าแก่ผู้เขียนเสมอมา

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยประมวลผลสัญญาณ, ภาพ และระบบทางชีวการแพทย์ (Biomedical Signal, Image and System Laboratory: BIOSIS Lab) ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้อง ในห้อง BIOSIS Lab ทุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษาช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้อง สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวของผู้เขียน ที่ให้ความห่วงใย ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บุคคลทุกคนที่มีได้เอย่ยนามา ณ ที่นี้ ที่ได้ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจแก่ผู้เขียนตลอดมา

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชัยพร ปานยินดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 สมมติฐานของการศึกษาวิจัย.....	6
1.4 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	7
1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับ กลับคืนได้.....	9
2.1 เทคนิคการขยายค่าความแตกต่าง (Difference Expansion: DE) [4].....	9
2.2 เหตุผลของการใช้ตัวทำนาย Rhombus [21]-[23].....	11
2.3 การใช้รูปแบบการเลื่อนฮิสโตแกรม (HS) ของ [23].....	14
2.4 ค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม (Appropriate Threshold Values) [23].....	19
2.5 การใช้การเรียงลำดับข้อมูล (Data Sorting) [8], [23], [26]-[27].....	19
2.6 เทคนิคการเฉลี่ยค่าความแปรปรวนที่สามารถขยายได้ (EVM) [42].....	20
2.7 ปัญหา Overflow และ Underflow [11], [21], [23], [26]-[27].....	24
2.8 รูปแบบการฝังแบบดับเบิล (Double Embedding Scheme) [8], [11]-[12] และ [23].....	27
2.9 การเข้ารหัส และการถอดรหัส (Encoder and Decoder) [23].....	28
2.10 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [43].....	30
บทที่ 3 วิธีการที่นำเสนอ.....	34
3.1 ตัวทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก (Gaussian Weight Predictor).....	34
3.2 การประยุกต์ใช้เทคนิค EVM [42] สำหรับการเรียงลำดับข้อมูล.....	37
3.3 การทดสอบสถานะของพิกเซลโดยใช้การโมดิไฟล์แบบดับเบิล (DMT) [23].....	39
3.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม (Threshold Optimization).....	48
3.5 การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) สำหรับการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในรูปของต้นฉบับเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อยู่ภายใต้การคุ้มครองลิขสิทธิ์ใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

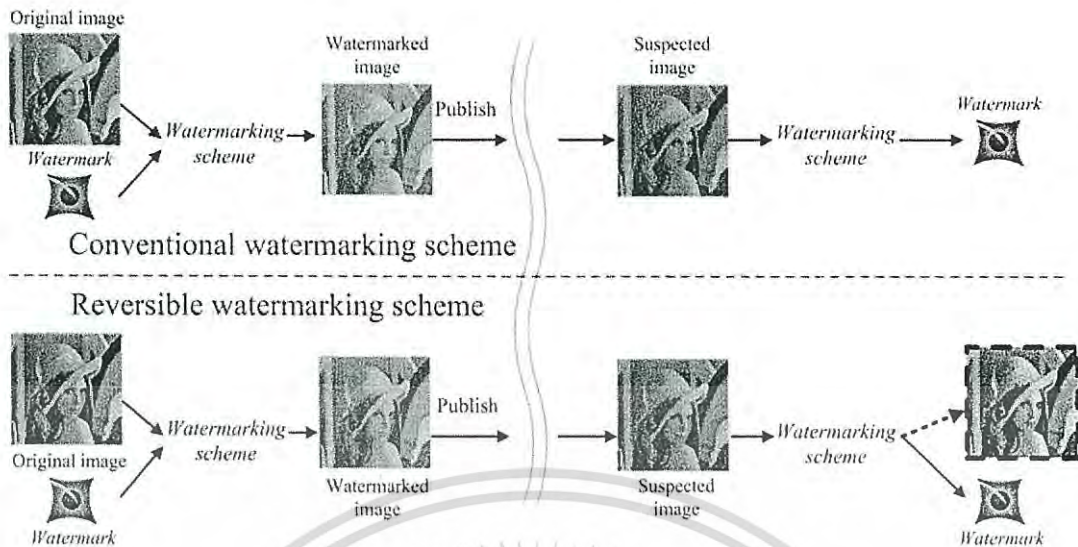
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

คำว่า “ลายน้ำ” (Watermark) มาจากการสร้างลายน้ำในกระดาษ คาดการณ์ว่าถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1282 [1] ในอุตสาหกรรมกระดาษที่เมืองโบโลญา ประเทศประเทศอิตาลี ในช่วงแรกลายน้ำถูกทำเป็นเครื่องหมาย โดยใส่ลายเส้นบาง ๆ ลงที่แม่พิมพ์ของกระดาษ แผ่นกระดาษจึงเกิดเป็นแถบเส้นบาง ๆ ที่มีความโปร่งใส จุดประสงค์ของการทำลายน้ำในอดีตไม่เป็นที่แน่ชัด โดยคาดการณ์ว่าลายน้ำอาจถูกนำมาใช้เพื่อพิสูจน์แม่พิมพ์กระดาษว่าเป็นเครื่องเดียวกับแผ่นกระดาษที่ทำขึ้น หรือ ใช้เป็นเครื่องหมายทางการค้าของผู้ทำกระดาษแผ่นนั้น วัตถุประสงค์อื่น ๆ ของลายน้ำอาจนำมาใช้เพื่อแสดงสัญลักษณ์พิเศษ หรือ เพื่อประทับบนแผ่นกระดาษก็ได้เช่นกัน แนวคิดในการสร้างลายน้ำดิจิทัล คือ การฝังข้อมูลที่ไม่สามารถตรวจรู้ได้แบบทันทีทันใดโดยประสาทสัมผัสของมนุษย์ลงในสื่อมัลติมีเดีย เช่น เสียง รูปภาพ หรือ วิดีโอ เป็นต้น ข้อมูลที่ฝังจะเรียกว่า “ลายน้ำดิจิทัล (Digital Watermarking)” ดังนั้น เมื่อมีการสำเนาสื่อ ลายน้ำจะติดไปพร้อมกับสื่อเหล่านั้น ประเภทของการฝังลายน้ำดิจิทัลมีทั้งแบบที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible Watermarking) และแบบที่ไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Invisible Watermarking)

งานตีพิมพ์แรกของการฝังลายน้ำดิจิทัลถูกพบในปี ค.ศ. 1993 โดย Tirkel และคณะ [2] งานของพวกเขาเริ่มต้นแนวคิดการฝังข้อมูลลงในภาพ และยังคงสามารถกู้คืนข้อมูลกลับได้ โดยทั่วไปเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในสื่อประเภทรูปภาพมีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค แต่ไม่ใช่ทุกเทคนิคจะสามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนมาได้ จากอดีตสู่ปัจจุบันการฝังลายน้ำดิจิทัลถูกจำแนกออกเป็น 2 ประเภท [3] (แสดงในรูป 1.1 ด้านบน) ประเภทแรก คือ กระบวนการการฝังลายน้ำที่ไม่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ หรืออีกในหนึ่ง คือ สามารถกู้คืนได้เฉพาะลายน้ำ ประเภทที่สองในรูปเดียวกัน ด้านล่างแสดงกระบวนการการฝังลายน้ำที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับ และลายน้ำที่ถูกฝังกลับคืนได้แบบไม่มี การสูญเสีย ในอดีตที่ผ่านมาเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลส่วนใหญ่อยู่บนพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) ซึ่งในกระบวนการจะมีการโจมตีภาพในลักษณะต่าง ๆ อาทิเช่น การบีบอัดภาพ การตัดบางส่วนของภาพออก การเลื่อนภาพ การหมุนภาพ การย่อขยายภาพ เป็นต้น เพื่อดูประสิทธิภาพความคงทนของลายน้ำ วิธีการดังกล่าวนี้ไม่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับงานบางประเภท ภาพต้นฉบับถือว่าเป็นสิ่งจำเป็น และไม่สามารถสูญเสียได้ อาทิเช่น งานทางการแพทย์ งานทางความมั่นคง เป็นต้น โดยทั่วไปภาพทางการแพทย์นั้นมักมีการฝัง หรือ ระบุข้อมูลบางอย่างของผู้ป่วยลงในภาพ เช่น ชื่อ นามสกุล ประวัติการรักษาของผู้ป่วย และอื่น ๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นต่อการวางแผนการรักษา และไม่สามารถเปิดเผยได้ เนื่องด้วยจรรยาบรรณทางวิชาชีพ ข้อมูลจะถูกปกปิด และป้องกันสำหรับคนภายนอกในการเข้าถึง เป็นที่ทราบกันดีว่าภาพต้นฉบับทางการแพทย์ไม่ต้องการ การสูญเสีย บิดเบือน หรือทำให้เกิดอย่างใดอย่างหนึ่งไม่ว่าจะด้วยเหตุใดก็ตาม หากภาพถูกบิดเบือนไปจากต้นฉบับของเดิมอาจก่อให้เกิดโอกาสความผิดพลาดในการวินิจฉัย และอาจหมายถึงชีวิต เช่นเดียวกับงานทางด้านความมั่นคง ข้อมูลลับถือว่าเป็นสิ่งสำคัญไม่สามารถเปิดเผยได้ ตัวอย่างเช่น ภาพลึกลับของหน่วยข่าวกรองที่พดัดรูระยะไกลผ่านดาวเทียม ตำแหน่ง-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการฝังลายน้ำแบบดั้งเดิม และแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ [3]

พิกัดของเป้าหมาย ชนิดของอาวุธยุทธโศปกรณ์ จำนวนทหาร ข้อความลับ เป็นต้น ข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องส่งกลับไปยังฐานทัพ และต้องถูกปกป้องไม่ให้เข้าถึงโดยบุคคลทั่วไป ซึ่งรวมถึงฝ่ายตรงข้าม ในระหว่างการส่ง รายละเอียดของภาพต้นฉบับเดิมยังคงเป็นสิ่งจำเป็น และมีอาจให้เกิดการสูญเสียได้ หากข้อมูลที่ได้รับเหล่านั้นเกิดการเสียหาย ผู้รับสารอาจตีความหมายผิดพลาด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกำลังพล และ หรือภารกิจของพวกเขาเหล่านั้น เพื่อตอบโจทยกับงานดังกล่าวนี้ การฝังลายน้ำแบบกู้ภาพต้นฉบับกลับคืน (Reversible Watermarking) ได้จึงถูกนำเสนอ หนึ่งในความท้าทายสำคัญสำหรับนักวิจัยกลุ่มนี้ คือ ต้องการหาวิธีการที่สามารถฝังข้อมูลได้เป็นจำนวนมากลงในภาพ แต่ยังคงให้ภาพนั้นมีความบิดเบือนต่ำ ซึ่งมันดูขัดแย้ง โดยทั่วไป ผลลัพธ์ของการฝังที่ความจุสูง ๆ ย่อมก่อให้เกิดการบิดเบือนที่สูงตาม อย่างไรก็ตาม กระบวนการยังคงต้องอยู่บนเงื่อนไขของการกู้คืนกลับได้ของภาพต้นฉบับ และข้อมูลที่ถูกฝัง

หนึ่งเทคนิคที่สำคัญ และมีอิทธิพลต่องานสมัยใหม่ คือ การขยายค่าความแตกต่าง (Difference Expansion: DE) ของ Tian [4] กระบวนการของพวกเขาให้ความจุในการฝังสูง และคุณภาพของภาพหลังการฝังถูกบิดเบือนต่ำ เทคนิคของพวกเขาแบ่งพิกเซลในภาพออกเป็นคู่ ๆ ในแต่ละคู่จะใช้สำหรับการซ่อน หรือ ฝังข้อมูล 1 บิต ดังนั้น ความจุสำหรับการฝังที่ดีที่สุดของพวกเขา อยู่ที่ 0.5 บิต/พิกเซล อย่างไรก็ตาม ขนาดของพื้นที่แมป (Location Map: LM) ที่ยังไม่ถูกบีบอัดในของงานพวกเขามีขนาดเท่ากับ 0.5 บิต/พิกเซล เช่นกัน ดังนั้น การลดขนาดของพื้นที่แมปถือเป็นอีกหนึ่งเป้าหมายในงานด้านนี้ การปราศจากพื้นที่แมป ผู้ถอดรหัสจะไม่สามารถกู้คืนข้อมูล (ข้อมูลในที่นี้ คือ ต้นฉบับภาพ และลายน้ำที่ถูกฝัง) ได้อย่างแน่นอน เนื่องจากผู้ถอดจะไม่สามารถทราบตำแหน่งเดิมมีการโมดิไฟล์ (การโมดิไฟล์ คือ พิกเซลถูกขยาย หรือ ฝังบิต) และตำแหน่งใดไม่ถูกโมดิไฟล์ พื้นที่แมปประกอบด้วยสถานะ 0 และ 1 วัตถุประสงค์ที่ค่าสถานะแตกต่างกันนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการ ซึ่งถูกออกแบบอย่างเฉพาะเจาะจง เทคนิค DE ได้บรรลุเป้าหมายของกระบวนการฝังข้อมูลแบบกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ ซึ่งถือว่าเป็นรากฐานสำคัญสำหรับแนวความคิดใหม่ เช่น เทคนิคของ Alattar สำหรับ

ขยายคู่พิกเซลเป็นสามพิกเซล และสี่พิกเซลต่อหนึ่งเซลล์ [4]-[6] และวิธีการของ Kamstra และ Heijmans [8] เป็นต้น

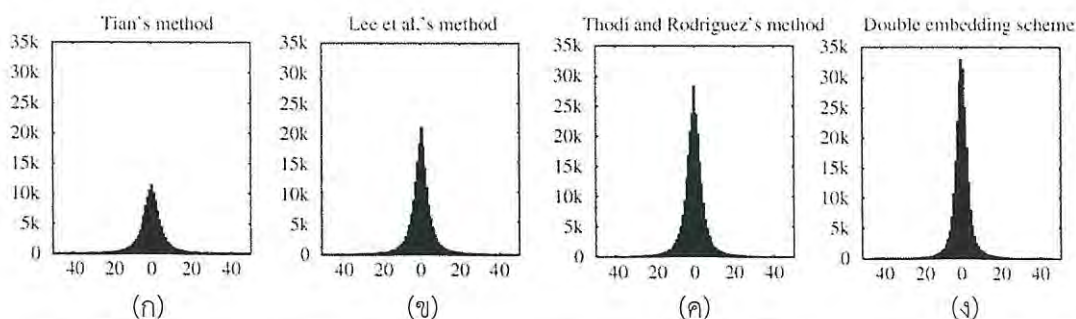
Alattar และคณะ มีการขยายเซลล์จากหนึ่งคู่พิกเซลเป็นสามพิกเซล (Triplet) [4] และสี่พิกเซล (Quad) [5] เพื่อซ่อนข้อมูลสอง หรือ สามบิตต่อหนึ่งเซลล์ตามลำดับ หรือ ไม่ซ่อนเลยในเซลล์ที่มีปัญหา หนึ่งเซลล์ คือ หน่วยของหลายพิกเซลประกอบกันซึ่งข้อมูลจะถูกฝัง พื้นที่แม่ของ Alattar ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของสามพิกเซล หรือ สี่พิกเซล แทนคู่พิกเซลเดิม ดังนั้นขนาดของพื้นที่แม่ที่ยังไม่ถูกบีบอัดจะมีขนาดลดลงจากหนึ่งเหลือเพียงครึ่งเดียวของความละเอียดภาพ (สำหรับเทคนิคของ Tian) และหนึ่งในสาม หรือ หนึ่งในสี่ของความละเอียดภาพ (สำหรับสามพิกเซล หรือ สี่พิกเซล) ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าวิธีการของ Alattar ดีกว่างานของ Tian เนื่องจากสามารถซ่อนข้อมูลได้ถึงแม้ว่าพื้นที่แม่ไม่ถูกบีบอัดก็ตาม โดยที่สถานการณ์ดังกล่าวนี้เป็นไปไม่ได้สำหรับงานของ Tian ถ้าพื้นที่แม่ถูกบีบอัด วิธีการของ Alattar ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับงานของ Tian ในภายหลัง Alattar ยังคงใช้แนวความคิดเดิมของพวกเขาสำหรับหนึ่งเซลล์กับ n พิกเซล [6]

Kamstra และ Heijmans [8] ปรับปรุงวิธี DE ของ Tian พวกเขาแนะนำเสนอหนึ่งวิธีการเพื่อลดขนาดของพื้นที่แม่ โดยใช้การเรียงลำดับของคู่พิกเซลตามค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการบีบอัด แนวคิดหลักของงานนี้ คือ การใช้ประโยชน์อย่างมีนัยยะจากค่าสหสัมพันธ์ระหว่างพิกเซลข้างเคียงกับตัวมัน เพื่อเรียงลำดับค่าความแตกต่างของคู่พิกเซล ค่าความแตกต่างของคู่พิกเซลข้างเคียงในหนึ่งเซลล์ (โดยที่หนึ่งเซลล์ คือ หนึ่งคู่พิกเซลในงานของพวกเขา) มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของคู่พิกเซลที่อยู่ติดกัน การเรียงลำดับโดยใช้ประโยชน์ของค่าสหสัมพันธ์ระหว่างคู่พิกเซลข้างเคียงยังเพิ่มขีดความสามารถสำหรับความจุในการฝังของวิธีการ DE วิธีการของพวกเขาประสบความสำเร็จที่สุดในบรรดาขั้นตอนวิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

พื้นที่แม่ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับทุกวิธีการที่อธิบายไว้ใน [4]-[7] และ [8], พื้นที่แม่มักจะมีขนาดใหญ่ และควรถูกบีบอัดเพื่อลดขนาด ถึงแม้ว่าถ้าพื้นที่แม่จะถูกบีบอัด พื้นที่แม่เหล่านั้นยังคงต้องเป็นส่วนหนึ่งของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง (Payload) ดังนั้นขนาดพื้นที่แม่ที่ถูกบีบอัดจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของวิธีการ เทคนิคของการฝังข้อมูลแบบกู่ตันฉบับกลับคืนได้นั้น พื้นที่แม่ขนาดเล็ก หรือ บางกรณีไม่พบ (เช่นใน [9] และ [11]) เป็นสิ่งที่พึงต้องการ

Lee และคณะ [12] นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำที่เหนือชั้นกว่าซึ่งอยู่บนพื้นฐานการแปลงเวฟเล็ต integer-to-integer วิธีการของพวกเขาแบ่งภาพออกเป็นบล็อก แต่ละบล็อกไม่ซ้อนทับกัน และประยุกต์ใช้หนึ่งเทคนิคของการซ่อนข้อมูลซึ่งอยู่บนพื้นฐานนิยามของ DE (ซึ่งหมายถึงหนึ่งความเป็นไปได้ของการเลื่อนบิต (Bit Shifting)) และความคลุมเครือในช่วงสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตความถี่สูง (High-Frequency Wavelet Coefficients) ของแต่ละบล็อก วิธีการเลื่อนบิต (Bit-Shifting) ถูกใช้สำหรับการฝังข้อมูล และบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (Least Significant Bit: LSB) ถูกแทนที่วิธีการสำหรับการซ่อนพื้นที่แม่ บล็อกที่ถูกขยาย และที่ไม่ถูกขยายถูกทำเครื่องหมายแสดงสถานะที่แตกต่างกัน คือ 1 และ 0 ตามลำดับ บล็อกทั้งหมด คือ $(X/N) \times (Y/M)$, โดยที่ N และ M คือ ขนาดของบล็อก และ X และ Y คือ ขนาดของภาพ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายสำหรับความเป็นไปได้ในการกู้คืนต้นฉบับ วิธีการของพวกเขาต้องการ พื้นที่แม่, เมทริกการขยาย P (Expansion Matrix P) และต้นฉบับ LSB ของสัมประสิทธิ์จากบล็อกที่บรรจุพื้นที่แม่ เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการของ [5], [13]-[15] โดยใช้ประโยชน์จากซับแบนความถี่สูง (High-Frequency Subbands) และเทคนิคการฝังข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบฮิสโตแกรมใน 4 รูปแบบของวิธีการสำหรับภาพ Lena [23]

- (ก) ฮิสโตแกรมของค่าความแตกต่างระหว่างพิกเซลข้างเคียง
- (ข) ฮิสโตแกรมของค่าสัมประสิทธิ์เวปเล็ดความถี่
- (ค) ฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย JPEG-LS
- (ง) ฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสำหรับรูปแบบการฝังแบบดับเบิล

Thodi และ Rodriguez [10]-[11] นำเสนอวิธีการเลื่อนฮิสโตแกรม (HS) สำหรับการฝังข้อมูลลงในค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนาย พื้นที่แมป (หรือ Flag บิต) ถูกใช้สำหรับกระบวนการเหล่านี้ ครอบคลุมเซลล์ทั้งหมดที่เป็นไปได้รวมถึงเซลล์ที่คลุมเครือ เซลล์ที่คลุมเครือถูกรวมกับทุกเซลล์ ซึ่งจะไม่สามารถกู้คืนข้อมูลได้ถ้าปราศจากพื้นที่แมป บริเวณที่คลุมเครือมักจะเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการซ้อนทับระหว่างค่าที่ถูกขยาย หรือ ค่าที่ถูกเลื่อน สำหรับการฝังหนึ่งครั้ง และค่าที่ไม่ได้ถูกขยาย หรือ ค่าที่ไม่ถูกเลื่อน บางครั้งค่าจะไม่ถูกขยาย หรือ ไม่ถูกเลื่อน ตามความเป็นไปได้ของค่าความผิดพลาด Underflow/Overflow ในปี ค.ศ. 2007 Thodi และ Rodriguez [11] นำเสนอวิธีการที่เหนือชั้น โดยกระบวนการของพวกเขาอยู่บนพื้นฐานของเทคนิค DE วิธีการของพวกเขาใช้ประโยชน์จากเทคนิคการเลื่อนฮิสโตแกรมสำหรับการฝังข้อมูล ซึ่งการรวมกันระหว่างวิธี DE [4] และการโมดิไฟ์ของวิธีการเลื่อนฮิสโตแกรมต้นฉบับ [16] วิธีการการเลื่อนฮิสโตแกรมอย่างละเอียดถูกอธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2 ผลงานอีกหนึ่งของพวกเขา [11] คือ การใช้ตัวทำนาย JPEG-LS หนึ่งในสัญญาณอินพุตสำหรับรูปแบบการฝังนี้ ค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแตกต่าง [4]-[6], [8] ค่าสหสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนายสำหรับ JPEG-LS สูงกว่าค่าความแตกต่างระหว่างพื้นที่ข้างเคียง ดังนั้น ฮิสโตแกรมของค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนาย จึงมีความน่าจะเป็นของบิตเป็นศูนย์สูงกว่างานอื่น ๆ ในขณะที่ค่าความน่าจะเป็นของบิตอื่น ๆ จะต่ำลงอย่างรวดเร็ว (แสดงในรูปที่ 1.2) การใช้วิธีการเลื่อนฮิสโตแกรมทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความบิดเบือนต่ำสุดโดยเฉพาะสำหรับฮิสโตแกรมลักษณะนี้ ความจุที่เป็นไปได้สูงสุดสำหรับวิธีการของพวกเขาอยู่ที่ 1 บิต/พิกเซล เป็นแบบอุดมคติ ดังนั้น วิธีการนี้จึงถูกกล่าวถึงโดยทั่วไปว่าดีกว่าวิธีการอื่น ๆ บนพื้นฐานของคู่พิกเซล [4], [8] (กับความจุที่เป็นไปได้สูงสุด 0.5 บิต/พิกเซล) สามพิกเซล [4] (กับความจุที่เป็นไปได้สูงสุด 0.667 บิต/พิกเซล) และสี่พิกเซล [5] (กับความจุที่เป็นไปได้สูงสุด 0.75 บิต/พิกเซล) อย่างไรก็ตาม แนวคิดของพวกเขาถูกพัฒนาต่ออย่างมีนัยยะสำหรับการปรับปรุงตัวทำนาย ซึ่งค่าที่ถูกทำนายถูกคำนวณมาจากตัวทำนาย ดังนั้น เทคนิคนี้สามารถปรับปรุงโดยใช้ประโยชน์จากตัวทำนายที่มีประสิทธิภาพ อาทิเช่น ตัวทำนาย Median Edge Detector (MED) [10]-[11] และ [19] ตัวทำนาย Gradient-Adjusted (GAP) [20] ตัวทำนาย Rhombus [21]-[23] ตัวทำนาย Improved Rhombus [24] ตัวทำนาย Partial Differential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Equation (PDE) [25], ตัวทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก [26] และ [27], หรือ ตัวทำนาย Non-Uniform Weight [28] เป็นต้น ถึงแม้ว่างานวิจัยจำนวนมากไม่น้อยพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวทำนาย เช่น งานของ Shaowei และคณะ [29] การเพิ่มประสิทธิภาพของฟังก์ชันการทำนายเพียงอย่างเดียวไม่สามารถปรับปรุงผลลัพธ์ทั้งหมดของกระบวนการได้เนื่องจากองค์ประกอบอื่นยังคงต้องการการการโมดิไฟล์เช่นกัน

วิธีการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง Kim และคณะ [30] ปรับปรุงเทคนิค DE [4], [8] โดยใช้หนึ่งวิธีการใหม่ที่เรียกว่าง่ายสำหรับการลดขนาดของพื้นที่แมป Goljan และคณะ [31] ใช้ขั้นตอนวิธีการบีบอัดแบบไม่สูญเสีย (Lossless Compression) สำหรับการฝังข้อมูลแบบสามารถกู้คืนฉบับกลับคืนได้ภายหลัง Fridrich และคณะ [32] ปรับปรุงวิธีที่นำเสนอ Van der Veen และคณะ [33] นำเสนอหนึ่งเทคนิคการบีบขยาย (Compadding) ของการฝังข้อมูลแบบกู้คืนฉบับกลับคืนได้สำหรับเสียง Leest และคณะ [34] ขยายแนวคิดเทคนิคการการบีบขยายสำหรับภาพ Celik และคณะ [35] นำเสนอเทคนิคการแทนที่ของ LSB (LSB substitution) โดยการใช้การเข้ารหัสเอนโทรปี (entropy coder) ที่มีประสิทธิภาพ Ni และคณะ [16] ใช้เทคนิคการเลื่อน (Shifting) บนฮิสโตแกรมของพิกเซลสำหรับการซ่อนข้อมูล Ni และคณะ [18] ยังนำเสนอเทคนิคการซ่อนข้อมูลแบบคงทนไม่สูญเสีย (Robust Lossless Data Hiding) Yang และคณะ [36] นำเสนอหนึ่งวิธีการซ่อนข้อมูลแบบกู้คืนฉบับกลับคืนได้สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงจำนวนเต็มโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Cosine Transform: DCT) และอีกหนึ่งบทความ [37] ใช้ประโยชน์เทคนิคการขยายฮิสโตแกรม (Histogram Expansion) สำหรับการฝังข้อมูลลงในค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตความถี่สูง (High-Frequency Wavelet) Xuan และคณะ [38]-[40] นำเสนอหลายเทคนิคสำหรับการซ่อนข้อมูลแบบกู้คืนต้นฉบับกลับคืนได้โดยอยู่บนพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตจำนวนเต็ม Zou และคณะ [41] นำเสนอเทคนิคการซ่อนข้อมูลแบบกู้คืนฉบับกลับคืนได้แบบ Semi-Fragile อยู่บนพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตจำนวนเต็ม (Integer Wavelet Transform)

ถึงแม้ว่ารูปแบบการทำนาย JPEG-LS จะโดดเด่นในเทอมของรูปทรงฮิสโตแกรมของค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนาย รูปแบบยังคงถูกปรับให้เหมาะสมสำหรับการบีบอัดแบบไม่สูญเสีย ด้วยเหตุนี้ เพื่อที่จะประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการซ่อนข้อมูลแบบกู้คืนฉบับกลับคืนได้ รูปแบบการทำนายแบบสลักกันถูกนำมาใช้เฉพาะสำหรับเทคนิคการเรียงลำดับ เพื่อให้บรรลุความจุของการฝังที่เป็นไปได้ ซึ่งแตกต่างจากตัวทำนาย JPEG-LS รูปแบบการทำนาย Rhombus ช่วยให้สามารถใช้เทคนิคการเรียงลำดับข้อมูลได้ ดังนั้นจึงบรรลุประสิทธิภาพที่เหนือกว่า อย่างไรก็ตามการรวมของรูปแบบการทำนาย Rhombus, เทคนิคการเรียงลำดับข้อมูล และวิธีการเลื่อนฮิสโตแกรม ทำให้ได้ขนาดของพื้นที่แมปที่เล็ก ซึ่งก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบที่มีอยู่ใน [8], [10]-[11] สำหรับขั้นตอนวิธี [23] ซึ่งถูกใช้อ้างอิงอย่างยาวนาน ในแง่มุมมองของประสิทธิภาพของกระบวนการที่เคยตีพิมพ์มา Li และคณะ [20] นำเสนอสองการปรับปรุงที่สำคัญ หนึ่งการปรับปรุง คือ การฝังสองบิตในบริเวณพิกเซลที่ราบเรียบ และหนึ่งบิตสำหรับบริเวณพิกเซลที่ขรุขระ การปรับปรุงที่สอง คือ การใช้เทคนิคการเลือกพิกเซล (Pixel Selection) ซึ่งแนวคิดคล้ายคลึงกับเทคนิคการเรียงลำดับข้อมูลในงานก่อนหน้า ผลลัพธ์ในงานของพวกเขาสูงกว่าขั้นตอนวิธี [23] เมื่อความจุของการฝังสูงเท่า ๆ กับขนาดของภาพที่ต้องการฝัง อีกหนึ่งการปรับปรุงสำคัญซึ่งประสบความสำเร็จในแง่มุมมองการเรียงลำดับข้อมูล เทคนิคการขยายค่าความแปรปรวนแบบเฉลี่ย (EVM) [42] ถูกใช้เพื่อให้ได้รับการ

เรียงลำดับข้อมูลที่ต้องการสูงกว่า [23] วิธีการของพวกเขาประสบความสำเร็จสำหรับภาพที่มีความแปรปรวนของพิกเซลสูง และที่มีการฝังข้อมูลขนาดเล็ก

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ปัญหาของวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลแบบกุ่มต้นฉบับกลับคืนได้สำหรับภาพมาตรฐานระดับเทา 8 บิต

1.2.2 เพื่อพัฒนา และปรับปรุงคุณภาพของวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลแบบกุ่มต้นฉบับกลับคืนได้สำหรับภาพมาตรฐานระดับเทา 8 บิต

1.3 สมมติฐานของการศึกษาวิจัย

1.3.1 การลดขนาดของพื้นที่แมป ข้อเท็จจริงพบว่าเมื่อมีการฝังข้อมูลขนาดใหญ่ลงในภาพ การบิดเบือนของภาพหลังการฝังจะสูงตามขนาดของการฝังนั้น ๆ ดังนั้น เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพหลังการฝัง หนึ่งในปัจจัยสำคัญ คือ การลดขนาดของพื้นที่แมป เนื่องจากพื้นที่แมปจำเป็นต้องฝังเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่ต้องการฝังเพื่อให้สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ ดังนั้น ถ้าสามารถลดขนาดของพื้นที่แมปลงได้จะส่งผลให้ขนาดของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังลดลงตาม ความบิดเบือนลดลงตามขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง อย่างไรก็ตาม การลดขนาดของพื้นที่แมปเกี่ยวข้องกับหลายองค์ประกอบของกระบวนการ ซึ่งจะถูกอธิบายต่อไปในบทที่ 2 และ 3 ต่อไป

1.3.2 การลดความบิดเบือนของภาพ ปัจจัยสำคัญหนึ่ง คือ ตัวทำนาย หลายรูปแบบของตัวทำนายดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.1 ส่วนย่อยที่ 8 จะถูกใช้เพื่อคำนวณหาค่าการทำนายของทุกภาพมาตรฐาน และทุกขนาดของการฝัง ค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนายจะได้รับโดยคำนวณจากความแตกต่างของค่าการทำนาย และค่าเฉลี่ยของพิกเซลต้นฉบับ จากนั้นจะใช้ค่าดังกล่าวนี้สำหรับการฝังข้อสังเกต ค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่เข้าใกล้ค่าจริง (หรือ $d_{ij} = 0$) ผลลัพธ์ที่ได้รับหลังการฝังจะให้การบิดเบือนที่ต่ำกว่าค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่มีค่าสูง ในอดีตที่ผ่านมา งานส่วนใหญ่พยายามใช้ตัวทำนายใหม่ ๆ รูปแบบเดียวสำหรับทุกภาพ และทุกขนาดของการฝัง ซึ่งผลลัพธ์ดีสำหรับบางภาพ และบางขนาดของการฝังเท่านั้น ดังนั้น รูปแบบตัวทำนายที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะของพื้นที่พิกเซลในภาพ และตามขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ออกแบบตัวทำนายรูปแบบใหม่ที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงได้ตามลักษณะภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง รายละเอียดจะถูกอธิบายต่อไปในบทที่ 3

1.4 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

นำเสนอการพัฒนาต่อจากขั้นตอนวิธี [23] โดยลดการบิดเบือนของภาพต้นฉบับหลังการฝัง แนวความคิดที่นำเสนอ คือ การออกแบบตัวทำนายใหม่ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ให้เหมาะสมกับลักษณะของภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง ในอดีตที่ผ่านมาพบว่าหลายงานวิจัย เช่น [10]-[11], [19]-[25] และ [28]-[29] เป็นต้น พยายามนำเสนอหนึ่งฟังก์ชันการทำนายรูปแบบใหม่ ๆ ซึ่งตัวทำนายของพวกเขาจะมีลักษณะคงตัว หรือไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้รับของงานพวกเขาจะดีสำหรับบางภาพ และบางขนาดของการฝังเท่านั้น โดยทั่วไปภาพมาตรฐานที่ใช้สำหรับการทดสอบ พบว่าแต่ละภาพจะมีลักษณะของพื้นผิวของพิกเซลที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ภาพ Baboon มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบ หรือ มีการเปลี่ยนแปลงของพิกเซลเป็นแบบฉับพลัน (เช่น 0, 255 ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับพิกเซลที่ติดกัน) เมื่อเปรียบเทียบกับภาพ Airplane ลักษณะของพื้นผิวเป็นแบบราบเรียบ หรือมีการเปลี่ยนแปลงของพิกเซลเป็นแบบซ้ำ ๆ (เช่น 245, 246 และ 248 ในลำดับพิกเซลที่ติดกัน) ลักษณะเฉพาะของภาพเหล่านี้เป็นหนึ่งเหตุผลสำคัญที่ทำให้แต่ละภาพ และแต่ละขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังควรมีรูปแบบของฟังก์ชันการทำนายที่เหมาะสมของแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของการฝัง สองส่วนประกอบสำคัญที่เพิ่มขึ้นใน คือ การออกแบบฟังก์ชันการทำนายใหม่ที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงได้ตามที่ต้องการ ซึ่งถูกเรียกว่าตัวทำนายเกาสเซียนแบบถ่วงน้ำหนัก เพื่อให้รูปแบบการทำนายสามารถปรับเปลี่ยนได้ หนึ่งในเครื่องมือทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมถูกใช้ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ถูกนำเสนอ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สูงสุดเป็นไปได้ เทคนิค EVM ถูกใช้ร่วมในส่วนนี้ ผลลัพธ์หลังการทดลองของวิธีการที่นำเสนอถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตก่อนหน้า [20], [23] และ [26] ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนจะอธิบายไว้ในบทที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.5.1 วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพประกอบด้วย
 - 1.5.1.1 ลายน้ำที่ใช้ฝังเป็นสัญญาณรบกวน
 - 1.5.1.2 ภาพต้นฉบับซึ่งเป็นภาพมาตรฐานระดับเทา
- 1.5.2 การถอดลายน้ำดิจิทัลประกอบด้วย
 - 1.5.2.1 สามารถตรวจสอบภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่เป็นสัญญาณรบกวนได้
 - 1.5.2.2 สามารถกู้คืนภาพต้นฉบับกลับมาได้อย่างถูกต้อง ไม่มีการสูญเสีย
- 1.5.3 การพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ฝังลายน้ำดิจิทัลบนภาพมาตรฐานระดับเทาดังนี้
 - 1.5.3.1 ออกแบบตัวทำนายที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะของภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง
 - 1.5.3.2 ประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียงข้อมูลที่มีประสิทธิภาพตามลักษณะของภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง
 - 1.5.3.3 ประยุกต์ใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยสำหรับการกวาดหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดเพื่อให้บรรลุผลลัพธ์สูงสุดที่เป็นไปได้
- 1.5.4 ทำการจำลองขั้นตอนวิธีตามขอบเขตที่กำหนดเบื้องต้นด้วยโปรแกรม MATLAB

R2009a

1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 1.6.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับวิธีการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ในแบบต่าง ๆ
- 1.6.2 วิเคราะห์ปัญหา และขั้นตอนวิธีการของงานวิจัยในอดีต
- 1.6.3 ศึกษารายละเอียดของวิธีการฝัง และถอดลายน้ำสำหรับรูปภาพ
- 1.6.4 นำเสนอวิธีการใหม่เพื่อแก้ข้อบกพร่อง
- 1.6.5 ออกแบบชุดคำสั่งที่นำเสนอ ทดสอบกับภาพมาตรฐานระดับเทา
- 1.6.6 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
- 1.6.7 สรุปผลของวิธีการที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.8 เสนอแนวทางในการพัฒนา

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท แต่ละบทมีเนื้อหาโดยสังเขปดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา, วัตถุประสงค์ของงานวิจัย, สมมุติฐานของการศึกษาวิจัย, แนวคิด และทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย, ขอบเขตของงานวิจัย, ขั้นตอนการศึกษาวิจัย และส่วนประกอบของตัวเล่มวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งในส่วนของกระบวนการฝัง และกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลแบบกึ่งภาพต้นฉบับกลับคืนได้
- บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวทำนายเกาส์เขียนแบบถ่วงน้ำหนัก, การประยุกต์ใช้เทคนิค EVM สำหรับการเรียงลำดับข้อมูล, การเพิ่มประสิทธิภาพของค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสม, การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) สำหรับการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้, การเข้ารหัส และการถอดรหัส
- บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลอง และผลของการทดลองสำหรับวิธีการฝังลายน้ำลงในภาพมาตรฐานระดับเทาต่าง ๆ และเปรียบเทียบผลในเชิงสถิติกับงานวิจัยก่อนหน้า
- บทที่ 5 เป็นการสรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

เอกสารอ้างอิง

ส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์จะเป็นภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ภาคผนวก ก การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสมการในตำแหน่งครอสเซต และดอทเซตของการคำนวณค่าการทำนาย, พารามิเตอร์ σ_x และ σ_y สำหรับตัวทำนายเกาส์เขียนแบบถ่วงน้ำหนัก และการคำนวณ φ ของการเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้เทคนิค EVM
- ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฝังลายน้ำแบบสามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้

ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ องค์กรประกอบพื้นฐานทั่วไปของกระบวนการประกอบด้วย กระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัล (Watermark Embedding) และกระบวนการแยกลายน้ำดิจิทัล หรือ การกู้คืนข้อมูล (Watermark Extraction) ทุกวิธีการล้วนแล้วต้องสามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนแบบไม่สูญเสีย หลักการดังกล่าวถูกวางเอาไว้สำหรับงานสายนี้ ความท้าทายของนักวิจัยที่กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า สำหรับการพัฒนาปรับปรุงในส่วนของการฝัง เพื่อให้สามารถฝังข้อมูลได้จำนวนที่มากขึ้น แต่ภาพยังคงมีความบิดเบือนเท่าเดิม หรือต่ำลง เงื่อนไขดังกล่าวนี้ทำให้กระบวนการฝังยังคงถูกพัฒนาออกมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ก่อนเข้าสู่บทนำเสนอของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เทคนิคพื้นฐานหลักที่ถูกใช้ และเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความรู้พื้นฐานของกระบวนการฝังข้อมูลแบบสามารถกู้คืนกลับคืนได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อ้างอิงขั้นตอนวิธี [23] เป็นพื้นฐานซึ่งประกอบไปด้วยหลายเทคนิค อาทิเช่น

1. เหตุผลของการใช้ตัวทำนาย Rhombus [21]-[23]
2. การใช้รูปแบบการเลื่อนฮิสโตแกรม (Histogram Shift Scheme) ของ [23]
3. ค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม (Appropriate Threshold Values) [21], [23], [26]-[27]
4. การใช้การเรียงลำดับข้อมูล (Sorting Data) [8], [23], [26]-[27]
5. ปัญหา Overflow และ Underflow [11], [21], [23], [26]-[27]
6. รูปแบบการฝังแบบดับเบิล (Double Embedding Scheme) [8], [11]-[12] และ [23]
7. การเข้ารหัส และการถอดรหัส (Encoder and Decoder) [23]

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ครอบคลุมเนื้อหาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ เทคนิคการขยายค่าความแตกต่าง (DE) [4] ถูกอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมประกอบความเข้าใจในส่วนแรกของเนื้อหา เทคนิคการเฉลี่ยค่าความแปรปรวนที่สามารถขยายได้ (EVM) [42] ถูกอธิบายต่อสำหรับการปรับปรุงเทคนิคการเรียงลำดับข้อมูล และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) [43] จะถูกเพิ่มอยู่ในส่วนท้ายของบทนี้ด้วยสำหรับการอธิบาย

2.1 เทคนิคการขยายค่าความแตกต่าง (Difference Expansion: DE) [4]

วิธีการฝังข้อมูลแบบกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ที่มีความจุสูง คือ การเลือกพื้นที่สำหรับการฝัง (เช่น ในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด (LSB) ของบางพิกเซล) ในหนึ่งภาพ จะมีการฝังทั้งขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง และค่าต้นฉบับ (จำเป็นต้องใช้สำหรับการกู้คืนภาพต้นฉบับที่ต้องการ) ลงในพื้นที่ภาพขณะที่จำนวนของข้อมูลที่เป็นที่ต้องการฝัง (ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง และค่าต้นฉบับในพื้นที่การฝัง) มักมีขนาดใหญ่กว่าของพื้นที่สำหรับการฝัง เทคนิคในอดีตจำเป็นต้องพึ่งพาเครื่องมือการบีบอัดข้อมูลแบบไม่สูญเสีย (Lossless) ในค่าต้นฉบับสำหรับพื้นที่การฝัง พื้นที่ที่บันทึกไว้จากการบีบอัดจะถูกนำมาใช้สำหรับการฝังขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง เทคนิคการฝังในพื้นที่พิเศษ DE [4] ถูกเริ่มต้นขึ้น ซึ่งค้นพบพื้นที่จัดเก็บพิเศษโดยการสำรวจความซ้ำซ้อนในพิกเซลของภาพ เทคนิค DE ถูกใช้เพื่อให้ข้อมูลสามารถกู้คืนกลับคืนได้ ทั้งขีดจำกัดของอัตราการฝัง ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของภาพของภาพหลังการฝัง วิธีการดังกล่าวนี้อยู่ท่ามกลางเทคนิคที่ดีที่สุดในอดีตที่ผ่านมา พร้อมกับความสะดวกของการคำนวณที่ต่ำ

หนึ่งตัวอย่างง่าย ๆ ของ DE (a simple example of the Difference Expansion)

สมมติว่ามีสองค่า คือ $x = 206$ และ $y = 201$ ที่ต้องการที่จะกู้คืนข้อมูลหนึ่งบิต $b = 1$ เริ่มต้น เทคนิคของพวกเขาคำนวณค่าเฉลี่ยจำนวนเต็ม (integer average: l) และค่าความแตกต่าง (difference: h) ของ x และ y ดังนี้

$$l = \left\lfloor \frac{206 + 201}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{407}{2} \right\rfloor = 203, h = 206 - 201 = 5$$

โดยที่สัญลักษณ์ $\lfloor \cdot \rfloor$ คือ ฟังก์ชันการปัดลง หรือหมายถึง “เลขจำนวนเต็มปัดเศษลง” ต่อไปแทนค่าความแตกต่าง h ลงในเลขฐานสองของตัวเอง คือ $h = 5 = 101_2$ และผนวกรวม b ลงในตัวแทนที่เป็นเลขฐานสองของ h หลังจากนั้นบิตสุดท้ายที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด (LSB) จะถูกเปลี่ยน ค่าความแตกต่างใหม่ h' กลายเป็น $h' = 101b_2 = 11$ ในทางคณิตศาสตร์ กรณีดังกล่าวนี้จะเท่ากับ

$$h' = 2 \times h + b = 2 \times 5 + 1 = 11$$

คำนวณค่าใหม่ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของค่าความแตกต่างใหม่ h' และค่าเฉลี่ยจำนวนเต็มต้นฉบับ l

$$x' = 203 + \left\lfloor \frac{11+1}{2} \right\rfloor = 209, y' = 203 - \left\lfloor \frac{11}{2} \right\rfloor = 198$$

จากคู่ที่ถูกฝัง (x' , y') สามารถแยกบิตที่ถูกฝัง b และกู้คืนค่าต้นฉบับเดิมของคู่ (x , y) ทำอีกครั้งเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของจำนวนเต็ม และค่าความแตกต่าง

$$l' = \left\lfloor \frac{209 + 198}{2} \right\rfloor = 203, h' = 209 - 198 = 11$$

สังเกตในตัวแทนเลขฐานสองของ $h' = 11 = 1011_2$ การแยก LSB ซึ่ง คือ 1 ในกรณีนี้ บิตที่ถูกฝัง b ซึ่งถูกแยกออกจากค่าต้นฉบับของค่าความแตกต่าง คือ $h = 101_2$ ในทางคณิตศาสตร์ กรณีนี้เท่ากับ

$$b = LSB(h') = 1, h = \left\lfloor \frac{h'}{2} \right\rfloor = 5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะนี้ค่าเฉลี่ยจำนวนเต็ม l' และค่าความแตกต่างที่ถูกกู้คืน h สามารถกู้คืนได้อย่างถูกต้องของค่าต้นฉบับคู่ (x, y)

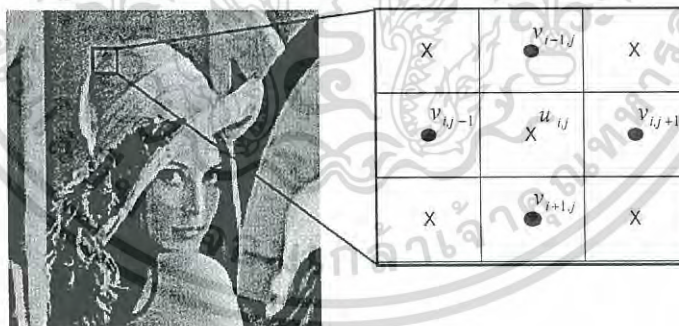
ในตัวอย่างข้างต้นนี้ หนึ่งบิต b ที่ถูกฝัง โดยการเพิ่มความยาวบิตของค่าความแตกต่าง h จาก 3 บิต (สำหรับ $h = 5$) ไปเป็น 4 บิต (สำหรับ $h' = 11$) การดำเนินการการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ดังกล่าวนี้ คือ

$$h' = 2 \times h + b$$

ถูกเรียกว่า DE

2.2 เหตุผลของการใช้ตัวทำนาย Rhombus [21]-[23]

เทคนิค PEE ซึ่งมีชื่อเสียง และได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถูกใช้ใน [10]-[11], [20]-[23], [25]-[29] และ [42] การทำนายโดยใช้ตัวทำนาย JPEG-LS ไม่สามารถเรียงค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายได้ ดังนั้น หนึ่งตัวทำนายใหม่เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถเรียงลำดับข้อมูลได้ ด้วยเหตุผลนี้ [23] นำเสนอหนึ่งรูปแบบการทำนายใหม่เรียกว่า “Rhombus” เพื่อให้ได้ค่าการทำนายพิกเซลของตำแหน่ง u_{ij} ในรูปที่ 2.1 สี่พิกเซลข้างเคียง (คือ $v_{i,j-1}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j+1}$ และ $v_{i-1,j}$) ถูกใช้ การรวมกันของห้าพิกเซล u'_{ij} ประกอบกันเป็นหนึ่งเซลล์ซึ่งจะถูกใช้สำหรับซ่อนหนึ่งบิตข้อมูลพิกเซลทั้งหมดของภาพถูกแบ่งออกเป็นสองเขต: ครอสเซต และดอทเซต (แสดงดังรูปที่ 2.1) ครอสเซตถูกใช้สำหรับการฝัง และดอทเซตถูกใช้สำหรับคำนวณค่าการทำนาย ต่อจากนี้เป็นต้นไปสำหรับกระบวนการนี้จะถูกเรียกว่ารูปแบบการฝังครอส



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของการทำนาย ค่าพิกเซล u ของครอสเซตสามารถถูกทำนายโดยใช้สี่พิกเซลบริเวณข้างเคียงของดอทเซต และถูกขยายเพื่อซ่อนหนึ่งบิตข้อมูล

การเข้ารหัสของรูปแบบการฝังครอสสำหรับหนึ่งเซลล์อธิบายดังนี้

พิกเซลศูนย์กลาง u_{ij} ของเซลล์สามารถถูกทำนายจากสี่พิกเซลข้างเคียง $v_{i,j-1}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j+1}$, และ $v_{i-1,j}$ ค่าที่ถูกทำนาย u'_{ij} ถูกคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u'_{i,j} = \left[\frac{v_{i,j+1} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i+1,j}}{4} \right] \quad (2.1)$$

ค่าที่ถูกทำนาย $u'_{i,j}$ และค่าต้นฉบับ $u_{i,j}$ อยู่บนพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ ถูกคำนวณดังนี้

$$d_{i,j} = u_{i,j} - u'_{i,j} \quad (2.2)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย นี้สามารถถูกขยาย เพื่อซ่อนข้อมูลเหมือนกับขั้นตอนวิธี DE ที่ถูกนำเสนอโดย Tian [4] การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ตามสมการที่ (2.2) ผลลัพธ์ที่ได้ถูกขยายเพื่อให้เกิดพื้นที่ว่าง 1 บิต สำหรับการฝัง บิตในที่มีสถานะ คือ 0 หรือ 1 ($b \in \{0,1\}$) โดยทั่วไปการฝังข้อมูลมักถูกบิตโดยตรงลงในค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ตัวอย่างเช่น

ตารางที่ 2.1 แสดงผลลัพธ์จากการขยายค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายโดยใช้เทคนิค DE [4]

$d_{i,j}$	b	$2d_{i,j}+b$	$d_{i,j}$	b	$2d_{i,j}+b$
0	0	0	-1	0	-1
0	1	1	-1	1	-2
1	0	2	-2	0	-3
1	1	3	-2	1	-4
2	0	4	-3	0	-5
2	1	5	-3	1	-6
3	0	6	-4	0	-7
3	1	7	-4	1	-8
4	0	8	-5	0	-9
4	1	9	-5	1	-10

สมมุติฐาน

$$\begin{array}{lll}
 d_{i,j} = 0 & d_{i,j} + b = 0 + 0 = 0; & \text{กรณี } b = "0" \text{ (ก)} \\
 d_{i,j} = 0 & d_{i,j} + b = 0 + 1 = 1; & \text{กรณี } b = "1" \text{ (ข)} \\
 d_{i,j} = 1 & d_{i,j} + b = 1 + 0 = 1; & \text{กรณี } b = "0" \text{ (ค)} \\
 d_{i,j} = 1 & d_{i,j} + b = 1 + 1 = 2; & \text{กรณี } b = "1" \text{ (ง)}
 \end{array}$$

หมายเหตุ พบว่าผลลัพธ์ "1" เหมือนกันของทั้งกรณี (สังเกตที่ (ข) และ (ค)) เหตุการณ์นี้ ผู้ถอดรหัส จะไม่สามารถแยกบิตข้อมูลที่ถูกฝังได้ ดังนั้น ปัญหาดังกล่าวถูกแก้โดยเทคนิคการฝังลายน้ำโดยใช้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยาย ในตารางที่ 2.1 แสดงผลลัพธ์ที่ไม่มีปัญหาของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกขยาย คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_{i,j} = 2d_{i,j} + b \quad (2.3)$$

โดยที่ $D_{i,j}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย หลังการขยาย (expansion) เรียกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกโมดิไฟล์ ค่า b คือ หนึ่งบิตของข้อมูลที่ถูกซ่อน สังเกตว่า $D_{i,j}$ ที่ถูกโมดิไฟล์ตามวิธีการเลื่อนฮิสโตรแกรมซึ่งจะถูกอธิบายไว้ในภายหลัง (แสดงในหัวข้อถัดไป)

หลังการซ่อนข้อมูล ค่าพิกเซลต้นฉบับ $u_{i,j}$ ถูกเปลี่ยนเป็น $U_{i,j}$ ดังนี้

$$U_{i,j} = D_{i,j} + u'_{i,j} \quad (2.4)$$

ขั้นตอนการถอดรหัสสำหรับรูปแบบการฝังครอสสำหรับหนึ่งเซลล์ คือ ตรงข้ามกับหนึ่งขั้นตอนการเข้ารหัส ในช่วงของการฝัง พิกเซลจากดอทเซตจะไม่ถูกโมดิไฟล์ ดังนั้น ค่าที่ถูกทำนาย $u'_{i,j}$ ไม่ถูกเปลี่ยนเช่นกัน การใช้ค่าที่ถูกทำนาย $u'_{i,j}$ และค่าพิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ $U_{i,j}$ ผู้ถอดรหัสสามารถกู้คืนข้อมูลที่ฝัง และค่าพิกเซลต้นฉบับได้อย่างแน่นอน

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกโมดิไฟล์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$D_{i,j} = U_{i,j} + u'_{i,j} \quad (2.5)$$

ค่าบิตที่ถูกฝังถูกคำนวณดังต่อไปนี้

$$b = D_{i,j} \bmod 2 \quad (2.6)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ต้นฉบับสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$d_{i,j} = \left\lfloor \frac{D_{i,j}}{2} \right\rfloor \quad (2.7)$$

ค่าของพิกเซลต้นฉบับสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$u_{i,j} = d_{i,j} + u'_{i,j} \quad (2.8)$$

สังเกตว่า สองเซต (ครอสเซต และดอทเซต) เป็นอิสระจากกันและกัน ความเป็นอิสระจากกันหมายถึง เมื่อเซตหนึ่งเปลี่ยนจะไม่มีผลกระทบต่ออีกเซต และในทางตรงกันข้าม พิกเซลจากดอทเซตถูกใช้สำหรับการคำนวณค่าที่ถูกทำนาย $u'_{i,j}$ โดยที่พิกเซลจากครอสเซต $u_{i,j}$ ถูกใช้สำหรับการฝังข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับของการซ่อนข้อมูลในเซลล์ ไม่ได้เป็นสิ่งสำคัญ และสามารถถูกเปลี่ยนได้ การบันทึกการเรียงเซลล์ตามขนาด (Magnitudes) ของค่าความแปรปรวนโดยใช้พิทเซลข้างเคียง (Local Variance) (ปรากฏในหัวข้อ 2.4 การใช้การเรียงลำดับข้อมูล) และช่วยให้การซ่อนข้อมูลในเซลล์ตามค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่มีขนาดเล็ก ดังนั้น การเรียงจึงสามารถปรับปรุงอย่างมีนัยยะสำหรับกระบวนการฝังข้อมูล การเรียงถูกปรับใช้กับรูปแบบการทำนาย Rhombus ซึ่งจะถูกรายละเอียดที่มากกว่านี้ในหัวข้อการเรียงข้อมูล

2.3 การใช้รูปแบบการเลื่อนฮิสโตรแกรม (HS) ของ [23]

วิธีการเลื่อนฮิสโตรแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (PEHS) ถูกนำเสนอโดย Thodi และ Rodriguez [10] และ [11] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการฝัง วิธีการ HS คือ หนึ่งเทคนิคที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ และมีความบิดเบือนต่ำ ประโยชน์อื่น ๆ ของกระบวนการ คือ ช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการซ้อนทับกันของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกขยายกับค่าพิทเซลเดิมก่อนหน้าที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการเกิดปัญหา Overflow และ Underflow (แสดงในรูปที่ 2.2) ในกระบวนการ HS สองค่าเทรชโฮลด์ T_n และ T_p ถูกใช้สำหรับการกำหนดช่วงของการฝัง โดยที่ T_n คือ ค่าเทรชโฮลด์ฝั่งลบ (Negative Threshold) และ T_p คือ ค่าเทรชโฮลด์ฝั่งบวก (Positive Threshold) E เซต คือ เซตที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่สามารถขยายได้ (Expandable Set) ซึ่งอยู่ในช่วง $[T_n, T_p]$ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายเหล่านั้นสามารถขยายได้ตามสมการที่ (2.9) โดยไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาด Overflow และ Underflow ในสเปเชียลโดเมน (Spatial Domain) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ไม่ได้อยู่ในช่วง $[T_n, T_p]$ จะถูกเลื่อนเพื่อให้มีที่ว่างสำหรับการขยาย (ดังรูปที่ 2.3) S เซต คือ เซตของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย เซตที่สามารถเลื่อนได้ (Shiftable Set) อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายในโดเมนที่จะไม่ถูกขยาย หรือ ถูกเลื่อน เนื่องจากเกิดปัญหาความผิดพลาด Overflow หรือ Underflow ในสเปเชียลโดเมน (ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 สำหรับตัวอย่าง) ความจุในการฝังของวิธีการที่ [23] คือ $|E| - |L|$ โดยที่ $|L|$ คือ ขนาดของพื้นที่แมป (ซึ่งจะถูกรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.8)

ขั้นตอนวิธีการเข้ารหัสของ HS โดยโมดิไฟ์ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d_{ij} ดังสมการต่อไปนี้

$$D_{i,j} = \begin{cases} 2d_{i,j} + b & d_{i,j} \in [T_n; T_p] \\ d_{i,j} + T_p + 1 & d_{i,j} > T_n, T_p \geq 0 \\ d_{i,j} + T_n & d_{i,j} > T_n, T_p < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

การถอดรหัสเพื่อกู้คืนค่าต้นฉบับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d_{ij} และบิตของข้อมูลที่ถูกรหัส b จาก $D_{i,j}$ ดังสมการต่อไปนี้

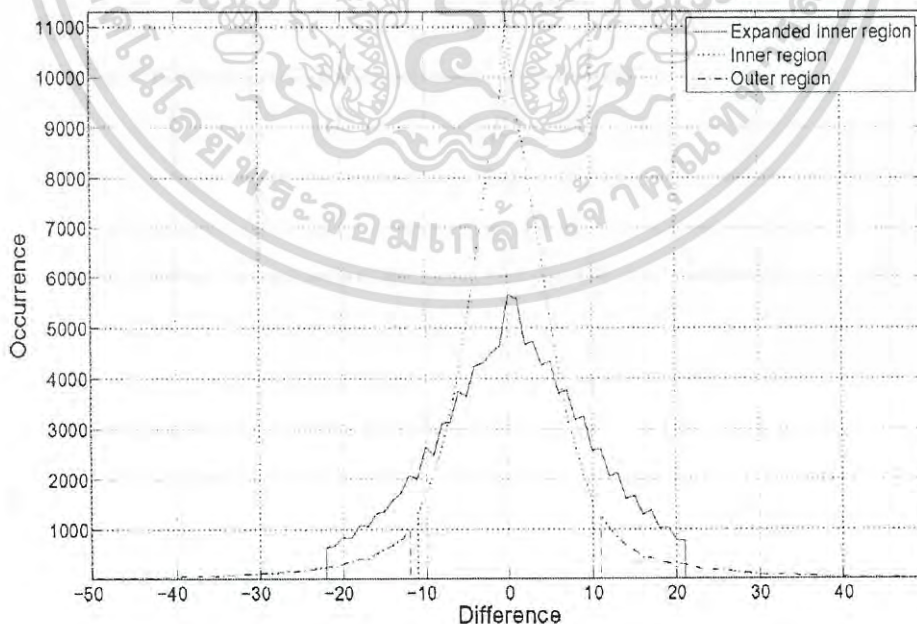
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_{i,j} = \begin{cases} \lfloor D_{i,j}/2 \rfloor & \text{if } D_{i,j} \in [2T_n; 2T_p + 1] \\ D_{i,j} - T_p - 1 & \text{if } D_{i,j} > 2T_p + 1 \text{ and } T_n \geq 0 \\ D_{i,j} - T_n & \text{if } D_{i,j} < 2T_n \text{ and } T_n < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

และ

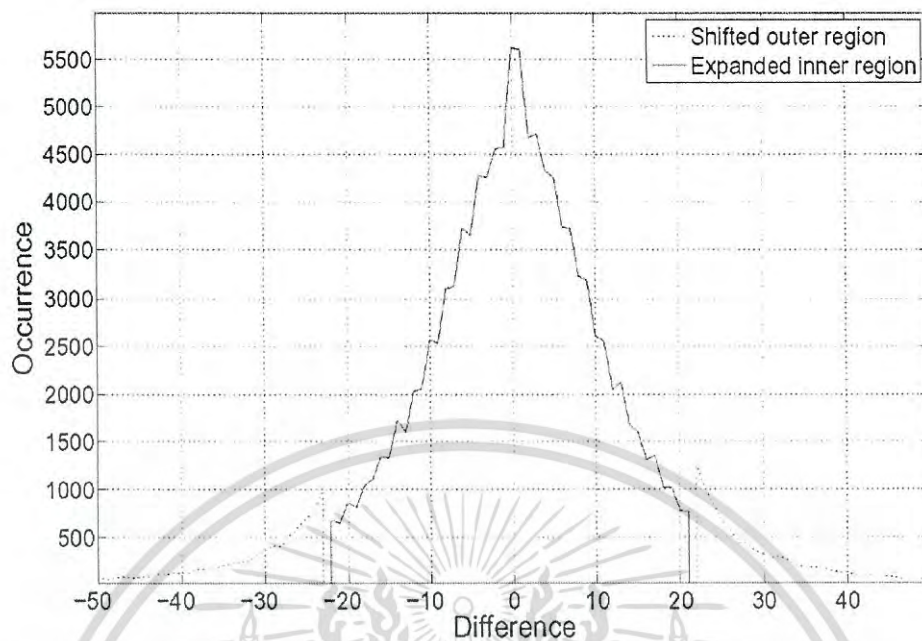
$$b = D_{i,j} \bmod 2, \quad D_{i,j} \in [2T_n; 2T_p + 1] \quad (2.11)$$

อัตราส่วนระหว่าง E เซต และ S เซต สามารถถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนค่าเทรชโฮลด์ T_p และ T_n ซึ่งจะไปควบคุมความจุของการฝัง ความบิดเบือนขึ้นอยู่กับรูปทรงของฮิสโตรแกรมและค่าเทรชโฮลด์ ลักษณะของการบิดเบือนจะแตกต่างกัน ความบิดเบือนอันเนื่องมาจากเซตที่สามารถขยายได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของแต่ละองค์ประกอบ ในอีกแง่หนึ่ง ขนาดของการบิดเบือนเกิดโดยเซตที่สามารถเลื่อนได้เป็นเหมือนกัน คือ $T_p + 1$ สูงกว่า $d_i > T_p + 1$ และ $-T_p$ สูงกว่า $d_i < T_n$ ดังนั้น ความบิดเบือนในเซตที่สามารถเลื่อนได้จึงขึ้นอยู่กับค่าเทรชโฮลด์ นอกจากนี้ ภาวะเชิงการนับ (Cardinality) ของเซตที่สามารถเลื่อนได้ คือ อีกหนึ่งสิ่งที่สำคัญสรุปได้ดังนี้ ความบิดเบือนที่สูงขึ้นขึ้นอยู่กับภาวะเชิงการนับของเซตที่สามารถเลื่อนได้

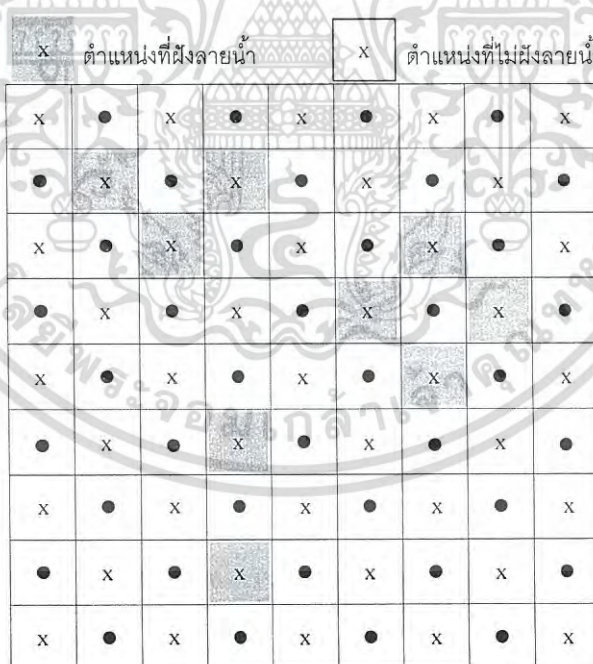


รูปที่ 2.2 แสดงฮิสโตรแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายหลังถูกขยายบริเวณที่อยู่ในช่วง $[T_n, T_p]$ และนอกช่วง $[T_n, T_p]$ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงผลลัพธ์ของฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกเลื่อนบริเวณ นอกช่วง $[T_m, T_p]$ [11]



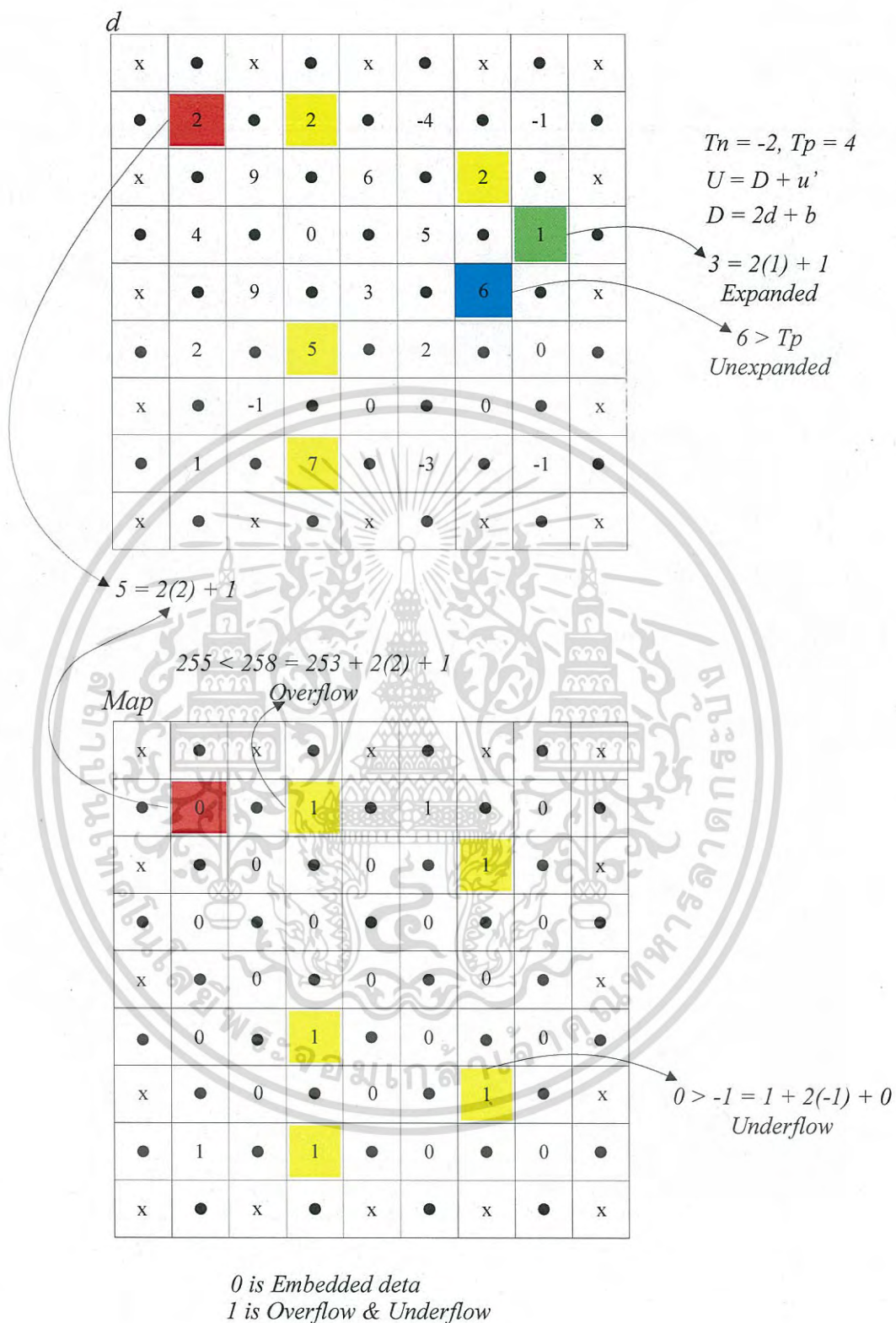
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"0" แผนที่แสดงตำแหน่งที่สามารถฝังลายน้ำได้				"1" แผนที่แสดงตำแหน่งที่ไม่สามารถฝังลายน้ำได้				
x	•	x	•	x	•	x	•	x
•	0	•	0	•	1	•	1	•
x	•	0	•	1	•	0	•	x
•	1	•	1	•	0	•	0	•
x	•	1	•	1	•	0	•	x
•	1	•	0	•	1	•	1	•
x	•	1	•	1	•	1	•	x
•	1	•	0	•	1	•	1	•
x	•	x	•	x	•	x	•	x

(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) แสดงแบบจำลองของตำแหน่งที่สามารถฝังข้อมูลได้ และที่ไม่สามารถฝังข้อมูลได้
 (ข) แสดงพื้นที่แผนที่สำหรับอ้างอิงตำแหน่งที่ถูกฝังข้อมูล และไม่ถูกฝังข้อมูล

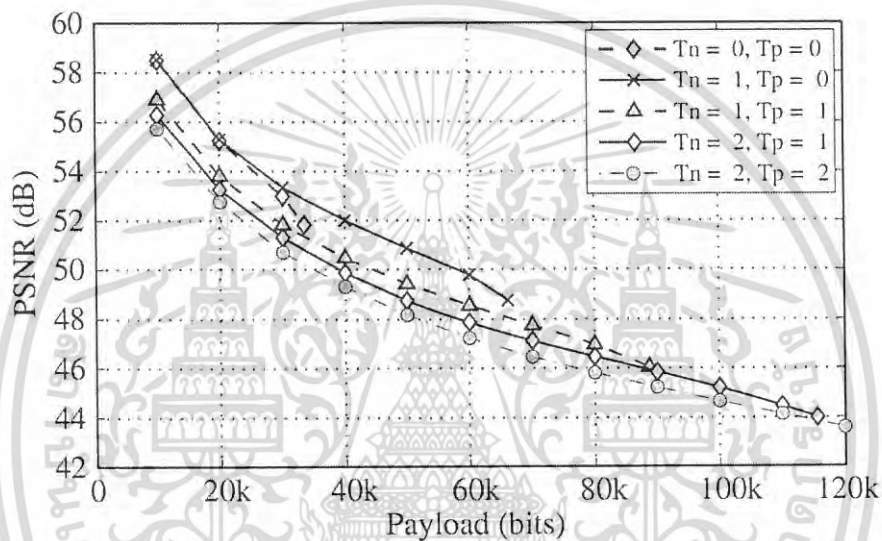


รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย *d* และแมป (map) ที่อยู่ในช่วง $[T_n, T_p]$ และบริเวณนอกช่วง $[T_n, T_p]$ กับปัญหา Overflow และ Underflow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม (Appropriate Threshold Values) [23]

ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ มีหลายความเป็นไปได้ของการรวมกันของค่าเทรชโฮลด์ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้รับประสิทธิภาพ PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้ มันเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อหา และใช้ค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่ต้องการ ค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถพบได้โดยการทำซ้ำ ๆ (หรือ Fine-Tuning) ของค่าเทรชโฮลด์เพื่อให้ได้รับ PSNR ที่ดีขึ้นสำหรับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่วิธีการของพวกเขาต้องการนอกจากนี้ยังเป็นไปได้ที่จะประสบความสำเร็จในค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมโดยใช้ฮิสโตรแกรมอย่างไรก็ตาม รายละเอียดของวิธีการนี้อยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยฉบับนี้



รูปที่ 2.6 แสดงผลกระทบของการทดสอบค่าเทรชโฮลด์ต่อ PSNR ที่ได้รับของหนึ่งขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่ถูกบรรจุสำหรับภาพ Lena [23]

ตัวอย่าง พิจารณาหนึ่งกรณีที่ต้องซ่อนข้อมูลจำนวน 60,000 บิต รูปที่ 2.6 แสดงค่าของค่าเทรชโฮลด์ $[T_n, T_p]$ ของ $[-1, 0]$, $[-1, 1]$, $[-2, 1]$ และ $[-2, 2]$ เพียงพอที่จะซ่อนข้อมูลจำนวน 60,000 บิต ในหมู่ของค่าเทรชโฮลด์ดังกล่าว คู่ที่เหมาะสมที่สุด คือ $[-1, 0]$ เพราะว่ามันบรรลุคุณภาพของภาพสูงสุดที่ 49.58 dB

2.5 การใช้การเรียงลำดับข้อมูล (Data Sorting) [8], [23], [26]-[27]

Kamstra และ Heijmans [8] เริ่มต้นใช้การเรียงลำดับข้อมูลสำหรับวิธีการฝังข้อมูลแบบกู่ตันฉบับกลับคืนได้ ข้อได้เปรียบของประสิทธิภาพการทำงานอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าวิธีการก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม การเรียงลำดับจะเป็นไปได้เฉพาะเมื่อเซลล์มีความเป็นอิสระต่อกัน หรือในความหมายอื่น การฝังข้อมูลลงในหนึ่งเซลล์ควรจะไม่กระทบต่อเซลล์อื่น ๆ อย่างไรก็ตาม วิธีการของ Thodi และ

Rodriguez [11] ขึ้นอยู่กับเซลล์ โดยที่การฝังข้อมูลไปยังเซลล์หนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายเซลล์อื่น ๆ

สังเกตว่า ดอทเซตและครอสเซตของรูปแบบการทำนาย Rhombus [23] มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน เพื่อให้ซ่อนข้อมูลได้มากขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงภาพที่ลดลง เพื่อที่จะซ่อนข้อมูลลงในเซลล์ เซลล์จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น เซลล์สามารถถูกจัดเรียงใหม่โดยการเรียงลำดับตามค่าสหสัมพันธ์ของพิกเซลข้างเคียง ค่าความแปรปรวนในพื้นที่ข้างเคียงถูกใช้ $\mu_{i,j}$ สำหรับแต่ละเซลล์ สามารถคำนวณจากพิกเซลข้างเคียง v_{ij-1} , $v_{i+1,j}$, v_{ij+1} , และ $v_{i-1,j}$ (ปรากฏในรูปที่ 2.1) ดังต่อไปนี้

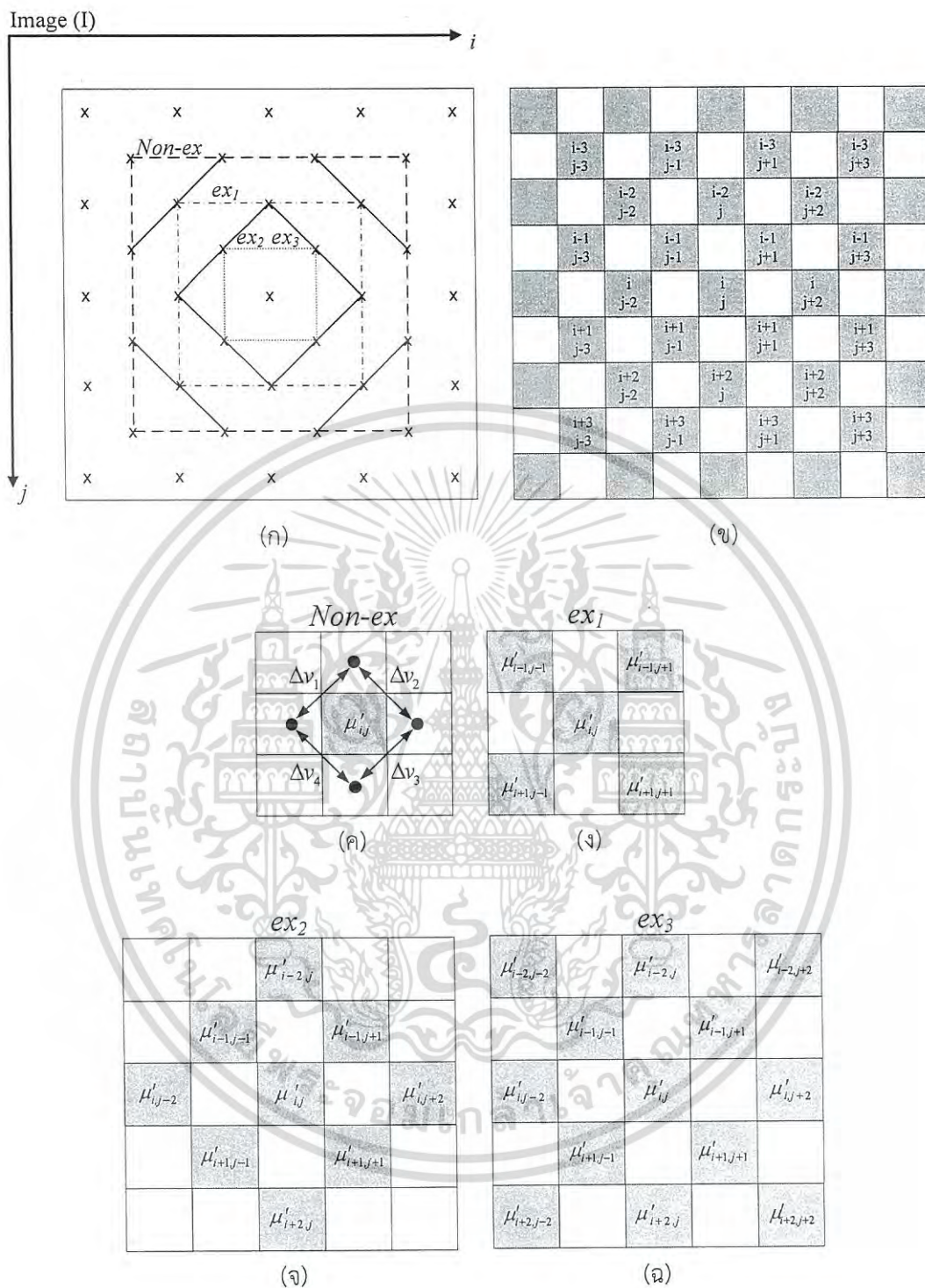
$$\mu_{i,j} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\Delta v_k - \Delta \hat{v}_k)^2 \quad (2.12)$$

โดยที่ $\Delta v_1 = |v_{ij-1} - v_{i-1,j}|$, $\Delta v_2 = |v_{i-1,j} - v_{ij+1}|$, $\Delta v_3 = |v_{ij+1} - v_{i+1,j}|$, $\Delta v_4 = |v_{i+1,j} - v_{ij-1}|$, $\Delta v_k = (\Delta v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3 + \Delta v_4)/4$ ค่าความแปรปรวนในพื้นที่ $\mu_{i,j}$ ถูกคำนวณโดยใช้ (2.12) เพื่อช่วยให้บรรลุการเรียงลำดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของการซ่อนข้อมูล ค่าความแปรปรวนในพื้นที่ $\mu_{i,j}$ มีหลายคุณลักษณะ ประการแรก ค่าเหล่านี้ที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการฝังลายน้ำ ประการที่สอง ค่าเหล่านี้แปรผันตามขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ ของเซลล์นั้น สำหรับตัวอย่าง หนึ่งค่าความแปรปรวนขนาดเล็ก บ่งชี้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย น่าจะมีขนาดเล็กเช่นเดียวกัน

สมมติว่า d_{sort} ถูกเรียงลำดับเป็นแถวของทุกตำแหน่ง $d_{i,j}$ วิธีการเลื่อนฮิสโตแกรมถูกใช้ฝังข้อมูลร่วมกับค่าเทรซโฮลด์ T_n และ T_p เซลล์ถูกเรียงลำดับตามลำดับของค่าความแปรปรวนในพื้นที่เซลล์ซึ่งมีค่าความแปรปรวนขนาดเล็กเป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับการฝังข้อมูล ดังนั้น กระบวนการฝังเริ่มต้นจากเซลล์ที่มีค่าความแปรปรวนขนาดเล็กในแถวที่ถูกเรียง และย้ายเซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่าออกไปยังเซลล์ต่อไปจนกว่าจะถึงบิตสุดท้ายของข้อมูลที่ถูกฝัง วิธีการเลื่อนฮิสโตแกรมถูกประยุกต์ใช้ที่ตำแหน่งเซลล์ซึ่งมีค่าความแปรปรวนขนาดเล็กในเซต E และเซต S โดยที่ $P = |E|$ แน่นนอนว่าขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง P ยังคงขึ้นอยู่กับค่า T_n และ T_p มันจำเป็นที่จะกล่าวว่า สำหรับการแยกข้อมูลที่ถูกฝัง และการกู้คืนภาพต้นฉบับ ไม่มีบิตของข้อมูลกับตำแหน่งของเซลล์สุดท้ายที่ถูกเปลี่ยน (หรือ ความจุของการฝัง) และค่าเทรซโฮลด์เป็นสิ่งจำเป็น

2.6 เทคนิคการเฉลี่ยค่าความแปรปรวนที่สามารถขยายได้ (EVM) [42]

หนึ่งการปรับปรุงที่สำคัญสำหรับการเรียงลำดับข้อมูลของขั้นตอนวิธีก่อนหน้าถูกนำเสนอโดย Kotvicha และคณะ [42] แนวคิด คือ การใช้ประโยชน์จากการขยายค่าเฉลี่ยของค่าความแปรปรวน $\mu_{i,j}$ ที่มีอยู่เพื่อให้การเรียงลำดับเข้าใกล้ค่าอุดมคติ



- รูปที่ 2.7 (ก) แสดงรูปแบบของการขยายค่าความแปรปรวนในตำแหน่งครอสเซต
- (ข) แสดงตำแหน่ง i, j ของการขยายค่าเฉลี่ยความแปรปรวน
- (ค) ไม่พบระดับการขยาย (*Non-ex*) ซึ่งหมายถึง μ'_{ij} จำนวน 1 เซลล์ [23]
- (ง) ขยาย 1 ระดับ (ex_1) ประกอบด้วย μ'_{ij} จำนวน 5 เซลล์
- (จ) ขยาย 2 ระดับ (ex_2) ประกอบด้วย μ'_{ij} จำนวน 9 เซลล์
- (ฉ) ขยาย 3 ระดับ (ex_3) ประกอบด้วย μ'_{ij} จำนวน 13 เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาหนึ่งความสัมพันธ์ของพิกเซลบริเวณข้างเคียงสำหรับการเฉลี่ยค่าความแปรปรวน และ พิกเซลที่ไกลออกไป เช่น $ex = 1-3$ (แสดงดังรูป 2.7 (ง)-(ฉ)) สังเกตว่า ในภาพ Barbara และ Mandrill เทคนิค EVM ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอย่างมีนัยยะเมื่อเทียบกับ [23] ซึ่งมีผลมาจากภาพเหล่านั้น มีการเปลี่ยนแปลงของพิกเซลแบบทันทีทันใด ดังนั้น การใช้การขยายค่าเฉลี่ยสำหรับพื้นที่ความแปรปรวนที่ขยายออกจึงมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าในแง่มุมมองของความบิดเบือนต่ำ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้รับผลลัพธ์สูงสุดที่เป็นไปได้ ระดับของ ex สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะของภาพ และขนาดของการฝัง

พิจารณาแต่ละระดับของ ex พบว่าแต่ละระดับถูกออกแบบตามการฝัง แสดงการขยายเริ่มต้นจากสี่เซลล์ข้างเคียง และเพิ่มครั้งละสี่เซลล์ในระดับถัดมา (แสดงในรูปที่ 2.6 (จ)-(ฉ)) ทุกการขยายจะเพิ่มครั้งละสี่เซลล์เพื่อครอบคลุมพื้นที่รอบข้างทั้งหมดที่เป็นไปได้ ถึงแม้ว่า ในบางครั้งขอบเขตของการขยายจะไกลออกไปจากตำแหน่งที่ถูกใช้ก็ตาม (ตัวอย่างเช่น $ex = 39$) การหาระดับการขยายที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น การขยายเริ่มต้นจากระดับที่ต่ำสุด (ที่ $ex = 1$) เพื่อให้ได้ระดับการขยายที่เหมาะสมที่สุด พบว่าการทำนายสำหรับแต่ละการขยาย บริเวณเซลล์ที่มีอิทธิพลสูงจะอยู่ใกล้มากกว่าบริเวณที่ห่างไกลออกไป ดังนั้น จำนวนเซลล์ที่เป็นไปได้สำหรับคำนวณค่า EVM ในแต่ละระดับสามารถคำนวณได้ดังนี้

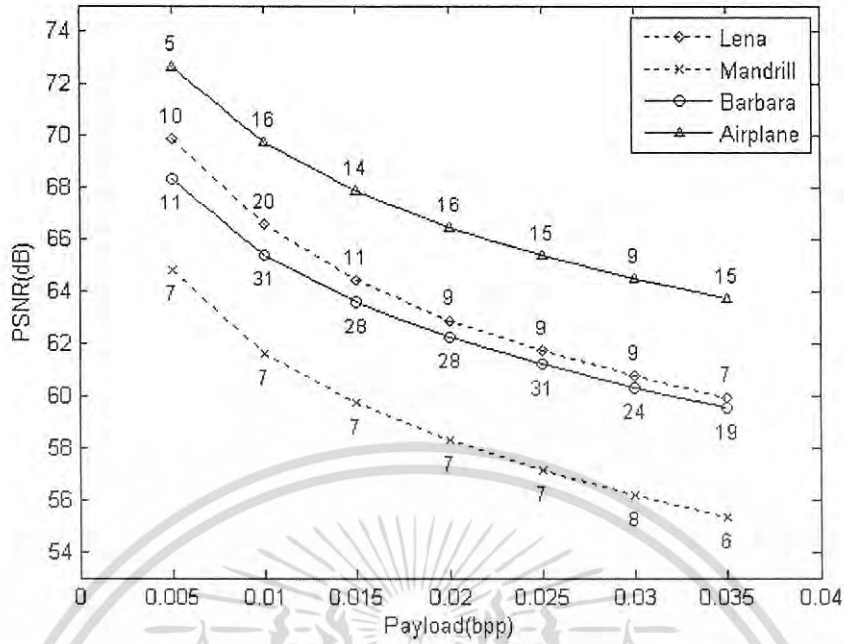
ความสัมพันธ์ของแต่ละระดับของ ex กรณีที่เป็นคู่ (Even) สามารถคำนวณโดยใช้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^{ex} = \frac{\left(\sum_{l=-\frac{ex}{2}}^{\frac{ex}{2}} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\frac{ex}{2}} \sum_{l=-\frac{ex}{2}}^{\frac{ex}{2}-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l}) \right)}{\frac{ex^2}{2} + ex + 1} \quad (2.13)$$

และความสัมพันธ์ของแต่ละระดับของ ex กรณีที่เป็นคี่ (Odd) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^{ex} = \frac{\left(\sum_{l=-\frac{(ex-1)}{2}}^{\frac{(ex-1)}{2}} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\frac{(ex-1)}{2}} \sum_{l=-\frac{(ex-1)}{2}}^{\frac{(ex-1)}{2}-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l}) \right)}{\frac{ex^2}{2} + 2ex - \frac{3}{2}} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟเชิงเส้นของผลลัพธ์ค่า PSNR ในแต่ละการฝัง โดยใช้เทคนิค EVM [42] ทดสอบกับ 4 ภาพมาตรฐานระดับเทา

โดยที่ $\tilde{\mu}_{i,j}^{ex}$ คือ ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของเซลล์ตามระดับของ ex ในภาพ ex คือ ระดับของการขยาย (คือ ความสัมพันธ์ของแต่ละเซลล์สำหรับการขยาย พิจารณาความสัมพันธ์ของจำนวนเซลล์ที่ถูกใช้สำหรับการขยายที่เป็นคู่ และคี่ โดยที่ n คือ ดัชนีแสดงจำนวนของเซลล์ที่ถูกขยายสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$n = \begin{cases} \frac{ex^2}{2} + ex + 1 & \text{when } ex = \text{even} \\ \frac{ex^2}{2} + 2ex - \frac{3}{2} & \text{when } ex = \text{odd} \end{cases} \quad (2.15)$$

เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่า PSNR สูงสุด ($PSNR_{max}$) สำหรับแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของการฝัง กระบวนการจะถูกทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้รับค่า $PSNR_{max}$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.16) ดังนี้

$$PSNR_{(T_n, T_p, \tilde{\mu}_{i,j}^{ex})} = PSNR_{max(T_n, T_p, \tilde{\mu}_{i,j}^{ex})} \quad (2.16)$$

ข้อสังเกต ขีดจำกัดของเทคนิค EVM [42] พบว่า เมื่อขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังมีขนาดใหญ่ หรือ มีขนาดใกล้เคียงเท่ากับขนาดของพิกเซลในภาพที่ต้องการฝัง ระดับของการขยายจะไม่มีประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสูงถูกใช้สำหรับการฝัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ปัญหา Overflow และ Underflow [11], [21], [23], [26]-[27]

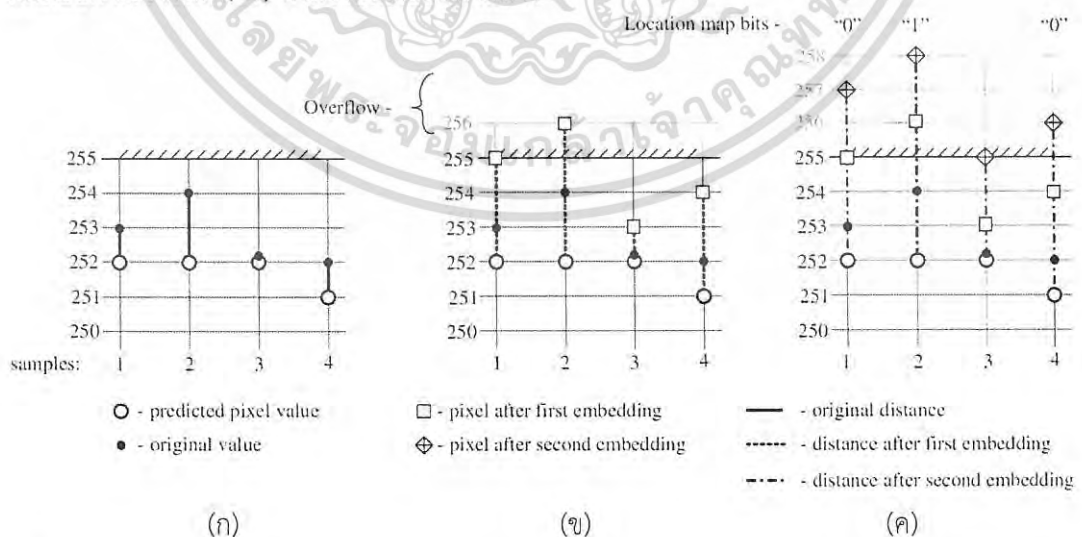
ปัญหา Overflow และ Underflow ของวิธีการเลื่อนฮิสโตแกรม [11] ถือเป็นปัญหาสำคัญและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เซลล์ใน E เซต (คือ กลุ่มของพิกเซลที่สามารถขยายได้) และ S เซต (คือ กลุ่มของพิกเซลที่สามารถเลื่อนได้) อันก่อให้เกิดปัญหา Overflow และ Underflow ควรได้รับการยกเว้นตามเงื่อนไข (2.17)

$$0 \leq u'_{i,j} + D_{i,j} \leq 255 \tag{2.17}$$

ถูกใช้สำหรับบริเวณ เช่น เซลล์ที่มีปัญหา (Problematic Cells) โดยที่ $D_{i,j}$ คือ ค่าความผิดพลาดที่ถูกโมดิไฟล์หลังการซ่อนข้อมูลลงไปโดยใช้วิธีเลื่อนฮิสโตแกรม หรืออีกความหมายหนึ่ง คือ การเลื่อนหรือ การขยาย (แสดงในหัวข้อที่ 2.3)

เซลล์ที่มีปัญหาเป็นเซลล์ซึ่งจะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงใด ๆ ได้เนื่องจากเซลล์เหล่านี้เกิด Overflow และ Underflow หลังจากการซ่อนข้อมูล บางเซลล์ที่ถูกโมดิไฟล์อาจไปซ้อนทับกับเซลล์ที่มีปัญหาหลังการฝังข้อมูล สมมุติว่า S_p คือ เซตของเซลล์ที่มีปัญหา และ S_{op} คือ เซตของเซลล์ที่ซ้อนทับกับ S_p หลังการซ่อนข้อมูล ปัญหาการซ้อนทับสามารถแก้ไขได้อย่างง่ายดายโดยใช้พื้นที่แมป พื้นที่แมปถูกใช้เพื่อแจ้งให้ทราบสถานะของเซลล์ใน S_p จากเซลล์ใน S_{op} ซึ่งมีสถานะที่แตกต่างกัน

ตามนิยามของวิธีการเลื่อนฮิสโตแกรม แต่ละเซลล์จะถูกตรวจสอบโดยใช้หนึ่งเทคนิคซึ่งถูกอ้างอิงถึงสำหรับการทดสอบสองครั้งผ่าน (Two-Pass Testing) โดยที่แต่ละการผ่าน คือ หนึ่งความพยายามที่ต้องการฝังหนึ่งบิตการทดสอบ แทนที่จะใช้หนึ่งการสุ่มสำหรับค่าบิต การทดสอบควรจะเป็นแบบที่ยาก หรือ ค่าที่มากที่สุดสำหรับการฝัง คือ 1 สำหรับค่า d_{ij} ในเชิงบวก และ 0 สำหรับค่า d_{ij} ในเชิงลบ (สังเกตว่า สัญญาณมีความบิดเบือนสูงสุดภายใต้กรณีเหล่านี้) แต่ละการผ่านของการทดสอบควรตอบสนองตามเงื่อนไข (2.17) สามกรณีที่เป็นไปได้อาจเกิดขึ้นกับหนึ่งผลลัพธ์จากการทดสอบการเข้ารหัส (ET) ตามรายละเอียดด้านล่าง



รูปที่ 2.9 แสดงการทดสอบ Overflow: (ก) ข้อมูลต้นฉบับ (ข) การฝังในครั้งแรก และ (ค) การฝังในครั้งที่สอง [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ET(a) ถ้าเซลล์ปัจจุบันสามารถโมดิไฟล์ได้สองครั้ง โดยไม่เกิดปัญหา Overflow และ Underflow เซลล์ดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องเก็บพื้นที่แมป
- ET(b) ถ้าเซลล์ปัจจุบันสามารถโมดิไฟล์ได้หนึ่งครั้ง และครั้งที่สองเกิดปัญหา Overflow และ Underflow เซลล์ดังกล่าวนี้ให้เก็บพื้นที่แมป คือ “0” เซตของเซลล์ผลลัพธ์ในกรณีนี้ถูกกำหนดว่า S_{op} ซึ่งหนึ่งเซลล์ในการแยกบริเวณที่ทับซ้อนกับเซลล์ในเซต S_p หลังการโมดิไฟล์
- ET(c) ถ้าเซลล์ปัจจุบันไม่สามารถโมดิไฟล์ได้เลยแม้แต่ครั้งเดียว เซลล์ดังกล่าวจะไม่สามารถถูกใช้สำหรับขั้นตอนการฝัง เซลล์เหล่านี้ถูกเก็บพื้นที่แมป คือ “1” เซตของเซลล์นี้ถูกเรียกว่า S_p

พิจารณาหนึ่งตัวอย่างสำหรับการทดสอบที่เป็นไปได้ของความผิดพลาด Overflow และ Underflow (ปรากฏในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14) เริ่มต้นจากค่าเทรซโฮลด์ คือ 1 (หรือ $T = 1$) มีตัวอย่างดังนี้

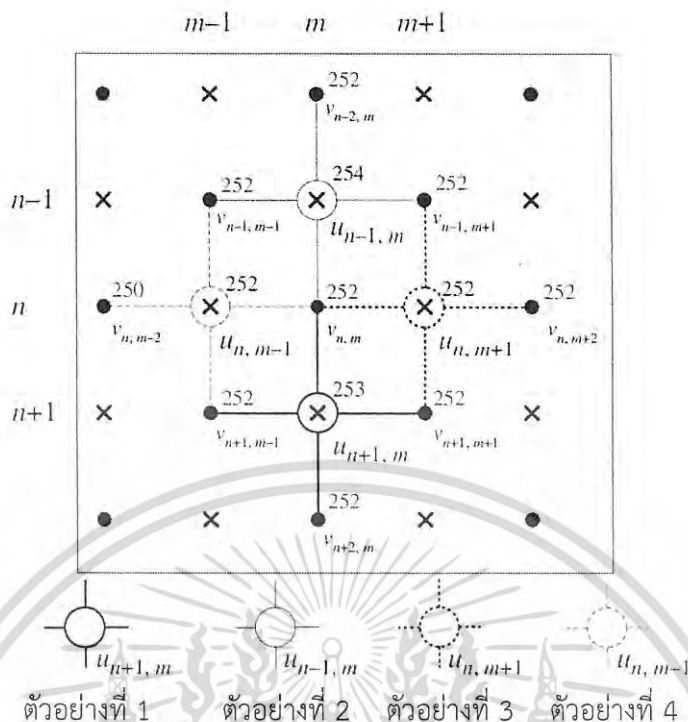
- ตัวอย่างที่ 1 โดยที่ $u_{n+1,m} = 253$, $u'_{n+1,m} = 252$, และ $d_{n+1,m} = 1$;
 ตัวอย่างที่ 2 โดยที่ $u_{n-1,m} = 254$, $u'_{n-1,m} = 252$, และ $d_{n-1,m} = 2$;
 ตัวอย่างที่ 3 โดยที่ $u_{n,m+1} = 252$, $u'_{n,m+1} = 252$, และ $d_{n,m+1} = 0$;
 และ ตัวอย่างที่ 4 โดยที่ $u_{n,m-1} = 252$, $u'_{n,m-1} = 251$, และ $d_{n,m-1} = 1$,

โดยที่ u' และ d ถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) มากกว่าสี่พิกเซลข้างเคียง v สังเกตว่า การทดสอบบิตสำหรับตัวอย่างทั้งหมด คือ 1 ค่าที่ถูกโมดิไฟล์สูงกว่า 255 ถูกพิจารณาเป็นปัญหา Overflow

สังเกตว่า ตัวอย่างที่ 3 สามารถโมดิไฟล์ได้สองครั้ง ค่าของพวกมันหลังจากการโมดิไฟล์สองครั้งยังอยู่ในขอบเขต (จากรูปที่ 2.13 (ค)) อาจกล่าวได้ว่าตัวอย่างนี้ไม่ก่อให้เกิดปัญหา ไม่มีการซ้อนทับกับเซลล์ที่มีปัญหา และสอดคล้องกับกรณี ET(a) ดังนั้น พื้นที่แมปไม่ถูกใช้สำหรับตัวอย่างนี้ ในอีกแง่มุมหนึ่ง ตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 4 เกิดปัญหา Overflow ในการโมดิไฟล์ครั้งที่สอง ตัวอย่างที่กล่าวถึงนี้สามารถโมดิไฟล์ได้เพียงครั้งเดียว และต้องการเก็บพื้นที่แมป คือ “0” ซึ่งเซลล์เหล่านี้จัดอยู่ในกรณี ET(b) ตัวอย่างที่ 2 เกิดปัญหา Overflow ในครั้งแรกของการโมดิไฟล์เพราะว่ามันไม่สามารถโมดิไฟล์ได้เลยแม้แต่ครั้งเดียว ตัวอย่างนี้จัดอยู่ในกรณี ET(c) และต้องเก็บพื้นที่แมป คือ “1” ดังนั้น พื้นที่แมปที่ถูกเก็บ คือ “010” กับสามบิตในตัวอย่างนี้ กระบวนการการทดสอบสำหรับผู้ถอดรหัส (DT) ดังต่อไปนี้

- DT (a) ถ้าเซลล์ที่ถูกถอดรหัสสามารถโมดิไฟล์ได้หนึ่งครั้ง บิตของพื้นที่แมปที่ถูกเก็บไม่ต้องการ เนื่องจาก เซลล์ที่สามารถโมดิไฟล์ได้สองครั้งสำหรับการเข้ารหัส เซลล์เหล่านี้ไม่ต้องการพื้นที่แมป อ้างอิงกรณี ET(a)
- DT (b) ถ้าเซลล์ที่ถูกถอดรหัสไม่สามารถโมดิไฟล์ได้แม้แต่ครั้งเดียว พื้นที่แมปจะต้องถูกพิจารณา เพราะว่าเซลล์แต่ละเซลล์ที่สามารถโมดิไฟล์ได้ในครั้งแรก หรือ ที่ไม่สามารถโมดิไฟล์ได้เลยในทุก ๆ กรณีที่เข้ารหัสมา (เช่น $S_{op} \cup S_p$) ถ้าเก็บบิตพื้นที่แมป คือ “0” แสดงว่าพิกเซลเหล่านั้นมาจากกรณี ET(b) ผู้ถอดรหัสสามารถแยกค่าต้นฉบับของเซลล์ได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าบิตพื้นที่แมป คือ “1” แสดงว่าเซลล์นั้นถูกละเลยเพราะว่าไม่สามารถโมดิไฟล์ใด ๆ ในขั้นตอนการเข้ารหัส อ้างอิงตามที่กรณี ET(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Overflow [23] (ที่เกี่ยวข้องกับรูปที่ 2.9)

ข้อยกเว้นสำหรับบางเซลล์ที่สามารถขยายได้ (Expandable Cells) (ถูกกำหนดในหัวข้อ 2.2) ถูกกำหนดให้เป็น S_{OP} เซต ควรได้รับการยกเว้นจาก E เซตที่สามารถขยายได้ (Expandable Set E) การฝังที่บรรจุค่าบิต (0 สำหรับ d เซิงลบ และ 1 สำหรับ d เซิงบวก) ที่เซลล์เหล่านี้สามารถเปลี่ยนจากกรณี ET(b) ให้เป็นกรณี ET(a) ได้ เซตเหล่านี้จะไม่ถูกนำเสนอ มันเป็นเพียงบางปัญหาในการเข้ารหัส อย่างไรก็ตาม ระหว่างกระบวนการถอดรหัส เซลล์จะไม่สามารถแยกประเภทพื้นที่แมปที่ต้องการฝังออกมาได้ เป็นผลมาจากการจำแนกพื้นที่ที่แมปถูกปิดเป็นอนันต์พิจารณาหนึ่งตัวอย่างของกรณีดังกล่าว สมมติว่าตัวอย่างที่ 4 ในตัวอย่างก่อนหน้านี้ (ปรากฏดังรูปที่ 2.10) จะถูกนำมาใช้สำหรับการฝังบิต "0" พิกเซลจากตัวอย่างที่ 4 จะถูกขยายไปเป็น 253 เซลล์เหล่านี้เคยจัดอยู่ในกลุ่มของกรณี ET(b) และถูกทำเครื่องหมายในพื้นที่แมประหว่างขั้นตอนการทดสอบ การถอดรหัสเซลล์นี้จะจัดประเภทเป็น DT(a) [แทนที่กรณีที่ต้องคือ DT(b)] และพื้นที่แมปจะไม่ถูกพิจารณา ครั้งต่อไปพื้นที่แมปจะถูกพิจารณา ตำแหน่งปัจจุบันจะถูกใส่โดยเลขหนึ่ง ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ค่าจะไม่ถูกต้อง และจะส่งผลให้การเรียงลำดับไม่ถูกต้องสำหรับการถอดรหัส ณ จุดนั้นเป็นต้นไป

เพื่อแก้ปัญหาคำกล่าวข้างต้นสำหรับการถอดรหัส ในระหว่างขั้นตอนการเข้ารหัสทุกเซลล์ที่สามารถขยายได้ และถูกแยกประเภทเป็นกรณี ET(b) จะมีบิต "1" ฝังอยู่ตลอดสำหรับค่า d เซิงบวก และบิต "0" สำหรับ d เซิงลบ ทุก ๆ เซลล์ที่มีการขยายจากเซต S_{OP} ไปเป็นเซต S_{OPE} ทุก ๆ เซลล์ในเซลล์ที่สามารถเลื่อนได้ (Shiftable Cells) กับกรณี ET(b) จะถูกเลื่อนตามข้อกำหนดของวิธีการเลื่อนฮิสโตรแกรม

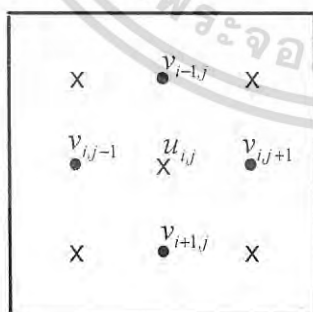
เทคนิคดังนี้ถูกกล่าวขานว่า พื้นที่แมปมักจะไม่จำเป็นสำหรับวิธีการนี้ และถึงแม้ว่ามันเป็นสิ่งจำเป็นขนาดของพื้นที่แมปยังคงมีขนาดเล็ก และไม่ต้องใช้เครื่องมือสำหรับการบีบอัด

2.8 รูปแบบการฝังแบบดับเบิล (Double Embedding Scheme) [23]

กระบวนการฝังแบบดับเบิลเกี่ยวข้องกับการใช้งานที่ต่อเนื่องกันของการฝังครอส (Cross Embedding Scheme) และการฝังดอท (Dot Embedding Scheme) และผลลัพธ์ที่ได้เกือบสองเท่าของความจุในการฝัง ความจุสูงสุดจะเพิ่มขึ้นถึง 1 บิต/พิกเซล (จาก 0.5 บิต/พิกเซล เมื่อใช้เพียงการฝังครอส) กระบวนการฝังครอส และกระบวนการฝังดอทมีความคล้ายคลึงกันตามธรรมชาติ

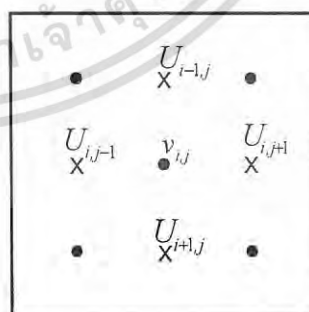
รูปแบบการฝังในครอสเซตจะถูกคำนวณค่าการทำนายโดยใช้ดอทเซต และฝังข้อมูลโดยใช้ครอสเซต (สังเกตจากรูปที่ 2.11 (ก)) สังเกตว่า พิกเซล u_{ij} อยู่ในครอสเซตมีสี่พิกเซลข้างเคียง $v_{i-1,j}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j-1}$ และ $v_{i,j+1}$ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งของดอทเซต ค่าการทำนาย u'_{ij} ที่ใช้สี่พิกเซลข้างเคียงถูกคำนวณโดยสมการที่ (2.1) และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d_{ij} ถูกคำนวณเพื่อที่จะซ่อนข้อมูล หลังการซ่อนข้อมูลโดยใช้รูปแบบการฝังครอส พิกเซลจากครอสเซต u_{ij} ถูกเปลี่ยนเป็น U_{ij} เหมือนกันในรูปแบบการฝังดอท พิกเซลศูนย์กลาง v_{ij} อยู่ในดอทเซต และสี่บริเวณพิกเซลข้างเคียง $U_{i-1,j}$, $U_{i+1,j}$, $U_{i,j-1}$ และ $U_{i,j+1}$ อยู่ในครอสเซต (สังเกตจากรูปที่ 2.11 (ข)) นอกจากนี้ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง P ควรจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนที่มีขนาดใกล้เคียง หรือ เท่ากัน P_{Cross} และ P_{Dot} สำหรับรูปแบบการฝังในครอส และในดอทตามลำดับ มันเป็นที่ชัดเจนว่า ความจุของกระบวนการฝังแบบเดี่ยว (Single Embedding) มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฝังแบบดับเบิล (Double Embedding) แต่อย่างไรก็ตาม ในทางตรงกันข้ามกับความคาดหวังของความบิดเบือนข้อมูล หลังจากข้อมูลที่ซ่อนโดยใช้รูปแบบการฝังดับเบิลมีค่าต่ำกว่าความบิดเบือนที่เกิดจากการฝังแบบเดี่ยว ด้วยเหตุผลดังกล่าว เหตุการณ์ที่แปลก คือ เมื่อใช้การฝังแบบเดี่ยว เซลล์จะมีขนาดความผิดพลาดใหญ่ ดังนั้น เพื่อที่จะซ่อนขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่ต้องการฝังในการฝังแบบดับเบิล ทั้งสองเซตจะถูกเรียงค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ซึ่งมีขนาดเล็กก่อนถูกใช้ฝัง ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่ต้องการสำหรับแต่ละเซตถูกประมาณค่าเป็นครึ่งหนึ่งของรูปแบบการฝังแบบเดี่ยว ซึ่งวิธีการของพวกเขาใช้ประโยชน์เซลล์ที่มีขนาดของความผิดพลาดต่ำ สังเกตผลลัพธ์ความบิดเบือนจากรูปแบบการฝังดับเบิลเป็นสิ่งที่ดีกว่างานในอดีต (เช่น [8], [11] และ [12])

“Cross” embedding scheme



(ก)

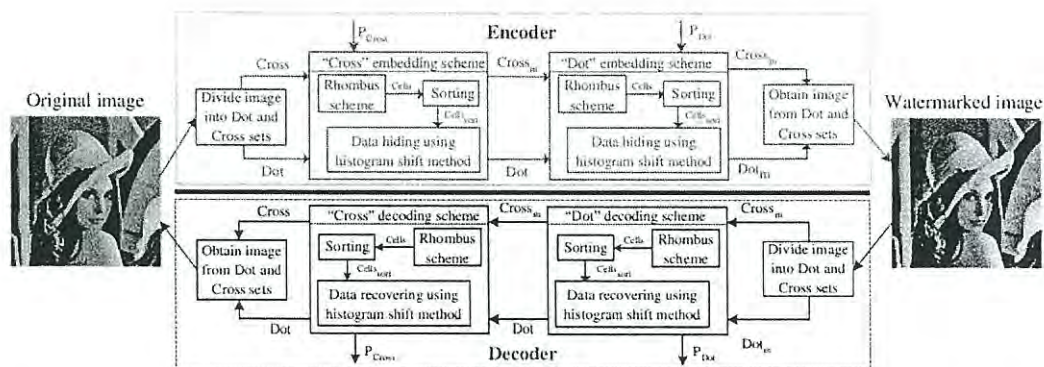
“Dot” embedding scheme



(ข)

รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกเซลที่อยู่ในครอสเซต และดอทเซต [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงกรอบการทำงานของกระบวนการเข้ารหัส และการถอดรหัสของขั้นตอนวิธี [23]

2.9 การเข้ารหัส และการถอดรหัส (Encoder and Decoder) [23]

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงกระบวนการเข้ารหัส และกระบวนการถอดรหัสของขั้นตอนวิธี [23] ในรายละเอียด และแนวความคิดที่ถูกใช้ อธิบายไว้ด้านล่างนี้ ดังรูปที่ 2.12 นำเสนอหนึ่งบล็อกไดอะแกรมง่าย ๆ เป็นตัวแทนการเข้ารหัส และการถอดรหัส ก่อนการฝังข้อมูล ทุกพิกเซลควรถูกแบ่งออกเป็นสองเซต ได้แก่ ครอสเซต และดอทเซต (สังเกตจากลูกศรชี้ไปที่ครอสเซต และดอทเซตตามลำดับ ทางด้านซ้ายมือของบล็อกไดอะแกรมแสดงการเข้ารหัสสำหรับครอสเซตในรูปที่ 2.12) ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง สำหรับกระบวนการเข้ารหัสครอสเซต และดอทเซต คือ P_{Cross} และ P_{Dot} ตามลำดับ

สำหรับการกู้คืนข้อมูล ค่าเทรซโฮลด์ T_{nCross} และ T_{pCross} และขนาดของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังจริง $|P_{Cross}|$ หรือ (สำหรับกระบวนการฝังครอส) $|P_{Dot}|$ (สำหรับกระบวนการฝังดอท) ควรถูกส่งให้ผู้รับ (หรือ ผู้ถอดรหัส) ค่า LSB ของ 34 ตำแหน่งแรกในค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายจาก d_{sort} ถูกแทนที่ด้วยค่าเทรซโฮลด์ T_{nCross} (7 บิต) และ T_{pCross} (7 บิต) ขนาดของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง $|P_{Dot}|$ (20 บิต) หรือ $|P_{Cross}|$ (20 บิต) ค่าต้นฉบับ LSB ของ 34 ตำแหน่งควรถูกเก็บลงในหนึ่งเซตเรียกว่า S_{LSB} เซต และถูกรวมเป็นส่วนหนึ่งกับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ทั้ง 34 ตำแหน่งเหล่านี้ถูกแยกออกจาก d_{sort} จำนวนของบิตที่ถูกเก็บเป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ

กระบวนการเข้ารหัสในครอสเซตถูกออกแบบดังนี้

1. ทำการหาทุกเซลล์ตามกระบวนการฝังในครอสเซต
2. สำหรับแต่ละเซลล์คำนวณดังนี้

2.1) ค่าที่ถูกทำนาย u' โดยใช้สมการ (2.1)

2.2) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d โดยใช้สมการ (2.2)

2.3) ความแปรปรวนในพื้นที่ μ โดยใช้สมการ (2.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เรียงลำดับเซลล์ตามค่าความแปรปรวนในพื้นที่ μ และสร้างแถวของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกเรียง d_{sort} (แสดงในหัวข้อที่ 2.5) โดยข้าม 34 ตำแหน่งแรกใน d_{sort} เก็บค่าต้นฉบับ LSB 34 ตำแหน่งแรกของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายไว้ที่ S_{LSB} เซต และรวม S_{LSB} เซตเป็นส่วนหนึ่งของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง
4. หาค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมสำหรับ T_{nCross} (เทรซโฮลด์ฝั่งลบ) และ T_{pCross} (เทรซโฮลด์ฝั่งบวก) ตามขนาดของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง P_{Cross} โดยใช้แถว d_{sort} ที่ถูกเรียง
5. แยกเซลล์ในเซตที่สามารถฝังได้ E และเซตที่สามารถเลื่อนได้ S และสร้างพื้นที่แมป L สำหรับแต่ละเซลล์เริ่มต้นจากตำแหน่งที่ 35 ตามลำดับเซลล์ที่ถูกเรียง

5.1) ตรวจสอบสำหรับความเป็นไปได้ของปัญหา Overflow และ Underflow (ในแต่ละกรณี ET(a) ET(b) และ ET(c)) โดยใช้หัวข้อที่ 2.7 ถ้าพบว่าอยู่ในกลุ่ม ET(b) และ ET(c) ให้เก็บพื้นที่แมปสำหรับเซลล์เหล่านั้น แต่ถ้าเซลล์เป็น ET(a) ให้ไปขั้นตอนที่ 5.3

5.2) ตรวจสอบสำหรับเซลล์ที่สามารถขยายได้โดยใช้หัวข้อ 2.2 ตรงที่หนึ่งเซลล์ปัจจุบันอยู่ในเซตที่สามารถขยายได้ E และเซตที่สามารถเลื่อนได้ S (เอกสิทธิ์เฉพาะเซตเหล่านี้) ถ้าเซลล์อยู่ในกลุ่มของเซตที่สามารถขยายได้ E และอยู่ในกรณี ET (b) ให้ย้ายเซลล์เหล่านี้จากเซตที่สามารถขยายได้ไปที่เซตพิเศษ S_{ope} (ดังในหัวข้อที่ 2.7)

5.3) ถ้าเซลล์ปัจจุบัน คือ เซลล์สุดท้าย และเงื่อนไข $|P_{Cross}| + |L| = |E|$ ไม่ถูกพบ ให้เพิ่มขนาดของเทรซโฮลด์ $|T_{nCross}|$ หรือ T_{pCross} และกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 อีกครั้ง ถ้าเงื่อนไขถูกพบให้ไปต่อในขั้นตอนที่ 6

6. ทำการฝังขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง P_{Cross} และพื้นที่แมป L ลงในเซตที่สามารถขยายได้ E โดยใช้ขั้นตอนวิธีการเลื่อนฮิสโตรแกรมในการเข้ารหัส (แสดงในหัวข้อที่ 2.3) หนึ่งเซตของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ที่ถูกโมดิไฟด์ D โมดิไฟด์เซลล์จากเซต S_{ope} ตามที่แนะนำไว้ในหัวข้อที่ 2.7

7. คำนวณพิกเซลที่ถูกโมดิไฟด์ U โดยใช้สมการที่ (2.4) จะได้ครอสเซตที่ถูกโมดิไฟด์

8. โมดิไฟด์ค่า LSB 34 ตำแหน่งแรกของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ที่แยกออกมาในขั้นตอนที่ 3 โดยแทนด้วยเลขฐานสองของค่าเทรซโฮลด์ T_{nCross} , T_{pCross} และขนาดของ $|P_{Cross}|$

ผลลัพธ์ของกระบวนการฝังครอส พิกเซล v จากดอทเซตจะไม่ถูกเปลี่ยน และพิกเซลที่ถูกโมดิไฟด์ U จากครอสเซต (สังเกตลูกศรชี้กับการคู่กันของ “ดอท” และ “ครอส” ตามลำดับ ในบริเวณตรงกลางของเส้นทางการเข้ารหัสในรูปที่ 2.12)

กระบวนการฝังดอทถูกออกแบบตามหัวข้อที่ 2.8 รูปแบบการฝังดอทใช้พิกเซลที่ถูกโมดิไฟด์จากครอสเซตสำหรับคำนวณค่าที่ถูกทำนาย และพิกเซลต้นฉบับจากดอทเซต (แสดงในรูปที่ 2.12) สำหรับการฝังข้อมูล ผลลัพธ์เอาต์พุตของรูปแบบการฝังดอท คือ ตำแหน่งในดอทเซต และในครอสเซตจะถูกโมดิไฟด์ (จากลูกศรที่ชี้จากฝั่งซ้ายมือไปยังขวามือของเส้นทางการเข้ารหัสที่มีการฝัง

“Dot_m” และ “Cross_m” ในรูปที่ 2.12) ซึ่งก็คือภาพที่ถูกฝังลงไปแล้ว Dot_m ถูกฝังลงในคอร์ทเซต และ $Cross_m$ ถูกฝังลงในครอสเซต

กระบวนการถอดรหัสแบบดับเบิล (Double Decoding Scheme) คือ การทำย้อนกลับของกระบวนการเข้ารหัส (ปรากฏในส่วนของการถอดรหัสในรูปที่ 2.12) การคำนวณสำหรับกระบวนการครอส และคอร์ทของการถอดรหัสมีรูปแบบที่เหมือนกัน วิธีการของพวกเขาอธิบายเพียงกระบวนการถอดรหัสในครอสเซตเท่านั้น

กระบวนการถอดรหัสถูกออกแบบไว้ดังนี้

1. ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของกระบวนการเข้ารหัสครอส
2. เรียงลำดับเซลล์ตามค่าความแปรปรวนในพื้นที่ μ และเมื่อได้รับเซตของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ที่ถูกเรียงลำดับ d_{sort} (ปรากฏในหัวข้อที่ 2.5) ให้อ่านค่า LSB 34 ตำแหน่งแรกจาก d_{sort} และกู้คืนค่าเทรซโฮลด์ T_{pCross} และ T_{nCross} และขนาดของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง $|P_{Cross}|$ โดยข้าม 34 เซลล์แรกที่ถูกเรียงลำดับ
3. แยกเซลล์ในเซตที่สามารถฝังได้ E และเซตที่สามารถเลื่อนได้ S ตามค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสม T_{pCross} และ T_{nCross} และขนาดของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง $|P_{Cross}|$
4. ค้นหาเซลล์ที่มีปัญหาโดยใช้การทดสอบการถอดรหัสสำหรับ Overflow/Underflow และลบตำแหน่งเหล่านั้นออกจาก E เซต และ S เซต (ปรากฏในหัวข้อที่ 2.7)
5. การใช้วิธีการเลื่อนฮิตโรแกรมของการถอดรหัส เพื่อกู้คืนต้นฉบับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d พื้นที่แมป L และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง P_{Cross} ลบเซต S_{LSB} จากขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง P_{Cross}
6. ทำการกู้คืนต้นฉบับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d จากเซลล์ที่มีปัญหา โดยใช้การถอดรหัสของวิธีการเลื่อนฮิตโรแกรมตามพื้นที่แมป L
7. คำนวณต้นฉบับพิกเซล u_{ij} โดยใช้สมการที่ (2.2)
8. วางค่า LSB 34 ตำแหน่งแรกของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ที่ถูกเรียง (ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย เหล่านี้ถูกข้าม กับ 34 เซลล์แรกในขั้นตอนที่ 2) กับต้นฉบับ LSB จากเซต S_{LSB} ลงตำแหน่งเดิม เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการถอดรหัส

2.10 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [43]

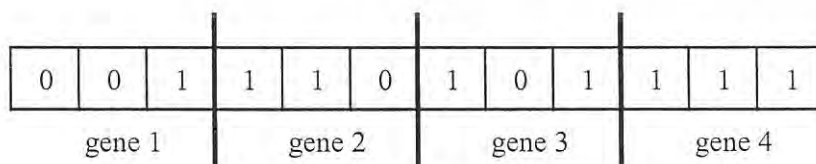
การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computation) ถูกใช้เพื่อค้นหาผลลัพธ์ของปัญหาที่มีความซับซ้อน ในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Numerical Optimization) อาทิเช่น การจัดรูปเส้นทางการจัดส่งสินค้าให้ได้ปริมาณสูง และค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงต่ำสุด การคำนวณสัดส่วนของสารเคมีเพื่อให้ได้องค์ประกอบของสารที่มีประสิทธิภาพ การบริหารทรัพยากรการผลิตให้มีประสิทธิภาพ เป็นต้น วิธีการค้นหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเหล่านี้นิยมใช้การคำนวณเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิวัฒนาการทั้งสิ้น การคำนวณเชิงวิวัฒนาการมีต้นกำเนิดจากทฤษฎีวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต คิดค้นโดย Charles Darwin ในปี ค.ศ. 1842 ต่อจากนั้นนักวิจัยได้นำทฤษฎีมาประยุกต์กับการคำนวณของคอมพิวเตอร์จึงเป็นวิธีการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มการค้นหาผลลัพธ์แบบเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic) หลักการของการค้นหาผลลัพธ์อาศัยการวนซ้ำสุ่มค่าพารามิเตอร์เพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

การคำนวณเชิงวิวัฒนาการมีหลากหลายวิธีการ และที่ใช้กันแพร่หลาย หนึ่งในนั้น คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ในส่วนนี้จะขอล่าเฉพาะเพียง GA เท่านั้น สำหรับรายละเอียดการประยุกต์ใช้งานของ GA จะถูกอธิบายในบทถัดไป GA ทำงานโดยใช้การจำลองปัญหาให้อยู่ในรูปแบบเหมือนสิ่งมีชีวิตที่ประกอบด้วยโครโมโซม (Chromosome) และยีน (Gene) การค้นหาผลลัพธ์ของปัญหาโดยใช้กระบวนการทางพันธุศาสตร์ประกอบด้วย การสืบพันธุ์ (Reproduction) การกลายพันธุ์ (Mutation) การแลกเปลี่ยนยีน (Reproduction) และการคัดเลือกประชากร (Selection) วิธีการทางพันธุศาสตร์เหล่านี้ทำหน้าที่ปรับปรุงประชากรจากรุ่นหนึ่ง สู่อีกรุ่นหนึ่งเพื่อให้อยู่รอดต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ดังเช่น วิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีการปรับปรุงลักษณะทั้งภายใน และภายนอกให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม การค้นหาผลลัพธ์ของปัญหาด้วย GA จึงเปรียบเสมือนกับการนำพารามิเตอร์ของปัญหาแทนในรูปแบบสิ่งมีชีวิต และกำหนดให้สภาพแวดล้อมเป็นปัญหา หรือ เป็นฟังก์ชันที่ต้องการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

หลักการพื้นฐานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม หรือ GA เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่เลียนแบบกลไกการคัดเลือกตามธรรมชาติที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งมีรากฐานมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติ กล่าวคือ ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variable) ของปัญหาจะถูกแทนโดยแถวของตัวเลข (string) หรือเรียกโดยใช้คำศัพท์ทางชีววิทยาว่าโครโมโซม GA จะทำการสร้างโครโมโซมขึ้นมาชุดหนึ่งเรียกว่า Population โดยแต่ละโครโมโซมจะประกอบด้วยตัวเลขไบนารีบิตคือ 0 และ 1 ดังรูปที่ 2.13 แต่ละยีนประกอบไปด้วยเลขไบนารี 3 ตัว หรือเรียกว่า 3 อัลลีลส์ (Alleles) ซึ่งเมื่อถอดรหัสแล้วจะได้ค่าของตัวแปรการตัดสินใจออกมา อาจจะเป็นจำนวนจริง, จำนวนเต็ม, เซตหรือเมตริกซ์ก็ได้ ขึ้นอยู่กับผู้ศึกษาเป็นผู้กำหนดให้เหมาะสมกับปัญหา แต่ GA ในยุคหลังนิยมใช้จำนวนจริงแทนการใช้เลขแบบไบนารีทำให้โครโมโซมสั้นลงเพราะไม่ต้องแบ่งยีนเป็นหลาย ๆ อัลลีลส์



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างโครโมโซมที่ประกอบด้วย 4 ยีน แต่ละยีนประกอบด้วยตัวเลขไบนารี 3 ตัว [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการถอดรหัสจิ้นทุกตัวในโครโมโซมออกมาเป็นตัวแปร และทำการแทนค่าตัวแปรเหล่านั้น ลงไปในฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) แล้ว โครโมโซมหนึ่งก็จะให้ผลลัพธ์ออกมาเรียกว่า ค่าที่เป็นไปได้ (Possible Solution) แต่อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา โครโมโซมเหล่านี้จะต้อง ผ่านกระบวนการของ GA ซึ่งเป็นกระบวนการที่เลียนแบบกลไกการคัดเลือกตามธรรมชาติอีก 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการคัดเลือก (Selection Operation) ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนจิ้น (Crossover Operation) และขั้นตอนการตัดแปลงจิ้น (Mutation Operation)

1. ขั้นตอนการคัดเลือก (Selection Operation) หลักการของขั้นตอนการคัดเลือก คือ โครโมโซมที่มีค่า Fitness ดีกว่าใน Population (สูงกว่า หรือ ต่ำกว่าแล้วแต่ประเภทของปัญหา) จะ มีโอกาสถูกคัดเลือกให้เข้าไปสู่กระบวนการในขั้นตอนถัดไปมากที่สุด วิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปเรียกว่า Proportional Selection ซึ่งกำหนดค่าความเป็นไปได้ในการถูกคัดเลือก (Probability of Selection) ให้กับแต่ละโครโมโซมเท่ากับสัดส่วนของค่า Fitness ของโครโมโซมนั้นเทียบกับผลรวม ของค่า Fitness ของโครโมโซมทั้งหมดใน Population นอกจากนี้ยังมีวิธีการคัดเลือกแบบอื่นที่นิยมใช้ กัน ได้แก่ Rank Selection ที่ทำการกำหนดค่าความเป็นไปได้ในการถูกคัดเลือกให้กับแต่ละโครโมโซม ตามลำดับของค่า Fitness และ Tournament Selection ที่ทำการแบ่งโครโมโซมออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ และทยอยคัดเลือกจากกลุ่มย่อยเหล่านั้นจนครบตามจำนวนที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่าง Roulette Wheel Selection [43]

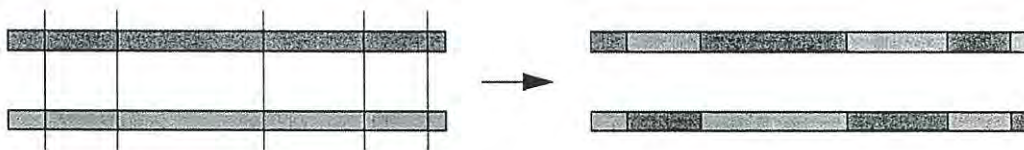
2. ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนจิ้น (Crossover Operation) ขั้นตอนนี้จะทำการสุ่มเลือก โครโมโซมใน Population นั้นมาทำการจับคู่แลกเปลี่ยนจิ้นกัน โดยโอกาสที่แต่ละโครโมโซมจะถูกสุ่ม ขึ้นมาจับคู่กันขึ้นอยู่กับค่า Probability of Crossover ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ศึกษานำเข้าสู่ กระบวนการ ส่วนประเภทของการแลกเปลี่ยนจิ้นจำแนกไว้ 3 ประเภท ดังนี้

2.1) การแลกเปลี่ยนจิ้น 1 ตำแหน่ง (One-Point Crossover) ซึ่งจะทำการแลกเปลี่ยนจิ้น ของโครโมโซมที่ถูกจับคู่กัน ณ ตำแหน่งจิ้นที่ถูกสุ่มขึ้นมาจนถึงจิ้นในตำแหน่งสุดท้าย

2.2) การแลกเปลี่ยนจิ้น 2 ตำแหน่ง (Two-Point Crossover) จะทำการแลกเปลี่ยนจิ้นที่อยู่ ระหว่างตำแหน่งทั้ง 2 ที่ถูกสุ่มขึ้นมา

2.3) การแลกเปลี่ยนจิ้นหลายตำแหน่ง (Uniform Crossover) นั้น จิ้นที่อยู่ในตำแหน่ง เดียวกันของโครโมโซมที่ถูกจับคู่กันจะถูกสุ่มให้มีการแลกเปลี่ยนกันแบบจิ้นต่อจิ้นดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการแลกเปลี่ยนยีน (Crossover Operation) [43]

mutation point		binary	Gray
Original string -	0 0 0 1 1 0 0 0 1 0	0.9659	0.6634
Mutated string -	0 0 1 1 1 0 0 0 1 0	2.2146	1.8439

รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างการดัดแปลงยีน (Mutation Operation) [43]

3. ขั้นตอนการดัดแปลงยีน (Mutation Operation) ขั้นตอนนี้ยีนจะถูกสุ่มดัดแปลงให้ผิดแปลกไปจากเดิมโดยสิ้นเชิง และความเป็นไปได้ที่ยีนจะถูกสุ่มขึ้นมาทำการดัดแปลงนั้นขึ้นอยู่กับค่า Probability of Mutation ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ศึกษานำเข้าสู่กระบวนการใน GA ที่ใช้รหัสแบบไบนารี การดัดแปลงยีนจะกระทำโดยการเปลี่ยนค่า 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0 สำหรับ GA ที่ใช้รหัสแบบจำนวนจริง (Real-Value Coding) แสดงดังรูปที่ 2.16 นั้นมีรูปแบบการดัดแปลงยีนที่มีรายละเอียดมากกว่าแบบไบนารีโดยได้จำแนกไว้ 3 แบบ ดังนี้

- 3.1) Uniform Mutation ซึ่งค่าของยีนจะถูกดัดแปลงภายในพิสัย (Range) ที่กำหนด
- 3.2) Non-uniform Mutation ซึ่งจะดัดแปลงยีนด้วยค่าที่ค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ ในรุ่นถัด ๆ ไป ของกระบวนการ GA
- 3.3) Modified Uniform Mutation ซึ่งค่าของยีนจะถูกดัดแปลงโดยค่าคงที่เพียงค่าเดียว

บทที่ 3

วิธีการที่นำเสนอ

ในอดีตที่ผ่านมา หนึ่งในขั้นตอนวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ [23] ซึ่งถูกกล่าวขานในแง่ของความบิดเบือนต่ำของภาพหลังการฝัง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพในงานของพวกเขา ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำนาย และการเรียงลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย พารามิเตอร์ของตัวทำนาย และลำดับการเรียงของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่เหมาะสมสำหรับแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ได้รับความบิดเบือนต่ำสุดที่เป็นไปได้ ตัวทำนายแบบใหม่ที่สามารถปรับตัวได้ถูกนำเสนอเรียกว่า “ตัวทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก” (Gaussian weight predictor) และอีกหนึ่งเทคนิคสำหรับการเรียงลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย การขยายค่าเฉลี่ยความแปรปรวน (Expanded Variance Mean: EVM) ถูกใช้ร่วมด้วย หนึ่งในเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์เหล่านี้ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้

ในเนื้อหาจะอธิบายถึงหลักการ และขั้นตอนต่าง ๆ อย่างละเอียดของวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งรวมหลายเทคนิคที่มีความสำคัญต่อกระบวนการฝังลายน้ำแบบสามารถกู้ภาพกลับคืนได้ วิธีการของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อได้ดังนี้

1. ตัวทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก (Gaussian weight predictor)
2. การประยุกต์ใช้เทคนิค EVM สำหรับการเรียงลำดับข้อมูล
3. การทดสอบสถานะของฟิกเซลโดยใช้การโมดิไฟล์แบบดับเบิล (Double Modification Testing: DMT)
4. การเพิ่มประสิทธิภาพของค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม (Threshold Optimization)
5. การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) สำหรับการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้
6. การเข้ารหัส และการถอดรหัส (Encoding and Decoding)

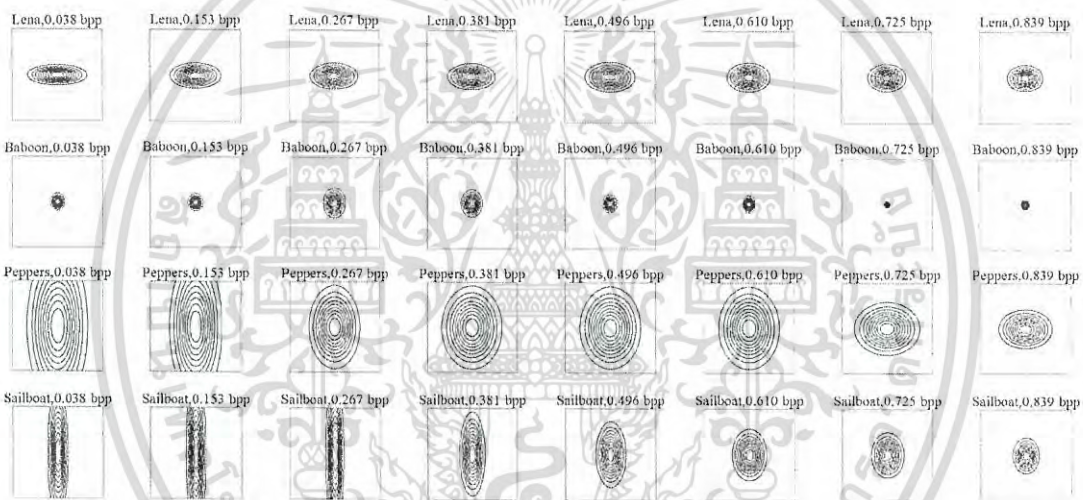
3.1 ตัวทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก (Gaussian Weight Predictor)

ระบบสมการเชิงเส้น ความเข้าใจในระบบพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบสมการเชิงเส้น ยังคงมีความสำคัญในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ที่นำไปสู่สูตร $Ax = b$ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่เข้าใจได้ตรงกัน แต่ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับการวัดความผิดพลาด (Measurement Error) ในการแทนค่า A และ b ทำให้ระบบยุ่งเหยิงเพียงพอที่จะทำให้ระบบสมการขัดแย้งกัน ในสถานการณ์เช่นนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมองหาค่าของ x ที่มีค่าใกล้เคียงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เมื่อวิธีการในเหตุผลที่ทำให้ค่าของ $\|Ax - b\|$ เกี่ยวข้องกับ ผลคูณภายใน (Inner Product) ของยูคลิด ขนาดของ $\|Ax - b\|$ สามารถที่จะมองให้เหมือนกับขนาดของค่าความผิดพลาด ที่แสดงจากการพิจารณา x เหมือนกับการประมาณค่าของระบบสมการเชิงเส้น $Ax = b$ ถ้าระบบมันคง และ x เป็นคำตอบที่ถูกต้อง จะได้ค่าความผิดพลาดเป็น 0 จาก $\|Ax - b\| = \|0\| = 0$ เปรียบเทียบปัญหาในงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยพิจารณาปัญหากำลังสองน้อยสุดเป็นระบบสมการเชิงเส้นแทนค่าด้วย n สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายทั้งหมดควรมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (d_{ij}) ระหว่างตัวทำนายที่นำเสนอ และตัวทำนายของ Sachnev และคณะ [23] โดยฝังข้อมูลขนาด 40,000 บิตสำหรับ 6 ภาพมาตรฐานระดับเทา

Predictor type	PE value (d_{ij})	Lena	Barbara	Baboon	Boat	Peppers	Sailboat
Four-neighbor predictor	-2	25050	20284	9396	17352	18957	14868
	-1	32106	24808	10736	19245	20576	17352
	0	33132	25386	10727	19838	20974	19284
	1	28806	22568	10646	18452	20073	17706
	2	22408	19084	9132	15968	18340	14310
	Total	141502	112130	50637	90855	98920	83520
Gaussian weight predictor (σ_x, σ_y)	d_{ij}	$\sigma_x=1.575, \sigma_y=0.777$	$\sigma_x=0.707, \sigma_y=0.543$	$\sigma_x=0.486, \sigma_y=0.538$	$\sigma_x=0.313, \sigma_y=0.205$	$\sigma_x=1.617, \sigma_y=4.512$	$\sigma_x=0.622, \sigma_y=4.911$
	-2	26050	21284	10982	19830	20252	16755
	-1	33346	25554	11080	21938	21720	19470
	0	35816	27550	11394	22400	21800	20004
	1	31010	25082	11382	21354	21152	17551
	2	23408	20084	10728	19038	19108	14752
	Total	149630	119554	55566	104560	104032	88332



รูปที่ 3.1 แสดงรูปทรงเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักกับสีภาพมาตรฐานระดับเทา เมื่อใช้ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่แตกต่างกัน มองจากด้านบนสู่ล่างแสดงรูปทรงเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักของภาพ Lena, Baboon, Pepper และ Sailboat จากด้านซ้ายมือไปขวามือ คือ ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังเริ่มต้นจาก 0.038, 0.153, 0.267, 0.381, 0.496, 0.610, 0.725 และ 0.839 บิต/พิกเซล

"0" เมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้ได้ฟังก์ชันการทำนายเข้าใกล้สิ่งที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายทุก ๆ ตำแหน่งมีค่าต่ำ หรือ เข้าใกล้ศูนย์สำหรับแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของการฝังควรมีฟังก์ชันการแก้ปัญหาที่ไม่เหมือนกัน สมมติฐาน เมื่อการแก้ปัญหากำลังสองน้อยสุด x_1 ที่สอดคล้องกับ A_1 (ของภาพที่ 1) และ x_2 ที่สอดคล้องกับ A_2 (ของภาพที่ 2) ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสำหรับภาพที่ 2 ที่ได้จากสัมประสิทธิ์ค่า x_1 ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายเหล่านั้นไม่ทำให้ได้ค่าที่ต่ำลง เมื่อเทียบกับการใช้สัมประสิทธิ์ค่า x_2 ดังนั้น เพื่อให้ได้รับผลลัพธ์ที่ดีที่สุด การเลือกใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับระบบนั้น ๆ เป็นสิ่งจำเป็น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอหนึ่งฟังก์ชันการทำนายที่สามารถปรับตัวได้ตามลักษณะของภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการ ฝั่ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เข้าใกล้ค่าในอุดมคติ ฟังก์ชันเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักถูกใช้ในงานนี้ โปรดสังเกต รูปทรงของเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักมีลักษณะที่ให้ความสำคัญสำหรับบริเวณศูนย์กลางมากที่สุด และ ค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ หรือในอีกความหมายหนึ่ง บริเวณที่ไกลออกไปจะมีความสำคัญน้อยกว่าบริเวณ ที่ใกล้จุดศูนย์กลาง รูปทรงเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักสามารถปรับเปลี่ยนได้ขึ้นอยู่กับ 2 ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานในแนวแกน x และในแนวแกน y (หมายถึงค่า σ_x และ σ_y) อย่างไรก็ตาม เพื่อลดจำนวนบิต ในส่วนหัวไฟล์ที่จะต้องถูกส่งให้กับผู้รับสำหรับการถอดรหัส การปรับเปลี่ยนรูปทรงจะถูกควบคุมโดยใช้ สองพารามิเตอร์นี้เท่านั้น ประโยชน์อื่น ๆ ของการใช้เพียงสองพารามิเตอร์ คือ ง่ายต่อการควบคุมแบบ ถ่วงน้ำหนัก (หรือ ค่าถ่วงน้ำหนัก) ที่เหมาะสมสำหรับตัวทำนาย ฟังก์ชันเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก สามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$w(x, y) = e^{-\left(x^2/2\sigma_x^2 + y^2/2\sigma_y^2\right)} \quad (3.1)$$

หนึ่งฟังก์ชันการทำนายที่สามารถปรับตัวได้ คือ

$$u'_{i,j} = \left[\frac{\sum_{k=1}^{\varphi_p} \sum_{l=-\varphi_p}^{\varphi_p-(2k-1)} \left(w(l, l+2k-1) v_{i+l, j+l+2k-1} + w(l+2k-1, l) v_{i+l+2k-1, j+l} \right)}{\sum_{k=1}^{\varphi_p} \sum_{l=-\varphi_p}^{\varphi_p-(2k-1)} \left(w(l, l+2k-1) + w(l+2k-1, l) \right)} \right] \quad (3.2)$$

โดยที่ $(i, j) \in A_1 \times A_2 \cup A_3 \times A_4$ ถูกใช้สำหรับหนึ่งครอสเซต และ $(i, j) \in A_1 \times A_4 \cup A_3 \times A_2$ ถูกใช้สำหรับ หนึ่งดอทเซต $[\bullet]$ คือ ฟังก์ชันเพดาน (Ceiling Function) และ A_1, A_2, A_3, A_4 ถูกกำหนดไว้ดังนี้

$$\begin{aligned} A_1 &= \{ \varphi_p + 2n - 1 | n = 1, 2, \dots, (N - (N + 1) \bmod 2 + 1) / 2 - \varphi_p \} \\ A_2 &= \{ \varphi_p + 2n - 1 | n = 1, 2, \dots, (M - (M + 1) \bmod 2 + 1) / 2 - \varphi_p \} \\ A_3 &= \{ \varphi_p + 2n | n = 1, 2, \dots, (N - N \bmod 2) / 2 - \varphi_p \} \\ A_4 &= \{ \varphi_p + 2n | n = 1, 2, \dots, (M - M \bmod 2) / 2 - \varphi_p \} \end{aligned}$$

N คือ จำนวนของแถว และ M คือ จำนวนของหลักในหนึ่งภาพ φ_p คือ ระดับของการขยายพิกเซล สำหรับตัวทำนายมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\varphi_p \in \{1, 2, \dots, \min(\lfloor (N-1)/2 \rfloor, \lfloor (M-1)/2 \rfloor)\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

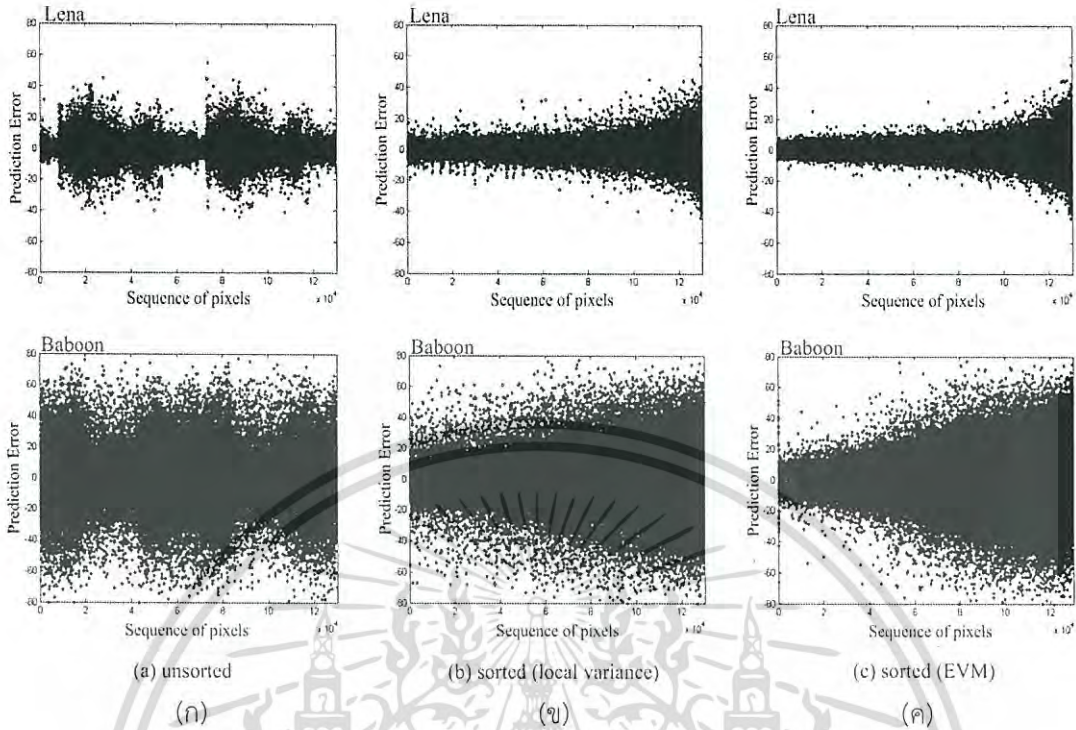
จากสมการที่ (3.1) ฟังก์ชันเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักถูกกำหนดโดยใช้ σ_x และ σ_y ใน $W(x,y)$ และระดับของการขยายสำหรับหนึ่งตัวทำนาย (φ_p) หมายถึง ระดับของการขยาย φ_p ที่กว้างออกไปจะต้องการพิกเซลจำนวนที่มากขึ้นเพื่อคำนวณหนึ่งค่าการทำนาย จำนวนของพิกเซลที่สอดคล้องกับระดับของการขยาย φ_p มีค่าเท่ากับ $2\varphi_p^2 + 2\varphi_p$ รูปที่ 3.1 แสดงรูปทรงของฟังก์ชันเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับสี่ภาพมาตรฐาน รูปทรงของเกาส์เซียนที่แตกต่างขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง ตัวอย่างรูปทรงการทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักของภาพ Sailboat มีการขยายในทางแกน y มากกว่าในทางแกน x ฟังก์ชันเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับภาพ Peppers มีการขยายออกกว่าภาพอื่น ๆ ทั้งสองแกน ในทางตรงข้ามภาพ Baboon มีรูปทรงเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักที่แคบ นั่นหมายความว่าสำหรับภาพ Baboon ควรใช้พิกเซลบริเวณใกล้เคียงกับค่าต้นฉบับสำหรับการทำนาย ดังนั้น หนึ่งรูปทรงที่เหมาะสมของตัวทำนายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการฝังข้อมูล (ประสิทธิภาพของการฝังข้อมูลขึ้นอยู่กับจำนวนของ $d_{ij} = 0$ ตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 สังเกตว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำนายแบบดั้งเดิมของ [23] ความสัมพันธ์ของตัวทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักใช้งานได้ดีกว่าค่าเฉลี่ยของสี่พิกเซลข้างเคียง หมายถึง หนึ่งตัวทำนายที่มีประสิทธิภาพ คือ ตัวทำนายที่ให้จำนวนของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่เท่ากับศูนย์ ($d_{ij} = 0$) เมื่อ $d_{ij} = 0$ หมายถึงความบิดเบือนของภาพหลังถูกฝังลายน้ำจะมีค่าต่ำ

3.2 การประยุกต์ใช้เทคนิค EVM [42] สำหรับการเรียงลำดับข้อมูล

การเรียงลำดับข้อมูลเป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่ช่วยลดความบิดเบือนของภาพหลังการฝัง สองความได้เปรียบอธิบายของการเรียงลำดับข้อมูล คือ ความได้เปรียบแรกสำหรับการลดความบิดเบือน พบว่าเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายถูกเรียงลำดับตามขนาดของค่า EVM (สำหรับหนึ่งภาพ) ความคลาดเคลื่อนจากการทำนายจะถูกเรียงใหม่จากน้อยไปหามาก ดังนั้น เมื่อข้อมูลถูกฝังโดยใช้เทคนิค HS ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่มีค่าต่ำจะได้เปรียบค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่มีค่าสูงในแง่มุมมองของการขยายเพื่อฝังข้อมูล ประการต่อมาสำหรับความได้เปรียบที่สอง คือ การลดขนาดของพื้นที่ที่แมป สังเกตว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่สูงมีโอกาสจะก่อให้เกิดปัญหา Overflow และ Underflow มากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายต่ำ ข้อเท็จจริงสำหรับการฝังข้อมูล พื้นที่ที่แมปจะต้องถูกฝังเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่ต้องการฝัง ดังนั้น ถ้าขนาดของพื้นที่ที่แมปลด ขนาดของข้อมูลที่ถูกฝังจะเล็กลงตามซึ่งส่งผลต่อความบิดเบือน

Kamstra และ Heijmans [8] แนวความคิดของพวกเขา คือ การใช้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างคู่พิกเซลเพื่อเรียงลำดับค่าความแตกต่าง (DE) ใหม่ เทคนิคของพวกเขาช่วยลดความบิดเบือน และขนาดของพื้นที่ที่แมป Kotvicha และคณะ [42] นำเสนอหนึ่งการปรับปรุงโดยใช้เทคนิคการเฉลี่ยค่าความแปรปรวนที่สามารถขยายได้ (EVM) หนึ่งพารามิเตอร์ของการเรียงลำดับถูกคำนวณใหม่เพื่อให้ทำนายได้ดีกว่าการใช้ค่าความแปรปรวนในพื้นที่ขอบข้าง [23] รูปที่ 3.2 แสดงความแตกต่างของลำดับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสำหรับภาพ Lena และ Baboon ในรูปที่ 3.2 (ข) ทั้งสองภาพถูกเรียงโดยใช้ความแปรปรวนในพื้นที่ [23] ในรูปที่ 3.2 (ค) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกเรียงโดยใช้เทคนิค EVM [42] ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกเรียงโดยใช้เทคนิค EVM มีการจัดเรียงที่ดีกว่าค่าความแปรปรวนในพื้นที่ [23] การเรียงลำดับข้อมูล EVM สามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการเรียงลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสำหรับภาพ Lena และภาพ Baboon

- (ก) แสดงลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ไม่ถูกเรียง
 (ข) แสดงลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายถูกเรียงโดยใช้ความแปรปรวนในพื้นที่ข้างเคียง 4 ตำแหน่ง [23]
 (ค) แสดงลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกเรียงโดยใช้ EVM [42] สองระดับ ($\varphi_s = 2$)

$$\bar{\mu}_{i,j}^{\varphi_s} = \frac{\sum_{l=-\lfloor \varphi_s/2 \rfloor}^{\lfloor \varphi_s/2 \rfloor} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\lfloor \varphi_s/2 \rfloor} \sum_{l=-\lfloor \varphi_s/2 \rfloor}^{\lfloor \varphi_s/2 \rfloor - 2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l})}{2\lfloor \varphi_s/2 \rfloor^2 + 2\lfloor \varphi_s/2 \rfloor + 1 - 4(\varphi_s \bmod 2)} \quad (3.3)$$

โดยที่ $(i, j) \in B_1 \times B_2 \cup B_3 \times B_4$ ถูกใช้สำหรับหนึ่งครอสเซต และ $(i, j) \in B_1 \times B_4 \cup B_3 \times B_2$ ถูกใช้สำหรับหนึ่งดอทเซต เซต B_1, B_2, B_3, B_4 ถูกกำหนดได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} B_1 &= \{ \lfloor \varphi_s/2 \rfloor + 2n \mid n=1,2,\dots,(N-(N+1) \bmod 2 - 1)/2 - \lfloor \varphi_s/2 \rfloor \} \\ B_2 &= \{ \lfloor \varphi_s/2 \rfloor + 2n \mid n=1,2,\dots,(M-(M+1) \bmod 2 - 1)/2 - \lfloor \varphi_s/2 \rfloor \} \\ B_3 &= \{ \lfloor \varphi_s/2 \rfloor + 2n+1 \mid n=1,2,\dots,(N-N \bmod 2 - 2)/2 - \lfloor \varphi_s/2 \rfloor \} \\ B_4 &= \{ \lfloor \varphi_s/2 \rfloor + 2n+1 \mid n=1,2,\dots,(M-M \bmod 2 - 2)/2 - \lfloor \varphi_s/2 \rfloor \} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $\mu_{i,j}$ เป็นหนึ่งค่าความแปรปรวนในพื้นที่ของพิกเซล (i, j) สามารถคำนวณได้โดยสมการดังนี้

$$\mu_{i,j} = \sum_{k=1}^4 (\Delta v_k - \Delta \bar{v}_k)^2 / 4$$

โดยที่ $\Delta v_1 = |v_{i,j-1} - v_{i-1,j}|$, $\Delta v_2 = |v_{i-1,j} - v_{i,j+1}|$, $\Delta v_3 = |v_{i,j+1} - v_{i+1,j}|$, $\Delta v_4 = |v_{i+1,j} - v_{i,j-1}|$, $\Delta v_k = (\Delta v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3 + \Delta v_4) / 4$ φ_s คือ ระดับของการขยายของค่าความแปรปรวนในพื้นที่ที่สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varphi_s \in \{1, 2, \dots, \min(2[(N+1)/2] - 2, 2[(M+1)/2] - 2)\}$$

หนึ่งเป้าหมายสำคัญ คือ การเรียงลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ในทางปฏิบัติ การจัดเรียงพิกเซลโดยตรงของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายไม่สามารถทำได้อันเนื่องมาจากหลังการฝังข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายจะถูกเปลี่ยน แต่เนื่องจากค่า EVM ยังคงไม่เปลี่ยนหลังการฝังข้อมูล และสัมพันธ์ใกล้ชิดกับขนาดของความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (d_{ij}) ของพิกเซลดังกล่าว ดังนั้น EVM จึงสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการเรียงลำดับแทนการใช้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายได้ สังเกตว่า ระดับของการขยายค่าความแปรปรวน φ_s สูงขึ้น จำนวนของพิกเซลที่ใช้สำหรับคำนวณในสมการที่ (3.3) จะเพิ่มขึ้นตาม หนึ่งจำนวนของพิกเซลที่สัมพันธ์กับสมการ (3.3) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$2\lceil \varphi_s / 2 \rceil^2 + 2\lceil \varphi_s / 2 \rceil + 1 - 4(\varphi_s \bmod 2)$$

จำนวนที่เหมาะสมของพิกเซลสำหรับการคำนวณ EVM จะเปลี่ยนตามลักษณะของภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประยุกต์ใช้ระดับของการขยายความแปรปรวน φ_s ของเทคนิค EVM ร่วมกับ GA ซึ่งในส่วนของรายละเอียดจะถูกอธิบายต่อในหัวข้อ 3.5 สังเกตว่า เครื่องมือนี้ช่วยให้การเรียงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายถูกต้องมากกว่า [23] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของควมบิดเบือนหลังการฝัง โดยเฉพาะข้อมูลที่ต้องการฝังที่มีขนาดเล็ก ในทางตรงกันข้าม เมื่อขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่มีความจุสูง ๆ การฝังจะไม่มีประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกเรียงถูกนำมาใช้สำหรับการฝัง

3.3 การทดสอบสถานะของพิกเซลโดยใช้การโมดิไฟล์แบบดับเบิล (DMT) [23]

หนึ่งปัญหาสำคัญที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้สำหรับกระบวนการฝังข้อมูลแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ คือ ปัญหา Overflow หรือ Underflow เมื่อพิกเซลถูกโมดิไฟล์สำหรับข้อมูลภาพ 8 บิต ช่วงของความเป็นไปได้ คือ $[0, 255]$ สำหรับปัญหา Overflow หรือ Underflow กับวิธีการเลื่อนฮิตโตรแกรมเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ พิกเซลที่ก่อให้เกิดปัญหา คือ พิกเซลที่ไม่สามารถโมดิไฟล์ได้ เนื่องจากหลังการซ่อนข้อมูลจะก่อปัญหา Overflow หรือ Underflow หนึ่ง เมื่อหนึ่งผู้ถอดรหัสคำนวณ D_{ij} ถ้า D_{ij} ที่ถูกขยาย หรือ ถูกเลื่อนมาแล้วนั้น ผลลัพธ์ยังคงต้องอยู่ในช่วง $[0, 255]$ พิกเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้จะไม่มีปัญหา Overflow และ Underflow อย่างแน่นอน และพื้นที่แมปไม่ถูกใช้ ถ้าผลลัพธ์อยู่นอกช่วงฟิกเซลเหล่านี้จะก่อให้เกิดปัญหา Overflow และ Underflow พื้นที่แมปจะถูกใช้ พบว่า ขนาดของพื้นที่แมป คือ ปัญหาหลักถูกพบในงานก่อนหน้า [7-14] และ [32] ขนาดของพวกมันมีนัยต่อความบิดเบือนหลังการฝัง และต้องการเครื่องมือที่ช่วยในการบีบอัด ถึงแม้ว่าจะถูกบีบอัดแล้ว พื้นที่แมปดังกล่าวยังคงต้องเป็นส่วนหนึ่งของขนาดข้อมูลที่ต้องการฝัง ดังนั้น ขนาดของพื้นที่แมปหลังการบีบอัดจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของวิธีการ

การทดสอบสถานะของฟิกเซลก่อนการฝังอ้างอิงพื้นฐานของ 2 เทคนิค PEE [10] และ HS [11] การโมดิไฟล์แบบดับเบิล (Double Modification testing: DMT) ถูกนำเสนอโดย Sachnev และคณะ [23] เทคนิคนี้ถูกใช้เพื่อตรวจสอบสถานะของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของฟิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ที่ก่อให้เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow โดยการการเลื่อน หรือ การขยายสองครั้ง พวกเขาแบ่งกรณีที่เป็นไปได้ สำหรับหนึ่งผลลัพธ์ของการทดสอบการเข้ารหัส (ET) สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ET(a) ถ้าฟิกเซลปัจจุบันสามารถโมดิไฟล์ได้สองครั้ง โดยไม่เกิดปัญหา Overflow และ Underflow ฟิกเซลดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องเก็บพื้นที่แมป
- ET(b) ถ้าฟิกเซลปัจจุบันสามารถโมดิไฟล์ได้หนึ่งครั้ง และครั้งที่สองเกิดปัญหา Overflow และ Underflow ฟิกเซลดังกล่าวนี้ให้เก็บพื้นที่แมป คือ “0”
- ET(c) ถ้าฟิกเซลปัจจุบันไม่สามารถโมดิไฟล์ได้เลยแม้แต่ครั้งเดียว เซลล์ดังกล่าวจะไม่สามารถถูกใช้สำหรับขั้นตอนการฝัง ฟิกเซลเหล่านี้ถูกเก็บพื้นที่แมป คือ “1”

จาก 3 กรณีดังกล่าวข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแยกออกเป็น 7 เซต ได้ดังนี้

- *EE* คือ หนึ่งเซตของฟิกเซลที่สามารถขยายได้สองครั้งแล้วไม่ก่อให้เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow
- *ES* คือ หนึ่งเซตของฟิกเซลที่สามารถขยายได้ในครั้งแรก และสามารถเลื่อนได้ในครั้งที่สองโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow
- *SS* คือ หนึ่งเซตของฟิกเซลที่สามารถเลื่อนได้สองครั้งโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow
- *E* คือ หนึ่งเซตของฟิกเซลที่สามารถขยายได้ในครั้งแรก แต่ครั้งที่สองของการโมดิไฟล์เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow
- *NE* คือ หนึ่งเซตของฟิกเซลที่ไม่สามารถขยายได้ตั้งแต่ครั้งแรกที่มีการโมดิไฟล์
- *S* คือ หนึ่งเซตของฟิกเซลที่สามารถเลื่อนได้ในครั้งแรก แต่เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow ในการเลื่อนครั้งที่สอง
- *NS* คือ เซตของฟิกเซลที่ไม่สามารถเลื่อนได้ในครั้งแรกที่มีการโมดิไฟล์

ทั้ง 7 เซตครอบคลุมทุกความเป็นไปได้ของสถานะฟิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ เซต *EE*, *ES* และ *SS* คือ กลุ่มของ ET(a) ที่ไม่พบปัญหา เซต *E* และ *S* คือ กลุ่ม ET(b) ที่มีปัญหาในการโมดิไฟล์ในครั้งที่สอง เซตสุดท้าย คือ *NE* และ *NS* คือ กลุ่ม ET(c) ซึ่งไม่สามารถโมดิไฟล์ได้ ๆ ได้ แต่ละเซตถูกนิยามตามพฤติกรรมการโมดิไฟล์ แต่ละฟิกเซลถูกตรวจสอบโดยทดสอบสองครั้ง หนึ่งโอเทมที่ใช้ฝังสำหรับการทดสอบ 1 บิต แทนที่ใช้ 1 บิตแบบสุ่ม การทดสอบบิตควรเป็นแบบที่ยากที่สุดสำหรับการฝัง นั่นก็คือ “1” สำหรับค่า *d* เชิงบวก และ “0” สำหรับค่า *d* เชิงลบ (สังเกตว่าสัญญาณเอาท์พุทมีความ

ปิดเป็นอนันต์ภายใต้กรณีเหล่านี้) เริ่มต้นการทดสอบค่าเทรซโฮลด์ คือ 1 สำหรับแต่ละเซตสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวอย่าง EE เซต $t_p = 1; u = 252; u' = 252; d = 0$

$$d < t_p; U = u' + D = 252 + 2(0) + 1 = 253$$

(พิกเซลหลังถูกขยายในครั้งแรก)

$$(D = 1) = t_p; U = u' + D = 252 + 2(1) + 1 = 255$$

(พิกเซลหลังถูกขยายในครั้งที่สอง) (ไม่ต้องการแมป)

ตัวอย่าง ES เซต $t_p = 1; u = 251; u' = 250; d = 1$

$$d = t_p; U = u' + D = 250 + 2(1) + 1 = 253$$

(พิกเซลหลังถูกขยายในครั้งแรก)

$$(D = 3) > t_p; U = u' + D + t_p + 1 = 250 + 3 + 1 + 1 = 255$$

(พิกเซลหลังถูกเลื่อนในครั้งที่สอง) (ไม่ต้องการแมป)

ตัวอย่าง SS เซต $t_p = 1; u = 251; u' = 249; d = 2$

$$d > t_p; U = u' + d + t_p + 1 = 249 + 2 + 1 + 1 = 254$$

(พิกเซลหลังถูกเลื่อนในครั้งแรก)

$$(d + t_p + 1 = 4) > t_p; U = u' + (d + t_p + 1) + t_p + 1 = 249 + 4 + 1 + 1 = 255$$

(พิกเซลหลังถูกเลื่อนในครั้งที่สอง) (ไม่ต้องการแมป)

ตัวอย่าง E เซต $t_p = 1; u = 252; u' = 251; d = 1$

$$d = t_p; U = u' + D = 251 + 2(1) + 1 = 254$$

(พิกเซลหลังถูกขยายในครั้งแรก)

$$(D = 3) > t_p; U = u' + D + t_p + 1 = 251 + 3 + 1 + 1 = 256$$

(Overflow) (แมป = "0")

ตัวอย่าง S เซต $t_p = 1; u = 253; u' = 251; d = 2$

$$d > t_p; U = u' + d + t_p + 1 = 251 + 2 + 1 + 1 = 255$$

(พิกเซลหลังถูกเลื่อนในครั้งแรก)

$$(d + t_p + 1 = 4) > t_p; U = u' + (d + t_p + 1) + t_p + 1 = 251 + 4 + 1 + 1 = 257$$

(Overflow) (แมป = "0")

ตัวอย่าง NE เซต set $t_p = 1; u = 254; u' = 253; d = 1$

$$d = t_p; U = u' + D = 253 + 2(1) + 1 = 256$$

(Overflow) (แมป = "1")

ตัวอย่าง NS เขต $t_p = 1; u = 254; u' = 252; d = 2$

$d > t_p; U = u' + d + t_p + 1 = 252 + 2 + 1 + 1 = 256$

(Overflow) (แมป= "1")

นิยามที่ 1 การกำหนดเขตสำหรับการเข้ารหัส:

- $EE(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (0 \leq 2d_{i,j} + 1 \leq t_p) \wedge (u'_{i,j} + 4d_{i,j} + 3 \leq 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq 2d_{i,j} < 0) \wedge (u'_{i,j} + 4d_{i,j} \geq 0)\}$
- $ES(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (0 \leq d_{i,j} \leq t_p) \wedge (2d_{i,j} + 1 > t_p) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} + t_p + 2 \leq 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq d_{i,j} < 0) \wedge (2d_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} + t_n \geq 0)\}$
- $SS(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (d_{i,j} > t_p) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + 2t_p + 2 \leq 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (d_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + 2t_n \geq 0)\}$
- $E(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (0 \leq 2d_{i,j} + 1 \leq t_p) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} + 1 \leq 2^B - 1) \wedge (u'_{i,j} + 4d_{i,j} + 3 > 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (0 \leq d_{i,j} \leq t_p) \wedge (2d_{i,j} + 1 > t_p) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} + 1 \leq 2^B - 1) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} + t_p + 2 > 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq 2d_{i,j} < 0) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} \geq 0) \wedge (u'_{i,j} + 4d_{i,j} < 0)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq d_{i,j} < 0) \wedge (2d_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} \geq 0) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} + t_n < 0)\}$
- $NE(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (0 \leq d_{i,j} \leq t_p) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} + 1 > 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq d_{i,j} < 0) \wedge (u'_{i,j} + 2d_{i,j} < 0)\}$
- $S(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (d_{i,j} > t_p) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + t_p + 1 \leq 2^B - 1) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + 2t_p + 2 > 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (d_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + t_n \geq 0) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + 2t_n < 0)\}$
- $NS(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (d_{i,j} > t_p) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + t_p + 1 > 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (d_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + d_{i,j} + t_n < 0)\}$

นิยามที่ 2 การกำหนดเขตสำหรับการถอดรหัส:

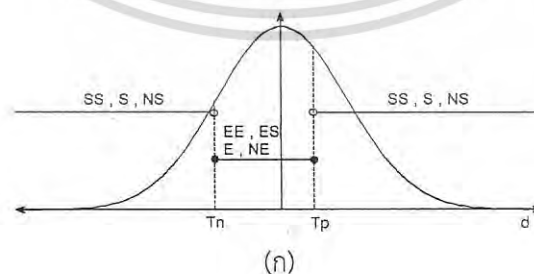
- $EE(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (0 \leq D_{i,j} \leq t_p) \wedge (u'_{i,j} + 2D_{i,j} + 1 \leq 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq D_{i,j} < 0) \wedge (u'_{i,j} + 2D_{i,j} \geq 0)\}$
- $ES(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (t_p < D_{i,j} \leq 2t_p + 1) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_p + 1 \leq 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (2t_n \leq D_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_n \geq 0)\}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

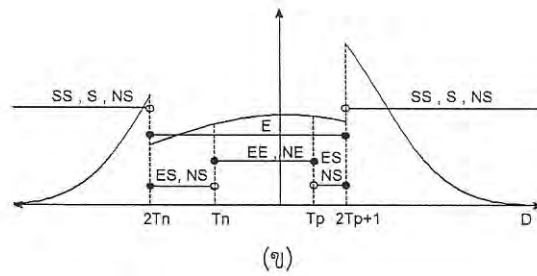
- $SS(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (D_{i,j} > 2t_p + 1) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_p + 1 \leq 2^B - 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (D_{i,j} < 2t_n) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_n \geq 0)\}$
- $E(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (0 \leq D_{i,j} \leq t_p) \wedge (u'_{i,j} + 2D_{i,j} + 1 > 2^B - 1) \wedge (L_{i,j} = 0)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_p < D_{i,j} \leq 2t_p + 1) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_p + 1 > 2^B - 1) \wedge (L_{i,j} = 0)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq D_{i,j} < 0) \wedge (u'_{i,j} + 2D_{i,j} < 0) \wedge (L_{i,j} = 0)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (2t_n \leq D_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_n < 0) \wedge (L_{i,j} = 0)\}$
- $NE(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (0 \leq D_{i,j} \leq t_p) \wedge (u'_{i,j} + 2D_{i,j} + 1 > 2^B - 1) \wedge (L_{i,j} = 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (t_n \leq D_{i,j} < 0) \wedge (u'_{i,j} + 2D_{i,j} < 0) \wedge (L_{i,j} = 1)\}$
- $S(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (D_{i,j} > 2t_p + 1) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_p + 1 > 2^B - 1) \wedge (L_{i,j} = 0)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (D_{i,j} < 2t_n) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_n < 0) \wedge (L_{i,j} = 0)\}$
- $NS(t_p, t_n) \in \{(i, j) \in J \mid (D_{i,j} > t_p) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_p + 1 > 2^B - 1) \wedge (L_{i,j} = 1)\} \cup \{(i, j) \in J \mid (D_{i,j} < t_n) \wedge (u'_{i,j} + D_{i,j} + t_n < 0) \wedge (L_{i,j} = 1)\}$

เพื่อความเข้าใจ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงเส้นทางสถานะของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d ในแต่ละเขตปรากฏในรูปที่ 3.5 สำหรับการเข้ารหัส และรูปที่ 3.6 สำหรับการถอดรหัส เส้นทางสี่เหลี่ยมแสดงสถานะที่ไม่พบปัญหาอ้างอิงเขต EE , ES และ SS เส้นทางสี่เหลี่ยมแสดงสถานะที่เหมือนจะไม่พบปัญหาสำหรับการฝัง แต่ไม่ถูกใช้สำหรับการฝังข้อมูลอ้างอิงเขต E และ S และท้ายสุดเส้นทางแดงแสดงสถานะเส้นทางที่มีปัญหาอ้างอิงเขต NE และ NS เขตดังกล่าวสามารถบ่งชี้สถานะของพิกเซลในภาพโดยที่แต่ละเขตสามารถระบุชนิดของพิกเซลได้โดยผู้เข้ารหัส และผู้ถอดรหัสตามนิยาม 1 และนิยาม 2

สถานะของพิกเซลในแต่ละเขตที่แตกต่างกันอธิบายโดยหนึ่งฮิสโตแกรมของความคลาดเคลื่อนจากการทำนายแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงขอบเขตของเซตทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย
 (ก) แสดงฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายต้นฉบับก่อนถูกโมดิไฟล์
 (ข) แสดงฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายหลังถูกโมดิไฟล์

การโมดิไฟล์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสำหรับการฝังสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (3.4) และค่าพิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ คือ $U_{ij} = u'_{ij} + D_{ij}$

$$D_{i,j} = \begin{cases} 2d_{i,j} + b & \text{if } (i, j) \in EE \cup ES \\ 2d_{i,j} + \begin{cases} 0 & \text{if } (i, j) \in E \wedge d_{i,j} < 0 \\ 1 & \text{if } (i, j) \in E \wedge d_{i,j} \geq 0 \end{cases} & \text{if } (i, j) \in E \\ d_{i,j} + \begin{cases} t_n & \text{if } (i, j) \in SS \cup S \wedge d_{i,j} < 0 \\ t_p + 1 & \text{if } (i, j) \in SS \cup S \wedge d_{i,j} \geq 0 \end{cases} & \text{if } (i, j) \in SS \cup S \\ d_{i,j} & \text{if } (i, j) \in NE \cup NS \end{cases} \quad (3.4)$$

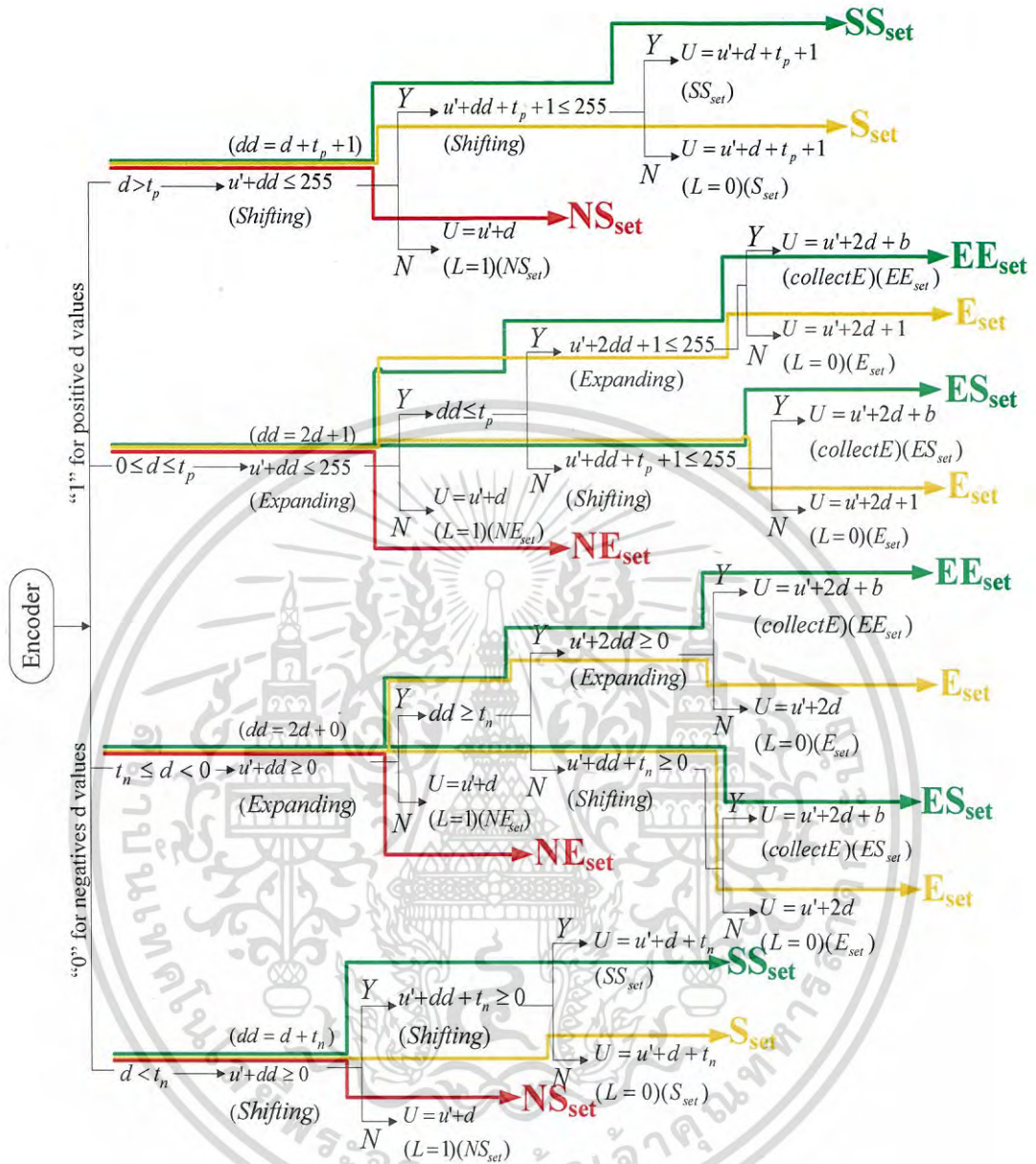
พื้นที่แมปสามารถระบุได้โดยใช้สมการที่ (3.5) ดังนี้

$$D_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } (i, j) \in E \cup S \\ 1 & \text{if } (i, j) \in NE \cup NS \\ \text{undefined} & \text{if } (i, j) \in EE \cup ES \cup SS \end{cases} \quad (3.5)$$

โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายต้นฉบับสามารถกู้คืนกลับโดยใช้สมการที่ (3.6) ดังนี้

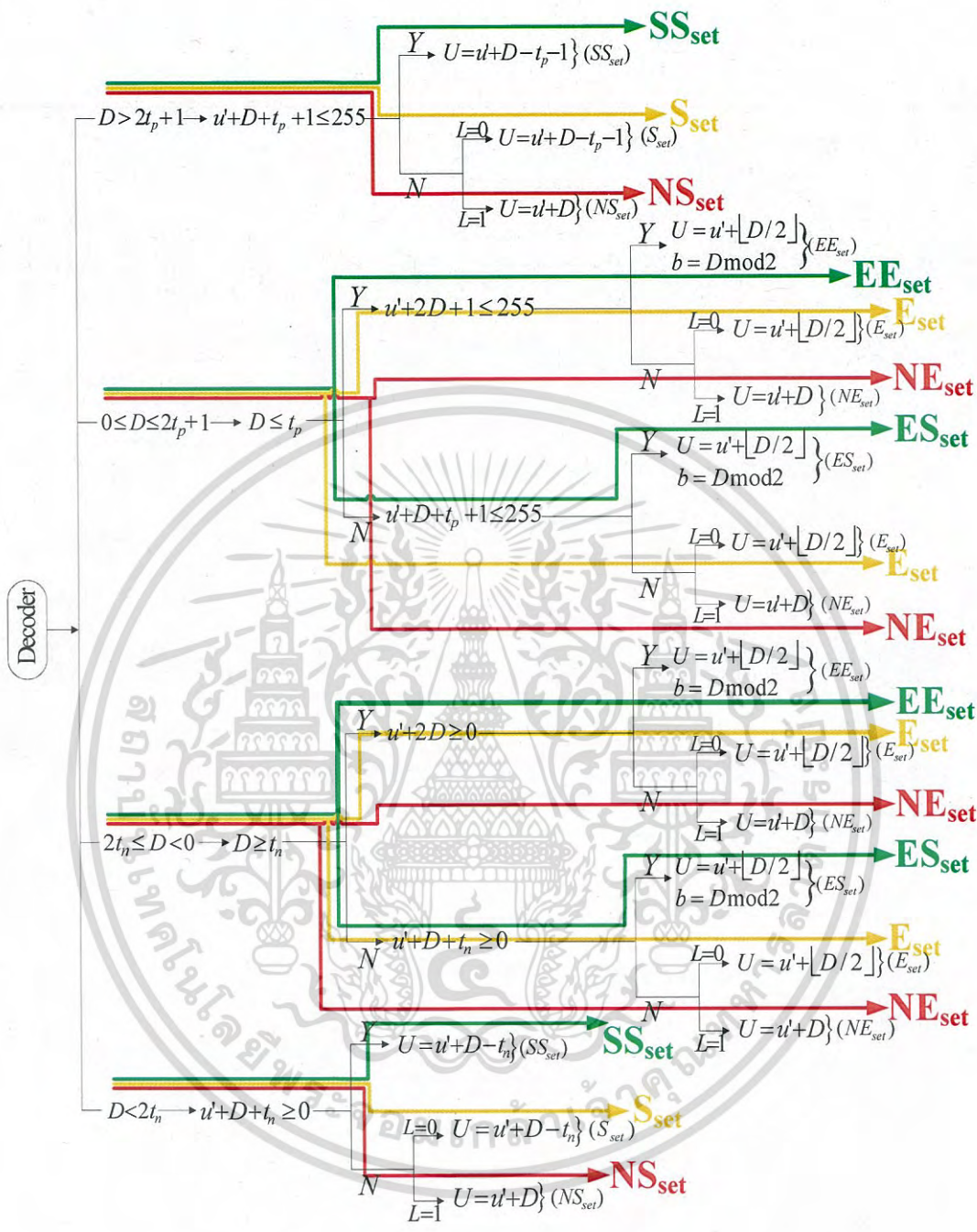
$$d_{i,j} = \begin{cases} \lfloor D_{i,j} / 2 \rfloor & \text{if } (i, j) \in EE \cup ES \cup E \\ D_{i,j} - \begin{cases} t_n & \text{if } (i, j) \in SS \cup S \wedge D_{i,j} < 0 \\ t_p + 1 & \text{if } (i, j) \in SS \cup S \wedge D_{i,j} \geq 0 \end{cases} & \text{if } (i, j) \in SS \cup S \\ D_{i,j} & \text{if } (i, j) \in NE \cup NS \end{cases} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงเส้นทางการตรวจสอบสถานะของ d_{ij} ทั้ง 7 เซต สำหรับหนึ่งการเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงสถานะของ D_{ij} จาก 7 เซต สำหรับหนึ่งการถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตว่า ผลลัพธ์ของขนาดพื้นที่แมปจะขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง แต่ผลการฝังถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ผลลัพธ์ขนาดของพื้นที่แมปที่มีขนาดเล็กสำหรับ 6 ภาพมาตรฐานระดับเทา ถึงแม้ว่า พื้นที่แมปจะเป็นสิ่งจำเป็นก็ตาม แต่ขนาดของมันในงานนี้มีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง ในกรณีที่แย่ที่สุด สำหรับพื้นที่แมปที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (4,406 บิต) การทดสอบในงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบได้ในภาพ Peppers โดยที่ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังอยู่ที่ 250,000 บิต

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของพื้นที่แมปกับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังสำหรับการทดสอบ 6 ภาพมาตรฐานระดับเทา

Payload (bpp)	Location map (bits)					
	Lena	Peppers	Baboon	Barbara	Boat	Sailboat
0.191	0	0	6	0	0	0
0.381	0	0	11	0	0	0
0.572	0	76	247	1	0	0
0.763	0	173	1251	76	0	16
0.839	0	578	-	1015	0	372
0.916	0	4406	-	-	0	2976
0.954	1	-	-	-	4	-

พิจารณาหนึ่งตัวอย่างสำหรับการทดสอบที่เป็นไปได้สำหรับปัญหา Overflow (ดูที่ *ตัวอย่าง E เซต) การฝังค่าบิต (0 สำหรับ d เชิงบวก และ 1 สำหรับ d เชิงลบ) พิกเซลเหล่านี้สามารถเปลี่ยนจาก E เซต (แมป = 0) กลายเป็น ES เซต (ไม่ต้องการแมป) ตามหนึ่งผลลัพธ์ของกรณีที่คลุมเครือนี้ พื้นที่แมปทำให้เกิดความสับสน

*ตัวอย่าง E เซต เมื่อ $b = 0$; $t_p = 1$; $u = 252$; $u' = 251$; $d = 1$

$d = t_p$; $U = u' + D = 251 + 2(1) + 0 = 253$

(พิกเซลหลังถูกขยายในครั้งแรก)

$(D = 2) > t_p$; $U = u' + D + t_p + 1 = 251 + 2 + 1 + 1 = 255$

(พิกเซลหลังถูกเลื่อนในครั้งที่สอง) (จาก E เซต กลายเป็น ES เซต)

สมมติเหตุการณ์ต่อจากตัวอย่าง E เซต ในตัวอย่างก่อนหน้าหลังถูกใช้สำหรับการฝังบิต "0" (ดูที่ *ตัวอย่าง E เซต) พิกเซลจาก *ตัวอย่าง E เซต เมื่อถูกขยายจะมีค่าเท่ากับ 253 พิกเซลนี้ก่อนหน้านี้นี้เคยถูกตรวจสอบแล้วอยู่ใน E เซต และต้องเก็บแมป ในระหว่างขั้นตอนการทดสอบการถอดรหัสพิกเซลนี้จะได้รับการจัดประเภทเป็น ES เซต (แทนที่ E เซต ซึ่งเป็นเซตที่ถูกต้อง) และแมปจะไม่ถูกพิจารณา ส่งผลให้หนึ่งการถอดรหัสที่ไม่ถูกต้องนับจากจุดนี้เป็นต้นไป เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในความคลุมเครือของการถอดรหัส ในระหว่างกระบวนการเข้ารหัสทุกพิกเซลที่สามารถขยายได้ถูกจำแนกเป็น E เซต ควรมีบิต "1" ฝังตัวตลอดสำหรับค่า d เชิงบวก และบิต "0" สำหรับทุกค่า d เชิงลบ นี่คือเหตุผลสำคัญที่ E เซตจะไม่ถูกนำมาใช้สำหรับการฝังข้อมูลในงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม (Threshold Optimization)

บทบาทที่สำคัญของการใช้ค่าเทรชโฮลด์สำหรับขั้นตอนวิธีการฝังข้อมูลแบบสามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้นั้น ค่าเทรชโฮลด์ถูกนำมาใช้สำหรับการกำหนดขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย เพื่อการขยาย หรือ การเลื่อน ซึ่งค่าเทรชโฮลด์ดังกล่าวประกอบไปด้วยเซตของคู่ตัวเลขที่เป็นไปได้ เช่น จำนวนเต็มเชิงบวก หมายถึง ค่าเทรชโฮลด์เชิงบวก t_p และจำนวนเต็มเชิงลบ หมายถึง ค่าเทรชโฮลด์เชิงลบ t_n กรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายมีการขยายในช่วงที่แคบ (หรือ ความจุในการฝังต่ำ) จะส่งผลทำให้ภาพมีความบิดเบือนต่ำตามปริมาณการฝังนั้น ๆ แต่ในทางตรงกันข้าม กรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายมีการขยายตัวในช่วงที่กว้างจะส่งผลการบิดเบือนสูงตาม (หรือ ความจุสูง) อย่างไรก็ตาม ความบิดเบือนดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย ซึ่งค่า t_p และ t_n ควรมีขนาดที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้สามารถฝังข้อมูลได้ และความบิดเบือนต่ำ ในทำนองเดียวกันขนาดของค่า t_p และ t_n ควรมีช่วงที่กว้างพอสำหรับข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการฝังด้วย การเลือกเซตที่เหมาะสมของค่า t_p และ t_n วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกค่าเทรชโฮลด์ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด หรือ มีการบิดเบือนของภาพหลังการฝังต่ำสุด สังเกตว่า เซตที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง ซึ่งกำหนดโดย τ โดยที่ $\tau = 0, 1, \dots, 254$ เป็นดัชนีแสดงแต่ละช่วงของค่าเทรชโฮลด์ เมื่อกำหนดช่วงของค่าเทรชโฮลด์ที่สอดคล้องสำหรับแต่ละ τ เช่น $t_p(\tau) = \lceil \tau/2 \rceil$ และ $t_n(\tau) = \lfloor \tau/2 \rfloor$ ถ้า τ เพิ่ม ช่วงของ $[t_p(\tau), t_n(\tau)]$ จะกว้างขึ้น ดังนั้น ความจุในการฝังข้อมูลจะสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลง τ สังเกตว่า หนึ่งขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังใด ๆ จะมีเพียง 1 เซต สำหรับค่าเทรชโฮลด์ที่ดีที่สุดที่ทำให้ภาพมีความบิดเบือนต่ำสุด เพื่อเก็บค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมเหล่านั้น ($t_p(\tau)$ และ $t_n(\tau)$) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่า k (นิยามของค่า k คือ ลำดับของการทำซ้ำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้) โดยเริ่มต้นค่า k ลำดับต่ำสุดก่อนแล้วจึงคำนวณหาค่าเทรชโฮลด์ที่สอดคล้อง การตรวจสอบค่าเทรชโฮลด์สำหรับการฝังข้อมูลจะเพิ่ม τ จนกว่าจะมีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับการฝัง ค่า MSE ที่สอดคล้องกับการเชื่อมต่อกัน 5 ครั้งของค่า k ที่ถูกโมดิไฟล์ จะช่วยให้ได้ผลลัพธ์สูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่ของการโมดิไฟล์ 5 ครั้ง ครั้งแรกจะให้ผลลัพธ์ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมกับ 6 ภาพระดับเทามาตรฐานหมายเหตุ สำหรับวิธีการหาเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม หรือ การเพิ่มประสิทธิภาพของการโมดิไฟล์ค่าเทรชโฮลด์อยู่นอกเหนือข้อเสนอของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจะไม่ขอล่าถึงในรายละเอียด

3.5 การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) สำหรับการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม หรือ อาจเรียกสั้น ๆ ว่า GA เป็นหนึ่งเทคนิคของการค้นหาที่เป็นรู้จักสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ GA ถูกประยุกต์ใช้ในงานหลายด้าน อาทิเช่น ทางวิทยาศาสตร์ หรือ วิศวกรรม และอื่น ๆ GA เป็นวิธีการเลียนแบบวิวัฒนาการตามธรรมชาติ โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า “ยีน” และ “โครโมโซม” การประยุกต์ใช้ของงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ “ยีน” ประกอบด้วยพารามิเตอร์ σ_x , σ_y และ ϕ ในรูปแบบเลขฐานสอง ยีนยิ่งยาวประสิทธิภาพยิ่งสูงในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข้อมูล “โครโมโซม” ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ แถวของเลขฐานสองซึ่งประกอบด้วย 3 ยีน เลขฐานสองสามารถเปลี่ยนเป็นเลขฐานสิบโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$decimal = l_b + (u_b - l_b) \left(\sum_{i=1}^m 2^{i-1} b_{i-1} \right) / (2^m - 1) \quad (3.7)$$

$u_b, l_b \in R$ โดยที่ u_b คือ พารามิเตอร์แสดงขอบเขตบนสุด (Upper Bound) l_b คือ พารามิเตอร์แสดงขอบเขตล่างสุด (Lower Bound) m คือ จำนวนของบิตที่ถูกใช้สำหรับแต่ละยีน และ b_{i-1} คือ หนึ่งค่าเลขฐานสองของ i^{th} บิต

หลังจากสร้าง n แถวเลขฐานสองที่แตกต่างของโครโมโซม โครโมโซมจะถูกใส่ลงในฟังก์ชันเป้าหมายแสดงในรูปที่ 3.5 หนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย (บางครั้งเรียกว่า ฟิตเนสฟังก์ชัน) สำหรับ GA ถูกกำหนดให้เป็นค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) ดังสมการนี้:

$$MSE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |u_{i,j} - U_{i,j}|^2 / (N \cdot M) \quad (3.8)$$

MSE คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย สำหรับผลต่างระหว่างภาพต้นฉบับ และภาพที่ถูกฝังข้อมูล วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการค้นหาค่า σ_x , σ_y และ φ_s ที่ทำให้ค่า MSE มีค่าต่ำสุด

$b_{m_{\sigma_x}-1} b_{m_{\sigma_x}-2} \dots b_{0_{\sigma_x}}$	$b_{m_{\sigma_y}-1} b_{m_{\sigma_y}-2} \dots b_{0_{\sigma_y}}$	$b_{m_{\varphi_s}-1} b_{m_{\varphi_s}-2} \dots b_{0_{\varphi_s}}$
gene1 = σ_x	gene2 = σ_y	gene3 = φ_s

รูปที่ 3.6 แสดงหนึ่งโครโมโซมใน GA ประกอบไปด้วย 3 พารามิเตอร์

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ GA ให้สูงขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการควบคุมขอบเขตของแต่ละพารามิเตอร์ พิจารณา σ_x และ σ_y โดยกำหนดให้ m คือ บิตที่สามารถแสดงผลได้ 2^m สำหรับค่าความแตกต่างนี้ เพื่อที่จะหาหนึ่งขอบเขตบน และหนึ่งขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ กำหนดให้ w_R^x, w_R^y เป็นเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งอยู่บนยูนิต R ห่างจากศูนย์กลางไปทางแกน x และทางแกน y ตามลำดับ ดังนั้น $w_R^x = e^{-(R^2/\sigma_x^2)}$ และ $w_R^y = e^{-(R^2/2\sigma_y^2)}$ สมมุติฐานแรก $w_{R=1}^x = \alpha \cdot w_{R=2}^x$ เกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักของจุดที่หนึ่งซึ่งเป็นยูนิตแรกห่างจากศูนย์กลางเป็น α เท่า มีขนาดใหญ่กว่าอีกจุดซึ่งเป็นยูนิตที่สองห่างจากศูนย์กลางไปทางแกน x สมมุติฐานต่อ $w_{R=1}^y = \beta \cdot w_{R=1}^y$ รัศมีแบบถ่วงน้ำหนักในยูนิตแรกห่างจากศูนย์กลางไปตามแกน x เป็น β เท่า นั่นคือ รัศมีแบบถ่วงน้ำหนักไปทางแกน y ดังนั้น $\sigma_x = \sqrt{3/(2 \ln \alpha)}$ และ $\sigma_y = \sqrt{3/(2 \ln \alpha + 6 \ln \beta)}$ ในกรณีที่ α มีขนาดใหญ่มาก เส้นโค้งจะสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว และกรณีที่ $\beta \gg 1$ รัศมีแบบถ่วงน้ำหนักทางแกน y จะมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับทิศทางอื่นๆ ดังนั้น เส้นโค้งจะขยายในทางแกน x เป็นหลัก สมมุติฐานโดยกำหนดให้ $\alpha = 10^4$ เท่า และ $\beta = 10^4$ เท่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้ $\sigma_x = 0.4$ และ $\sigma_y = 0.2$ ซึ่งคือตัวอย่างของเส้นโค้งเกาส์เซียน (Gaussian curve) ที่ขยายตัวเฉพาะในแนวแกน x รูปทรงของมันสูญสลายไปอย่างรวดเร็วเมื่อไกลจากจุดศูนย์กลางเป็น เพราะบริเวณรัศมีแบบถ่วงน้ำหนักของวงที่ 2 มีขนาดเล็กกว่ารัศมีแบบถ่วงน้ำหนักของวงที่ 1 ในกรณีดังกล่าววิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมียูนิตที่เล็กที่สุดที่ใกล้เคียงกับฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนัก ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดขอบเขตล่างที่ 0.2 สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Standard Deviation: SD) ต่ำสุด และกรณีที่ค่า SD คือ 5 รัศมีแบบถ่วงน้ำหนักของวงที่ 1 จะมีค่าเป็น 2 เท่าของอีวงของรัศมีแบบถ่วงน้ำหนักของวงที่ 6 ซึ่งทำให้พื้นที่ที่กว้างพอที่ใช้สำหรับการทำนาย วิชยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดค่า $SD = 5$ สำหรับขอบเขตบน เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีขอบเขต โดเมนของพารามิเตอร์ที่ถูกจำกัด สำหรับเหตุผลดังกล่าวนี้จะช่วยให้ GA ของวิชยานิพนธ์ฉบับนี้ทำงาน ได้เร็วขึ้น สำหรับกรณีที่ $\alpha=10^4$ และ $\beta=1$, $\sigma_x = \sigma_y = 0.4$ นั้นหมายความว่าบริเวณรัศมีของค่า ถ่วงน้ำหนักของวงที่ 1 มีค่าเท่ากันทั้งวง และรัศมีของของค่าถ่วงน้ำหนักในวงที่ 2 มีขนาดเล็กพอ เพื่อที่จะสามารถถูกละเว้น กรณีนี้สามารถพิจารณาให้เป็นฟังก์ชันตัวทำนายแบบเดียวกับงานของ [23]

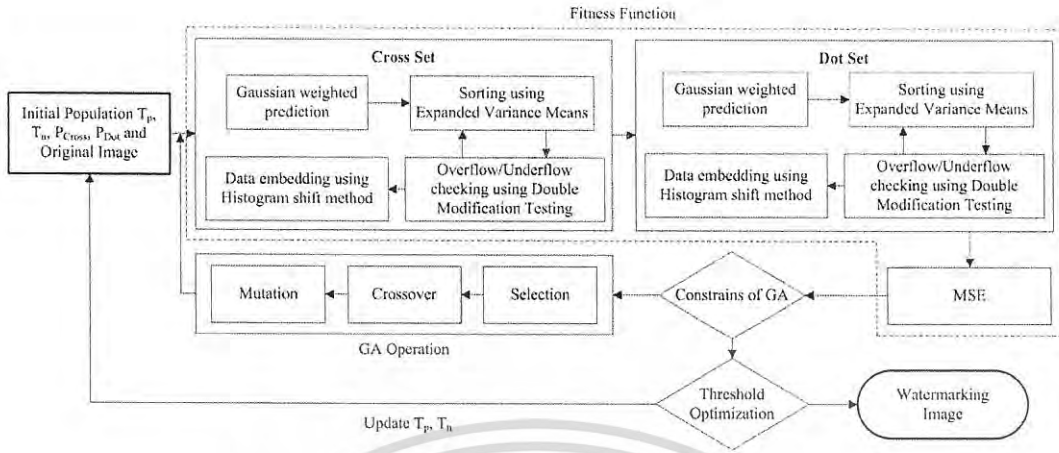
ขั้นต่อไปจะเป็นการปรับปรุงโครโมโซมโดยใช้ 3 ขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญของการดำเนินการ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Operation) ประกอบไปด้วยการคัดเลือก (Selection) การข้ามสาย พันธุ์ (Crossover) และ การกลายพันธุ์ (Mutation) [43] แสดงดังรูปที่ 3.6 หลังจากการดำเนินงาน ทั้งหมดเสร็จสิ้น โครโมโซมรุ่นต่อไปจะมีการสร้างใหม่ โครโมโซมรุ่นใหม่มีค่าฟิตเนสเท่ากับ หรือ ดีกว่า ถึงแม้ว่าขั้นตอนวิธีการจะไม่สามารถรับประกันได้ว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจะถูกพบ แต่งานของ วิชยานิพนธ์ฉบับนี้จะเข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ หมายเหตุ ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นบางครั้งจำนวนรุ่นที่ใช้เป็น อีกหนึ่งปัจจัย

3.6 การเข้ารหัส และการถอดรหัส (Encoding and Decoding)

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น วิธีการที่นำเสนอของวิชยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ประโยชน์จาก GA เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ในระบบสำหรับฟังก์ชันการทำนาย และฟังก์ชันการเรียงลำดับ ขั้นตอน ทั้งหมดสำหรับการเข้ารหัสถูกแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมตามในรูปที่ 3.6 เพื่อเริ่มต้นการเข้ารหัส ลำดับ แรกต้องมีการเซตค่าเทรซโฮลด์ต่ำสุดที่เป็นไปได้สำหรับ t_p และ t_n จากนั้นกำหนดค่าเลขฐานสองสำหรับ k โครโมโซม ซึ่งถูกใช้เป็นประชากรเริ่มต้นสำหรับ GA และทำการแปลงแต่ละโครโมโซมจากเลขฐานสิบ เป็นเลขฐานสองซึ่งจะเป็นตัวแทนของ σ_x , σ_y และ φ จากนั้นแบ่งข้อมูลภาพออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่ม แรกเรียกว่าครอสเซต และกลุ่มที่สองเรียกว่าดอทเซต แบ่งข้อมูลที่ต้องการฝังเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ส่วนหนึ่งจะฝังลงในครอสเซต อีกส่วนจะฝังลงในดอทเซต สังเกตว่าทั้งสองเซตเป็นอิสระต่อกัน (อิสระใน ที่นี้หมายถึงเมื่อมีเซตใดเซตหนึ่งถูกเปลี่ยนจะไม่กระทบต่ออีกเซต) พิกเซลจากดอทเซตถูกใช้สำหรับการ คำนวณค่าการทำนาย u'_{ij} โดยที่พิกเซลจากครอสเซต u_{ij} จะถูกใช้สำหรับการฝังข้อมูล กระบวนการของ การฝังจะเริ่มต้นจากครอสเซต หลังการฝังข้อมูลพิกเซลจากครอสเซตจะเปลี่ยนในขณะที่พิกเซลจาก ดอทเซตยังคงไม่เปลี่ยน เมื่อกระบวนการฝังครอสเซตเสร็จสิ้น เซตของดอทจะถูกทำต่อโดยทำ เหมือนกับกระบวนการของครอส เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถกู้คืนข้อมูลได้ สำหรับการถอดรหัสควรเริ่มต้น การกู้ข้อมูลที่ดอทเซตก่อนครอสเซต การใช้ σ_x และ σ_y จากแต่ละโครโมโซมเพื่อคำนวณค่าเกาส์เซียน แบบถ่วงน้ำหนัก ดังสมการที่ (3.1) และใช้ค่าดังกล่าวนี้เป็นฟังก์ชันการทำนายในสมการที่ (3.2) จากนั้น เริ่มการทำนายในเซตของครอสโดยใช้ข้อมูลจากดอทเซต และทำกลับกันสำหรับดอทเซต คำนวณค่า ความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของทุกพิกเซลในเซต ใช้หนึ่งระดับของพารามิเตอร์การเรียง EVM ของ ทุกพิกเซลในเซตตามสมการ (3.3) จากนั้นเก็บ h สำหรับพิกเซลแรกในเซตสำหรับการฝังเฮดเดอร์ไฟล์ ทำการเรียงลำดับใหม่ในส่วนที่เหลือของพิกเซลในเซตโดยใช้ค่า EVM และตรวจสอบพารามิเตอร์ในแต่ละ เซตว่ามีพื้นที่เพียงพอสำหรับการฝังหรือไม่ เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบประเภทของเซต ในแต่ละพิกเซล ตามนิยามที่ 1 ที่ลำดับของพิกเซล k^{th} ทำการนับจำนวนพิกเซลที่สามารถฝังข้อมูลได้ $EB(t_p, t_n, k)$ ซึ่ง วิชยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พบตั้งแต่พิกเซลแรกในการเรียงลำดับ กำหนดเซต $LC(t_p, t_n, k)$ เป็นเซตของพิกเซลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับขั้นตอนวิธีการเข้ารหัสโดยใช้ GA

น้อยกว่า หรือ เท่ากับ k จะถูกเก็บพื้นที่แม่ป สมาชิกของเซตนี้คือ E, S, NE และ NS ทั้ง 2 เซตจะถูกกำหนดดังนี้

$$EB(t_p, t_n, k) = \{(i, j)_{s_l} \in EE \cup ES, 1 \leq l \leq k\}$$

$$LC(t_p, t_n, k) = \{(i, j)_{s_l} \in E \cup S \cup NE \cup NS, 1 \leq l \leq k\}$$

โดยที่ $(i, j)_{s_l}$ คือ ตำแหน่งของพิกเซลในภาพที่ถูกเรียงตามลำดับ l^{th} คือ ลำดับพิกเซลในการเรียง โดยที่ k^{th} คือ ลำดับสุดท้ายของการเรียง ในกรณีที่จำนวนของพิกเซลที่สามารถฝังข้อมูลได้จะเท่ากับขนาดของพื้นที่แม่ปรวมกับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังทั้งหมดดังสมการที่ (3.9) นั้นหมายความว่า พื้นที่สำหรับการฝังมีเพียงพอ กรณีดังกล่าวนี้วิวิธานพจน์ฉบับนี้จะไม่ได้ไฟล์ตั้งแต่พิกเซล k แรกของการเรียงลำดับที่ถูกรับสำหรับการฝัง

$$n(EB(t_p, t_n, k)) = n(LC(t_p, t_n, k)) + n(Payload) \tag{3.9}$$

กรณีที่ $k = n(\text{Cross set}) - n(\text{Header})$ และ $n(EB(t_p, t_n, k)) < n(LC(t_p, t_n, k)) + n(Payload)$ นั้นหมายความว่า จำนวนของพิกเซลที่สามารถฝังข้อมูลได้สอดคล้องกับค่าเทรชโโฮลด์ที่ได้รับนั้นไม่เพียงพอสำหรับการฝังข้อมูลทั้งหมด หรือในความหมายอื่น ถ้าหากทุก ๆ เซตของพารามิเตอร์ใน GA ไม่สามารถทำให้พื้นที่เพียงพอสำหรับการฝังข้อมูล GA และค่าเทรชโโฮลด์จะถูกยกเลิก แต่ถ้าหากมีบางเซตของพารามิเตอร์ที่ทำให้พื้นที่มากพอสำหรับการฝัง การขยาย หรือ การเลื่อนจะถูกนำไปใช้สำหรับแต่ละพิกเซลตามสมการที่ (3.4) ขั้นตอนวิธีการฝังจะถูกประยุกต์ใช้กับดอทเซตเพื่อฝังส่วนที่เหลือของขนาดข้อมูลที่ต้องการฝัง และคำนวณ MSE อย่างไรก็ตาม GA จะหยุดทำงานใน 2 กรณี คือ กรณีที่การปรับโครโมโซมแล้ว ค่าฟิตเนสไม่เปลี่ยนแปลง และหากการทำซ้ำถึงรุ่นสุดท้าย จากนั้นจะทำการเก็บค่าเทรชโโฮลด์ที่เพิ่มขึ้น และทำซ้ำขั้นตอนทั้งหมดจนกว่าจะได้รับความบิตเบือนของภาพต่ำสุดตามรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้า การใช้ค่าเทรชโโฮลด์ที่เหมาะสมสำหรับฝังข้อมูล ขั้นตอนวิธีการเข้ารหัสแบบละเอียดอธิบายดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 ขั้นตอนวิธีการเข้ารหัส (Encoding Algorithm)

1. เซต $\tau = 0$ และเซต φ_p
2. เริ่มต้นสำหรับ GA โดยการกำหนดค่าไบนารีเริ่มต้นสำหรับ n โครโมโซม σ_x , σ_y และ φ_s
3. แปลงทุกค่าให้เป็นเลขฐานสองจากพารามิเตอร์ที่เป็นตัวเลขฐานสิบโดยใช้สมการที่ (3.7)
4. กำหนดตำแหน่งโครอสเซต และดอทเซตในภาพ
5. สำหรับแต่ละเซตของพารามิเตอร์จากแต่ละโครโมโซม ประยุกต์ใช้ค่าดังต่อไปนี้:
 - 5.1 คำนวณเกาส์เซียนแบบถ่วงน้ำหนักโดยใช้สมการที่ (3.1)
 - 5.2 สำหรับแต่ละตำแหน่งในโครอสเซตคำนวณดังนี้
 - 5.2.1 ค่าการทำนาย และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย คำนวณโดยใช้สมการที่ (3.2)
 - 5.2.2 ทำการเรียงพารามิเตอร์ตามเทคนิค EVM โดยใช้สมการที่ (3.3)
 - 5.3. เก็บ h พิกเซลแรกสำหรับส่วนเฮดเดอร์ไฟล์ และเรียงส่วนที่เหลือของพิกเซลในโครอสเซตจากน้อยไปมากโดยใช้ค่า EVM
 - 5.4. ตรวจสอบพื้นที่สำหรับขั้นตอนวิธีการฝัง:
 - 5.4.1 เซตค่า k ตามดัชนีแสดงถึงลำดับ และเริ่มต้นจาก 1
 - 5.4.2 เพิ่ม k ทีละหนึ่ง และนับจำนวนของเซต EB และ LC
 - 5.4.3 หาตำแหน่งของ k โดยใช้สมการที่ (3.9) จนกว่าจะได้ตำแหน่งที่ต้องการ ถ้าหนึ่งตำแหน่งที่ต้องการถูกพบ ให้เก็บโครโมโซมเหล่านี้เท่าที่มีอยู่ หรือถ้าไม่ใช้ให้ไปที่ขั้นตอนที่ 2
6. สำหรับแต่ละโครโมโซมที่ถูกเก็บเท่าที่มีอยู่ก่อนหน้า ให้เริ่มทำการฝัง และคำนวณผลลัพธ์โดยทำตามขั้นตอน 6.1-6.5 ถ้าไม่พบโครโมโซมที่ถูกเก็บก่อนหน้า GA จะถูกยกเลิก ณ จุดนี้ ให้เพิ่ม τ และไปเริ่มต้นที่ขั้นตอนที่ 2 ใหม่
 - 6.1. เก็บ LSB ของ h พิกเซลแรกไว้ และแทนที่โดยเฮดเดอร์ไฟล์
 - 6.2. เก็บพื้นที่ตำแหน่งที่ตั้งโดยใช้สมการที่ (3.5) และใส่ LSB ทั้งจากขั้นตอนก่อนหน้า และพื้นที่ตำแหน่งที่ตั้งลงในขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง
 - 6.3. โมดิไฟล์ k พิกเซลแรก และฝังขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังโดยใช้สมการที่ (3.4) ตามลำดับ และค่าพิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ คือ $U_{ij} = u'_{ij} + D_{ij}$
 - 6.4. ประยุกต์ใช้ขั้นตอน 6.1 - 6.5 ในดอทเซต
 - 6.5. คำนวณหาค่า MSE โดยใช้สมการที่ (3.8)
7. ถ้า GA ถูกทำงานจนถึงรอบสุดท้ายของการทำซ้ำ ค่า MSE ต่ำสุดที่ได้รับในรอบปัจจุบัน ซึ่งก็คือ ค่าฟิตเนสตัวที่ดีที่สุดสำหรับค่าเทรซโอสต์ปัจจุบัน ในกรณีนี้ GA จะยกเลิกแล้วไปต่อในขั้นตอนต่อไป หรือในทางตรงกันข้าม ให้ประยุกต์ใช้การทำงานของ GA และกลับไปขั้นตอนที่ 3
8. ถ้าห้าเซตของค่าเทรซโอสต์ และโครโมโซมที่ได้รับ หนึ่งในนั้นที่ให้ค่า MSE ที่ดีที่สุดจะถูกเลือก และทำการฝังภายใต้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมเหล่านี้โดยเซตดังกล่าว หรือถ้าไม่ใช้ให้เพิ่ม τ และกลับไปขั้นตอนที่ 2

การถอดรหัสข้อมูล หรือ การกู้คืนภาพต้นฉบับ จำเป็นต้องมีพารามิเตอร์ที่ถูกส่งมาด้วยการเข้ารหัส ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกเก็บไว้ในเฮดเดอร์ไฟล์ เฮดเดอร์ไฟล์มีทั้งหมด 51 พิกเซล ซึ่งใช้ 10 บิต สำหรับ $\sigma_x = 10$ บิต สำหรับ $\sigma_y = 3$ บิต สำหรับ φ_s (สำหรับ $\varphi_s = 1, \dots, 8$) 8 บิต สำหรับ τ และ 20 บิตสุดท้ายสำหรับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง เนื่องจากพารามิเตอร์ φ_s คือ ลำดับสำหรับการเรียงพิกเซล สังเกตว่า ในส่วนเฮดเดอร์ไฟล์ได้ถูกฝังตัวอยู่ด้านนอกลำดับการเรียงพิกเซลเหล่านั้น เฮดเดอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟล์ที่ฝังอยู่ใน 51 พิกเซลแรกของแต่ละเซตโดยแทนที่ LSB เดิมที่ถูกถอดออกไปเป็นส่วนหนึ่งของขนาดข้อมูลที่ต้องการฝัง อย่างไรก็ตาม LSB ของพิกเซลที่ถอดออกยังคงต้องเก็บ และใส่คืนในตำแหน่งเดิมเพื่อให้ได้ภาพต้นฉบับที่ถูกต้อง

3.6.2 ขั้นตอนวิธีการถอดรหัสข้อมูล (Data Decoding)

ขั้นตอนการถอดรหัสข้อมูลจากภาพที่ฝังประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ การแยกกลายน้ำ และการกู้คืนภาพต้นฉบับ เนื่องจากคrossoverถูกเข้ารหัสก่อนต่อพิกเซล ดังนั้น การกู้คืนข้อมูลต้องทำตรงกันข้าม ขั้นตอนการถอดรหัสเริ่มต้นด้วยการแยกเฮดเดอร์ไฟล์ LSB ของ h พิกเซลแรกในคrossover เมื่อทราบพารามิเตอร์ต่าง ๆ และขนาดของขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง จากนั้นจึงคำนวณค่า EVM และจัดเรียงส่วนที่เหลือของพิกเซลในคrossoverโดยใช้พารามิเตอร์ของเซตดังกล่าว แล้วจึงคำนวณค่าการทำนาย และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกโมดิไฟล์ ขั้นตอนต่อไปทำการกำหนดเซตในแต่ละพิกเซลที่สอดคล้องโดยใช้นิยามที่ 2 และแยกขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังออกจากพิกเซลที่อยู่ในเซต EE และ ES ระบุตำแหน่ง LSB ของเฮดเดอร์ไฟล์ และพื้นที่แมป ขนาดของพื้นที่แมปสามารถทราบโดยการนับพิกเซลซึ่งไม่ได้เป็น EE , ES หรือ SS ตอนนี้ลายน้้ำที่ฝังเป็นสิ่งที่ทราบแล้ว ต่อไปเป็นการกู้คืนภาพต้นฉบับ โดยวาง LSB ต้นฉบับของส่วนเฮดเดอร์ไฟล์กลับเข้าไปใน h ในพิกเซลแรกของเซต พิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ทั้งหมดในลำดับที่ถูกเรียงแล้วสามารถกู้คืนโดยใช้สมการที่ (3.6) หลังจากกู้คืนข้อมูลในคrossoverเสร็จสิ้นจะทำซ้ำขั้นตอนทั้งหมดต่อในคrossoverโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนวิธีการถอดรหัส (Decoding Algorithm)

1. แยกทุกตำแหน่งในภาพออกเป็นคrossover และคrossover
2. แยก LSB เฮดเดอร์ไฟล์ของ h พิกเซลแรกในคrossover และแปลงพารามิเตอร์ทั้งหมดให้เป็นเลขฐานสองจากเลขฐานสิบโดยใช้สมการ (3.7) จะได้พารามิเตอร์ $\sigma_x, \sigma_y, \varphi_s, t_p, t_n$ และขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง
3. คำนวณค่า EVM ของพิกเซลโดยเริ่มจากตำแหน่ง $(h+1)^{th}$ ในคrossover และเรียงลำดับข้อมูลจากน้อยไปหามากตามลำดับ
4. คำนวณค่าการทำนาย และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกโมดิไฟล์มาก่อนหน้าของพิกเซลทั้งหมดตามลำดับโดยใช้สมการที่ (3.2)
5. กำหนดเซตที่สอดคล้องสำหรับแต่ละพิกเซลในลำดับที่เรียงแล้วโดยใช้นิยามที่ 2 และค่าเทรซโพลด์จากเฮดเดอร์ไฟล์
6. แยกขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังจากพิกเซลซึ่งเป็นเซตของ EE และ ES โดยเรียงตามลำดับ
7. ระบุตำแหน่งของลายน้้ำ LSB ของเฮดเดอร์ไฟล์ และขนาดของพื้นที่แมปจากขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง
8. แทนที่ LSB เดิมของเฮดเดอร์ไฟล์กลับไป h พิกเซลแรก
9. กู้คืนพิกเซลต้นฉบับทั้งหมดที่มีการโมดิไฟล์ตามการเรียงลำดับโดยใช้สมการที่ (3.6) และแยกพื้นที่แมป ออกจากขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง
10. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 9 ในคrossover

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง และผลลัพธ์ที่ได้รับจากการฝังลายน้ำดิจิทัลแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ ซึ่งกระบวนการถูกอธิบายไว้ในบทก่อนหน้า การทดลองทั้งหมดประมวลผลโดยใช้ MacBook Pro with Retina display ร่วมกับ Intel(R) Core(TM) i7-3720QM CPU @ 2.60 GHz, 8 GB memory ประมวลผลผ่านระบบปฏิบัติการ Windows 7 (64-bit) และโปรแกรม Matlab (version R2009a) ภาพที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นภาพมาตรฐานระดับเทา 8 บิต ขนาด 512x512 พิกเซล จำนวน 6 ภาพ ได้แก่ Lena, Barbara, Baboon, Peppers, Boat และ Sailboat ซึ่งดึงมาจากรฐานข้อมูล [44] และ [45] ภาพเหล่านี้ครอบคลุมลักษณะที่เป็นไปได้ของพื้นผิวที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การทดสอบด้วยภาพมาตรฐานระดับเทาแล้ว เพื่อให้ครอบคลุมสำหรับงานบางประเภท วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังคงประยุกต์ใช้ภาพทางการแพทย์ที่ได้รับมาจากหลายเครื่องมือ อาทิเช่น เอกซเรย์, CT, PET, MRI และ Ultrasound สำหรับการทดสอบด้วย

การทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ การฝังข้อมูลที่มีลักษณะเป็นสัญญาณรบกวน (เช่น บิตแบบสุ่ม) ซึ่งถูกใช้สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอกับงานในอดีตเมื่อไม่นานนี้ 2 งาน คือ [20] และ [23] ส่วนที่สองเป็นการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอ โดยการฝังข้อมูลภาพลายน้ำดิจิทัลชนิดขาวดำ (ข้อมูลที่ฝังเป็นแบบคงที่) ซึ่งถูกสร้างขึ้นเองสำหรับการทดสอบนี้

การทดลอง

เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ การทดลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต ดังนี้

1. Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction [23] (วิธีการของ Sachnev ในปี ค.ศ. 2009)
2. Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection [20] (วิธีการของ Li ในปี ค.ศ. 2011)

วิธีการของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่พัฒนาขึ้น

3. Optimal Gaussian Weight Predictor and Sorting Using Genetic Algorithm for Reversible Watermarking Based on PEE and HS (วิธีการของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในปี ค.ศ. 2016)

ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกเปรียบเทียบคุณภาพของภาพหลังการฝังข้อมูล

4.1 วิธีการวัด และประเมินผล

วิธีการวัด และประเมินผลคุณภาพของภาพนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่ที่ได้รับความนิยม และใช้อย่างแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ แบบแรกใช้การประเมินผลด้วยสายตา (Subjective Visual Evaluation) และแบบที่สองใช้การประเมินผลจากการคำนวณ วิธีการวัด และประเมินผลคุณภาพของภาพจะถูกเปรียบเทียบผลลัพธ์กับงานวิจัยที่ได้อ้างอิงถึง [20] และ [23]

4.1.1 การประเมินผลด้วยสายตา

การวัดคุณภาพของภาพภายหลังการฝังลายน้ำ โดยใช้สายตาของผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องทำการตัดสินคุณภาพของภาพเป็นวิธีการพื้นฐาน สายตาของมนุษย์เป็นเครื่องมือวัดค่าสีที่มีความไวสูง สามารถแยกแยะสีได้ ซึ่งอาศัยพื้นฐานของระบบการมองเห็นของมนุษย์ เนื่องจากการใช้มนุษย์เป็นเครื่องมือในการวัดอาจเกิดความผิดพลาดได้ในหลาย ๆ ปัจจัย ทั้งภายนอก และภายใน ได้แก่ อารมณ์ ความรู้สึก ความเหนื่อยล้า ระดับของสายตาของแต่ละคนนี้อาจไม่เท่ากัน และอื่น ๆ อาจส่งผลโดยตรงต่อการประเมินประสิทธิภาพของผลลัพธ์ความน่าเชื่อถือเพื่อใช้อ้างอิง ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงไม่นำการประเมินผลทางสายตามาใช้

4.1.2 การประเมินผลจากการคำนวณ

การวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัล สามารถกระทำโดยการหาอัตราส่วนของสัญญาณสูงสุดต่อสัญญาณรบกวน (Peak Signal to Noise Ratio: PSNR) ซึ่งกำหนดได้ดังนี้

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ 255^2 เป็นค่าสูงสุดสำหรับการคำนวณค่า PSNR ตามสมการที่ (4.1) ถูกแทนด้วยค่าสูงสุดกำลังสอง ซึ่งภาพที่ใช้เป็นภาพระดับเทา 8 บิต กล่าวคือ ใน 1 พิกเซล จะใช้ 8 บิต สำหรับการเก็บสัมประสิทธิ์ตัวเลข ค่าระดับเทาสูงสุดของระบบที่เป็นไปได้ในที่นี้ คือ 255 ซึ่งอยู่ระหว่างช่วง $[0-255]$ ดังนั้นค่าสูงสุดเท่ากับ 255 คือ ค่าสูงสุดของการทดสอบ

$$MSE = \frac{1}{W_i \times H_i} \sum_{i=1}^{W_i} \sum_{j=1}^{H_i} (P_{Ori(i,j)} - P_{Emb(i,j)})^2 \quad (4.2)$$

สัญญาณรบกวน คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) ดังสมการที่ (4.2) โดยกำหนดให้ W_i และ H_i คือ ความกว้าง และความสูงของภาพตามลำดับ $P_{Ori(i,j)}$ คือ ค่าพิกเซลของภาพต้นฉบับ และ $P_{Emb(i,j)}$ คือ ค่าพิกเซลที่ถูกฝังแล้วในตำแหน่งแถวที่ i หลักที่ j ตามลำดับ หรืออาจเรียกว่า ค่าความแตกต่างระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ถูกฝังลายน้ำ

4.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองถูกเปรียบเทียบกับงานดั้งเดิม [20] และ [23] โดยใช้ภาพมาตรฐานระดับเทาขนาด 512×512 จำนวน 6 ภาพ แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นตัวแทนของภาพในลักษณะที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ภาพ Baboon จะมีความแปรปรวนของพิกเซลสูง ภาพ Lena จะมีความแปรปรวนของพิกเซลปกติ และ Peppers จะมีความแปรปรวนของค่าพิกเซลต่ำเป็นต้น การทดสอบถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ กลุ่มแรกใช้ฝังข้อมูลแบบสุ่มบิตเลขฐานสองแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.2

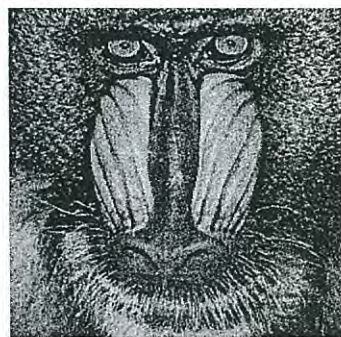
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Lena



(ข) Barbara



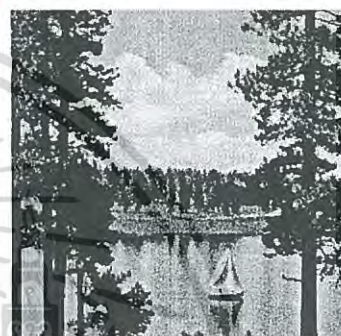
(ค) Baboon



(ง) Peppers



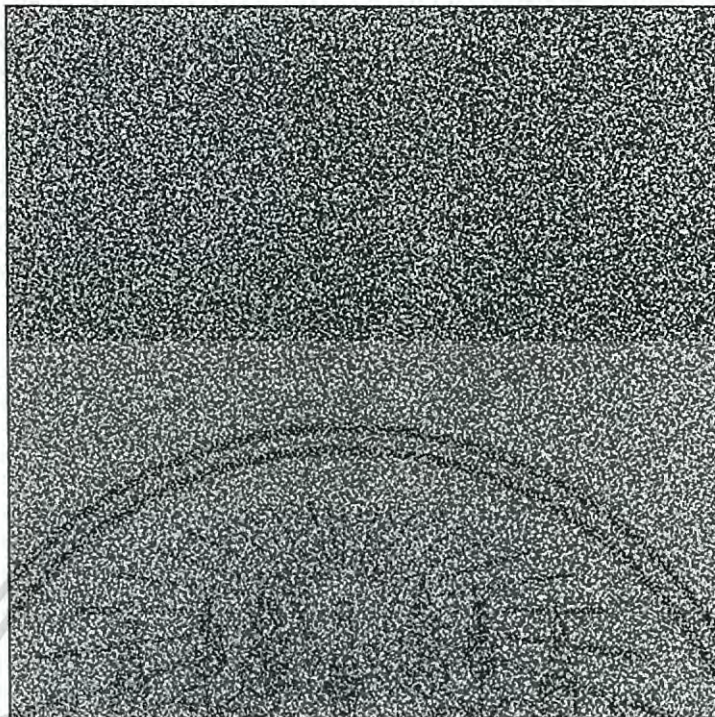
(ช) Boat



(ฉ) Sailboat

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างภาพที่ใช้ในการทดสอบ (ก) Lena (ข) Barbara (ค) Baboon (ง) Peppers (จ) Boat และ (ฉ) Sailboat

กระบวนการจะเริ่มต้นจากการฝังขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังขนาดเล็กก่อน และเพิ่มสูงขึ้นจนกว่าภาพจะไม่สามารถฝังข้อมูลได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงตัวอย่างการฝังข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.3 - 4.9 ความจุสูงสุดที่สามารถฝังข้อมูลได้อยู่ประมาณเกือบ 1 บิต/พิกเซล (อุดมคติ) ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้รับจากการประยุกต์ใช้ GA สำหรับแต่ละภาพ แต่ละขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง การวัด และการประเมินผลแสดงดังรูปที่ 4.10 - 4.15 ในกลุ่มที่สองแสดงตัวอย่างการประยุกต์งานของวิธีที่นำเสนอโดยฝังข้อมูลภาพชนิดขาวดำซึ่งถูกสร้างขึ้นเอง การฝังข้อมูลจะทดสอบกับภาพทางการแพทย์ โดยต้องสามารถกู้คืนภาพต้นฉบับ และข้อมูลที่ถูกฝังได้แบบไม่มีการสูญเสียแสดงดังรูปที่ 4.16 - 4.26



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างบิตเลขฐานสองแบบสุ่มสำหรับการทดสอบในชุดแรก



รูปที่ 4.3 แสดงภาพระดับเทาต้นฉบับ (ก) Lena (8บิต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการทดสอบภาพต้นฉบับ (ก) Lena โดยฝังบิตฐานสองแบบสุ่มจำนวน 40,000 บิต,
PSNR = 44.20 dB



รูปที่ 4.5 แสดงการทดสอบภาพต้นฉบับ (ก) Lena โดยฝังบิตฐานสองแบบสุ่มจำนวน 100,000 บิต
PSNR = 40.06 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงการทดสอบภาพต้นฉบับ (ก) Lena โดยฝังพิตฐานสองแบบสุ่มจำนวน 140,000 บิต
PSNR = 36.15 dB



รูปที่ 4.7 แสดงการทดสอบภาพต้นฉบับ (ก) Lena โดยฝังพิตฐานสองแบบสุ่มจำนวน 220,000 บิต
PSNR = 32.54 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงการทดสอบภาพต้นฉบับ (ก) Lena โดยฝังพิตฐานสองแบบสุ่มจำนวน 380,000 บิต
PSNR = 23.99 dB



รูปที่ 4.9 ทดสอบภาพต้นฉบับ (ก) Lena โดยฝังพิตฐานสองแบบสุ่มจำนวน 520,000 บิต, PSNR
= 16.47 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้รับจาก GA โดยทดสอบกับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่
แตกต่างกันสำหรับ 6 ภาพมาตรฐานระดับเทา

Pay Load (bpp)	Lena	Peppers	Baboon
	$t_p, t_n, \sigma_x, \sigma_y, \varphi_s$	$t_p, t_n, \sigma_x, \sigma_y, \varphi_s$	$t_p, t_n, \sigma_x, \sigma_y, \varphi_s$
0.038	0, -1,1.861,0.627,8	0, -1,1.884,4.958,8	0, -1,0.458,0.533,6
0.076	0, -1,1.856,0.702,8	0, -1,0.923,4.930,8	0, -1,0.458,0.674,2
0.114	0, -1,1.655,0.758,7	0, -1,0.923,4.930,7	1, -2,0.458,0.510,6
0.153	0, -1,1.575,0.777,7	1, -1,1.617,4.512,8	2, -2,0.486,0.538,4
0.191	0, -1,1.289,0.754,4	1, -1,1.570,2.457,4	3, -3,0.482,0.538,4
0.229	0, -1,1.138,0.726,2	1, -2,1.326,4.869,8	4, -4,0.697,0.927,4
0.267	1, -1,1.495,0.796,5	1, -2,1.575,2.588,4	4, -5,0.697,0.927,4
0.305	1, -1,1.289,0.726,2	2, -2,1.608,3.264,6	5, -6,0.679,0.866,4
0.343	1, -2,1.570,0.796,5	2, -3,1.434,4.376,6	6, -7,0.679,0.871,4
0.381	1, -2,1.495,0.796,5	2, -3,1.880,2.584,4	7, -8,0.660,0.857,4
0.420	1, -2,1.251,0.763,2	3, -4,1.781,3.728,6	8, -9,0.660,0.866,6
0.458	2, -2,1.411,0.857,4	3, -4,1.880,2.588,4	9,-10,0.650,0.857,4
0.496	2, -3,1.547,0.913,5	4, -4,1.875,2.555,5	10,-10,0.472,0.566,4
0.534	2, -3,1.335,0.918,2	4, -5,1.889,2.490,4	10,-10,0.472,0.566,2
0.572	3, -3,1.270,0.885,3	5, -5,1.884,2.490,4	10,-10,0.425,0.547,2
0.610	3, -4,1.340,0.885,3	6, -6,1.875,2.560,6	11,-11,0.425,0.547,2
0.648	3, -4,1.190,0.885,3	6, -7,1.945,2.044,4	12,-13,0.430,0.557,4
0.687	4, -5,1.274,0.913,3	7, -7,1.927,2.044,4	13,-14,0.500,0.993,6
0.725	4, -5,1.190,0.843,2	8, -8,2.035,1.640,4	15,-16,0.200,0.209,4
0.763	5, -6,1.115,0.805,2	9, -9,2.021,1.406,4	18,-18,0.425,0.566,4
0.801	6, -7,1.115,0.801,2	10,-10,1.669,1.448,2	20,-21,0.275,0.303,8
0.839	7, -8,1.110,0.801,2	12,-12,1.673,1.199,2	24,-25,0.275,0.308,8
0.877	7, -8,0.829,0.655,2	15,-15,1.462,1.110,2	-----
0.916	9, -9,0.829,0.655,2	18,-18,1.190,0.951,1	-----
0.954	11,-12,0.655,0.519,2	-----	-----

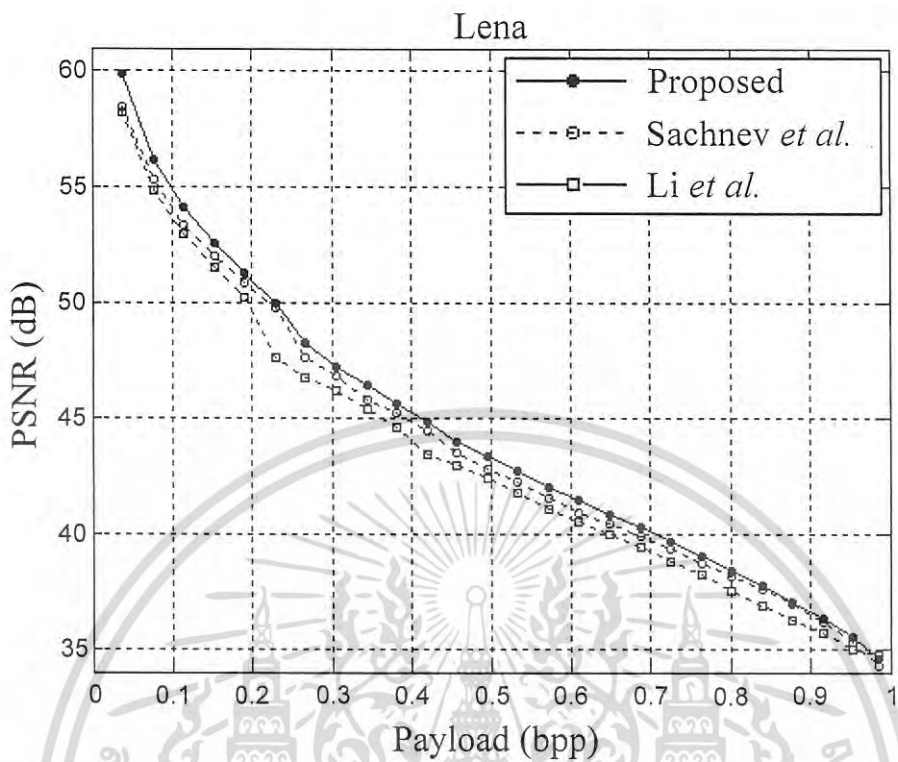
(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

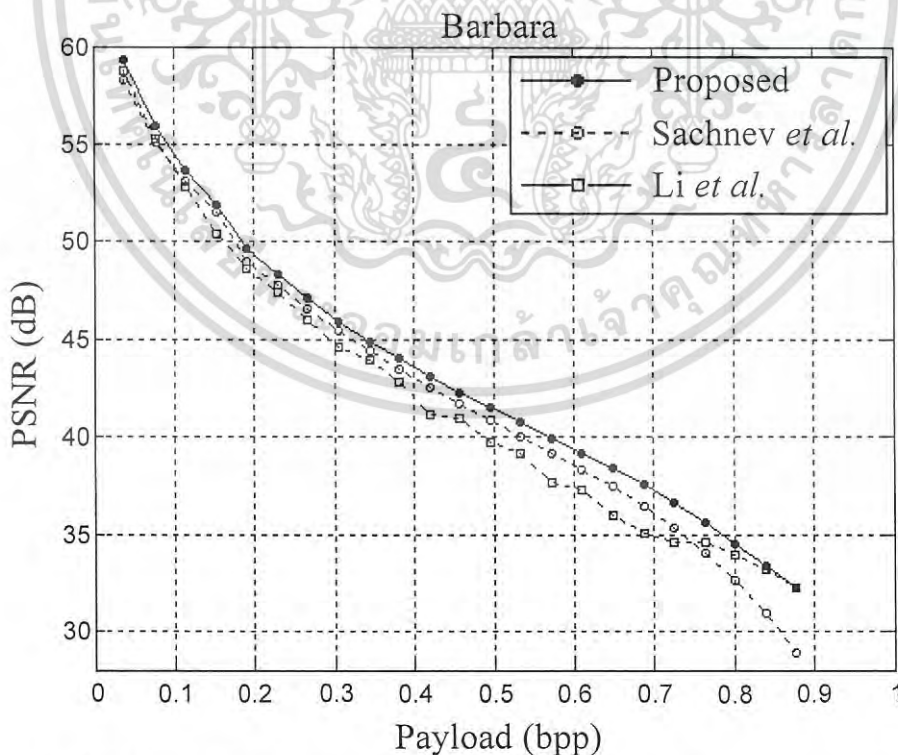
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้รับจาก GA โดยทดสอบกับขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่
แตกต่างกันสำหรับ 6 ภาพมาตรฐานระดับเทา

Pay Load (bpp)	Barbara	Boat	Sailboat
	$t_p, t_n, \sigma_x, \sigma_y, \varphi_s$	$t_p, t_n, \sigma_x, \sigma_y, \varphi_s$	$t_p, t_n, \sigma_x, \sigma_y, \varphi_s$
0.038	0, -1,1.110,1.739,7	0, -1,1.448,1.350,3	0, -1,0.632,3.930,7
0.076	0, -1,1.110,1.739,7	0, -1,1.181,0.711,2	0, -1,0.514,4.911,6
0.114	0, -1,1.185,0.711,4	0, -1,1.181,0.519,2	1, -2,0.622,4.897,8
0.153	0, -1,0.707,0.543,3	0, -1,0.313,0.205,1	1, -2,0.622,4.911,8
0.191	1, -1,1.185,0.711,4	1, -1,0.463,0.369,2	2, -2,0.552,4.911,8
0.229	0, -1,0.707,0.543,3	1, -2,0.993,0.519,2	2, -3,0.627,4.892,8
0.267	1, -2,1.167,0.749,3	1, -2,0.463,0.350,2	3, -3,0.566,4.897,8
0.305	1, -2,0.707,0.543,4	2, -2,0.463,0.369,2	3, -4,0.585,4.897,8
0.343	2, -3,1.167,0.740,3	2, -3,0.993,0.519,2	4, -4,0.622,3.855,8
0.381	2, -3,0.707,0.543,4	2, -3,0.425,0.350,2	4, -4,0.796,2.593,4
0.420	3, -3,0.697,0.543,4	3, -3,0.444,0.350,2	4, -5,0.791,2.485,4
0.458	3, -4,0.697,0.543,4	3, -4,0.444,0.360,1	5, -6,1.096,2.335,4
0.496	4, -4,0.702,0.538,4	4, -4,1.068,0.519,2	5, -6,0.932,2.035,4
0.534	4, -5,0.707,0.543,4	4, -5,1.012,0.500,2	6, -7,0.941,2.067,4
0.572	4, -5,0.693,0.538,8	5, -5,0.993,0.519,2	7, -8,1.073,1.955,4
0.610	5, -6,0.693,0.538,8	5, -6,1.012,0.505,2	8, -8,1.077,1.584,2
0.648	6, 7,0.510,0.425,8	6, -6,0.993,0.500,1	8, -9,1.021,1.467,2
0.687	7, -8,0.528,0.425,8	6, -7,0.970,0.500,1	9,-10,1.021,1.448,2
0.725	8, -9,0.533,0.421,8	7, -8,1.021,0.500,1	10,-11,1.016,1.401,2
0.763	9,-10,0.514,0.378,8	8, -9,0.937,0.505,1	11,-12,0.988,1.260,2
0.801	11,-11,0.514,0.369,8	9, -9,0.984,0.500,1	12,-13,0.979,1.106,2
0.839	11,-12,0.524,0.238,8	10,-10,0.913,0.500,1	12,13,0.815,1.106,1
0.877	13,-13,0.618,0.266,8	11,-12,0.862,0.500,1	15,-16,0.801,0.918,1
0.916	-----	13,-14,0.843,0.500,1	17,-18,0.815,0.946,2
0.954	-----	17,-18,0.810,0.467,1	-----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

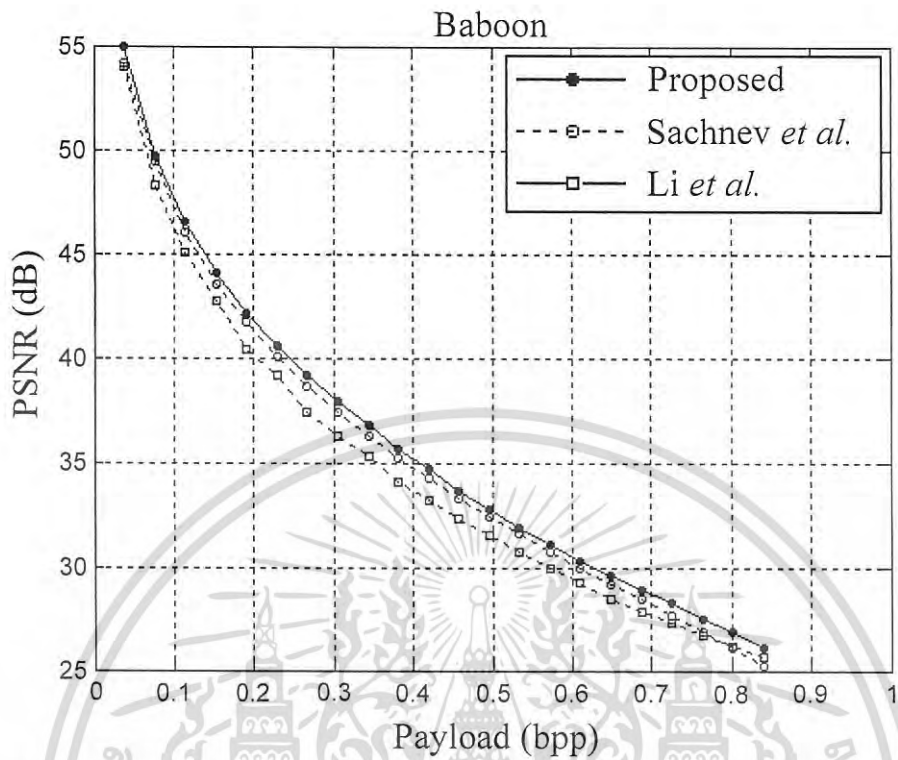


รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของภาพ Lena กับสัญญาณรบกวน

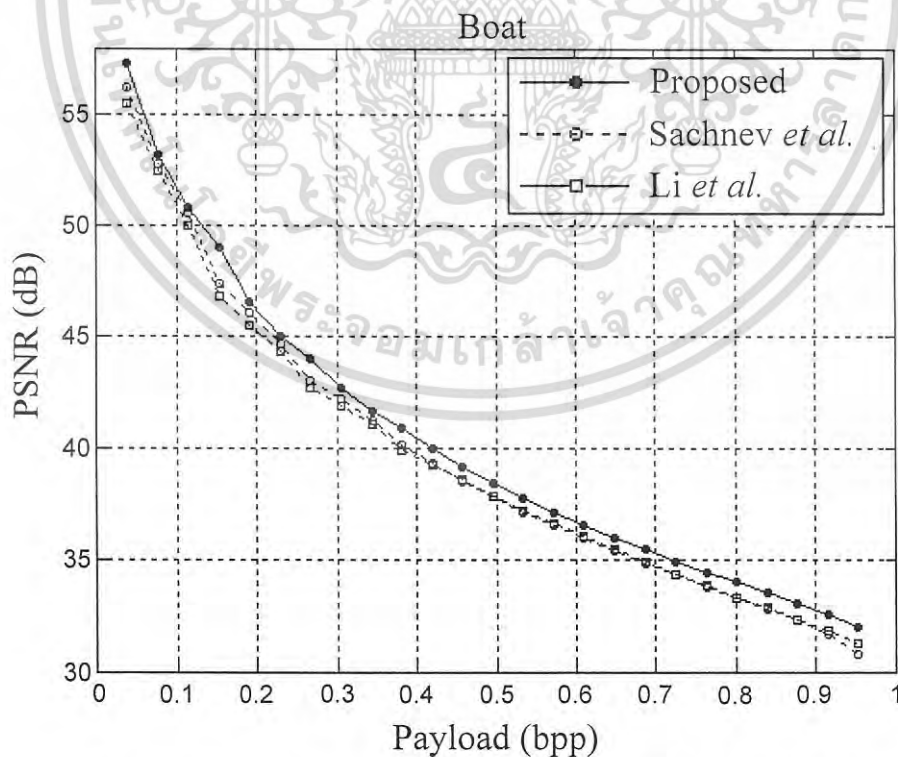


รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของภาพ Barbara กับสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

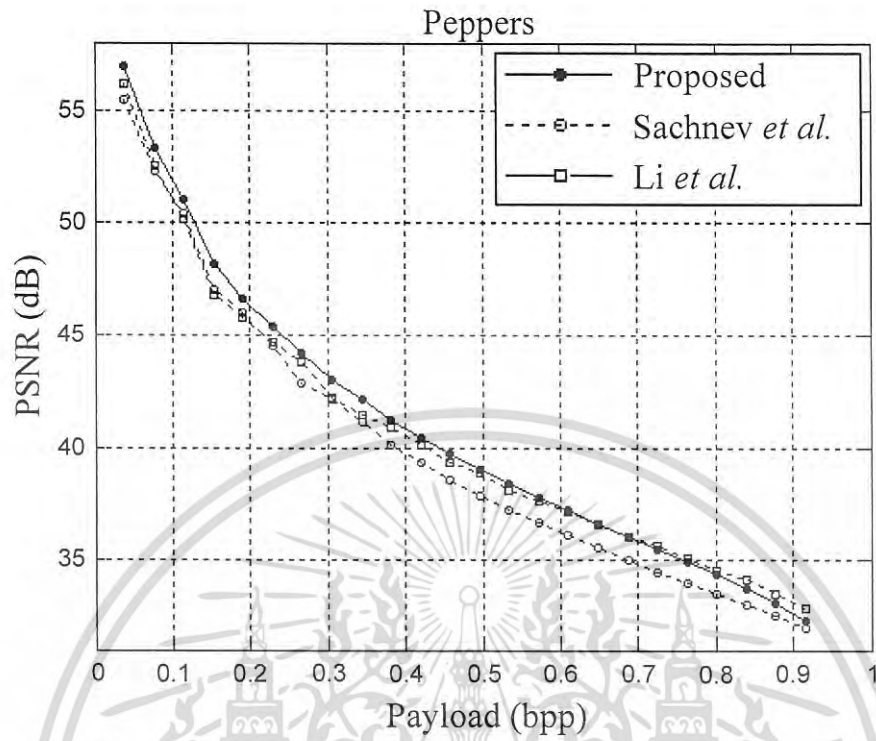


รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของภาพ Baboon กับสัญญาณรบกวน

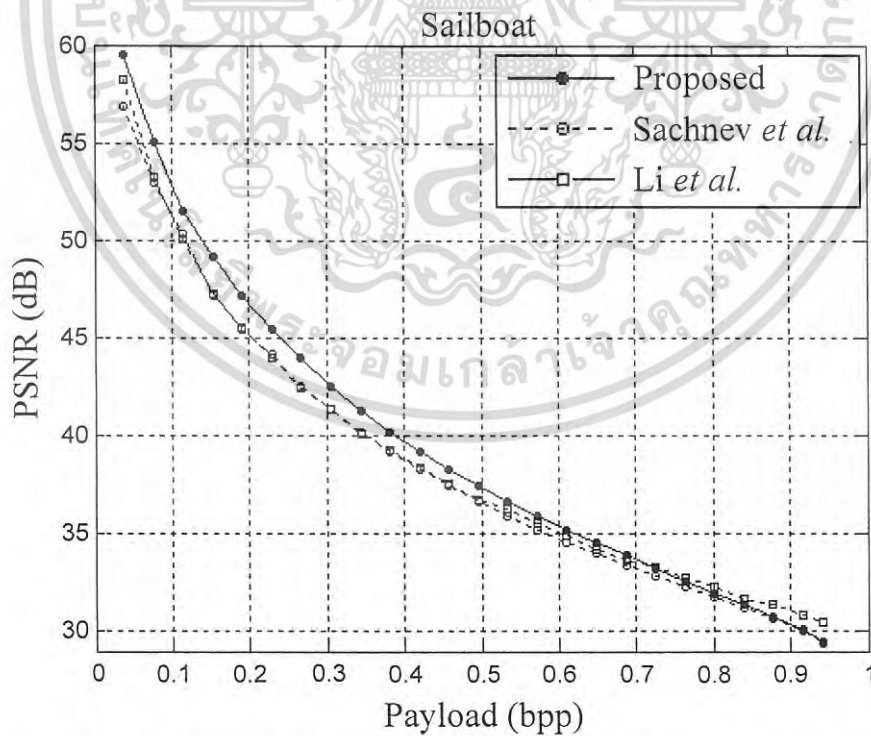


รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของภาพ Boat กับสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของภาพ Peppers กับสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของภาพ Sailboat กับสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของวิธีการพิจารณาจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณสูงสุดต่อสัญญาณรบกวน หรือ การวัดจากค่าผิดพลาดที่เกิดจากการฝังลายน้ำดิจิทัลทางด้านแกน Y (PSNR) โดยเทียบกับจำนวนของ ข้อมูลลายน้ำที่ถูกใช้ฝังทาแกน X (ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่เพิ่มสูงขึ้น) ดังนั้น วิธีการใดที่ทำให้ ได้ผลลัพธ์ค่า PSNR สูงสุด แสดงว่าประสิทธิภาพของวิธีการนั้นดีที่สุด โดยที่ MSE คือ ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ยดังสมการที่ (4.2) ภาพที่มีความบิดเบือนต่ำแสดงว่าประสิทธิภาพของวิธีการสูง หรือใน ความหมายเดียวกัน คือ ค่า PSNR จะสูง ในงานนี้ φ_p ถูกกำหนดสูงสุดอยู่ที่ 6 ระดับ เพื่อจำกัดขอบเขต ของการกวาดหาพื้นที่พิกเซลสำหรับการทำนายของ GA เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สูงสุดที่เป็นไปได้ และช่วยลด เวลาสำหรับการประมวลผล ผลการทดลองในรูปที่ 4.10-4.15 แสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่ดีกว่าของวิธีการที่ เสนอเมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Sachnev และคณะ [23] และ Li และคณะ [20]

การทดสอบการฝังเริ่มต้นจาก 10,000 บิต และเพิ่มขึ้นครั้งละ 10,000 บิต ตามลำดับ ค่า PSNR ของวิธีการที่นำเสนอสูงกว่าสองวิธีการในอดีตในทุก ๆ ภาพ และเกือบทุก ๆ ขนาดของการฝัง ข้อมูล ความสำเร็จดังกล่าวเกิดขึ้นจากฟังก์ชันที่ถูกใช้สำหรับการทำนาย และระดับของ φ_p สามารถ ปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง ในขณะที่ตัวทำนาย และ ฟังก์ชันการเรียงข้อมูลของ [23] เป็นแบบคงตัวซึ่งไม่พิจารณาในบริเวณที่ไกลออกไปสำหรับการทำนาย และการเรียงลำดับ ประสิทธิภาพที่เหนือชั้นกว่าถูกแสดงในรูปที่ 3.2 สำหรับตัวอย่างบริเวณที่เหมาะสม ของตัวทำนายในภาพมาตรฐาน Lena, Baboon, Pepper, และ Sailboat แต่ละภาพแสดงให้เห็น รูปแบบตัวทำนายที่เหมาะสม และในรูปที่ 3.1 สำหรับระดับของการเรียงข้อมูลที่เหมาะสม

ในงานของ [20] กระบวนการของพวกเขาคล้ายคลึงกับงานของ [23] โดยอยู่บนพื้นฐานของ เทคนิค PEE และ HS เช่นเดียวกับวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งใช้หนึ่งรูปแบบตัวทำนายใหม่ร่วมกับหนึ่งเทคนิคที่ มีชื่อว่า การเลือกพิกเซล (pixel selection) เพื่อเลือกค่า PE สำหรับบริเวณที่ราบเรียบขึ้นก่อนบริเวณที่ ขรุขระก่อนการฝัง ซึ่งแนวคิดคล้ายคลึงกับเทคนิคการเรียงลำดับ และอีกหนึ่งกลยุทธ์ที่สำคัญของพวกเขาคือการฝัง 2 บิตในบริเวณที่ราบเรียบ และ 1 บิตสำหรับบริเวณที่ขรุขระ ผลลัพธ์ของงานพวกเขาที่ดี สำหรับความจุสูง ๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับงานของพวกเขา [20] ในทุก ๆ ภาพ และเกือบทุก ๆ ขนาดของการฝัง ผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอสูงกว่า ยกเว้นบางภาพในส่วนท้ายของ กราฟ PSNR หรือ เมื่อขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังมีขนาดใหญ่มาก ๆ กลยุทธ์การฝัง 2 บิต จะถูกใช้ อย่างมีนัยยะสำคัญ ประสิทธิภาพของการฝังจะสูงในความบิดเบือนที่ต่ำ

สำหรับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอยังคงอยู่บนพื้นฐานของขั้นตอนวิธีดั้งเดิม [23] ซึ่งรวมหลาย เทคนิคที่สำคัญ และมีประสิทธิภาพเข้าด้วยกัน เช่น การเรียงลำดับข้อมูล การเลื่อนฮิสโตแกรม (HS) การทดสอบการฝังสองครั้งผ่าน (DMT) และการฝังแบบดับเบิล เป็นต้น ตารางที่ 4.1 แสดง ค่าพารามิเตอร์ t_p , t_n , σ_x , σ_y และ φ_p ของแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของการฝังของวิธีการที่ นำเสนอ สังเกต ถึงแม้ว่าภาพที่ถูกฝังจะเป็นภาพเดียวกัน และใช้ขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝังที่แตกต่าง กัน ผลลัพธ์ที่ได้รับยังคงต้องการพารามิเตอร์ที่ไม่เหมือนกัน การใช้ประโยชน์ที่เหมาะสมสำหรับ พารามิเตอร์เหล่านี้ช่วยให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่างานดั้งเดิม พารามิเตอร์ที่เหมาะสมเหล่านี้ GA ถูกประยุกต์ใช้ สำหรับการค้นหาได้ดี และมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ มีอีกหนึ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำนาย สังเกตจากตารางที่ 4.2 ขอบเขต สูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับการทำนายถูกเขต $\varphi_p = 6$ ซึ่งบรรลุค่าเฉลี่ยของ PSNR สูงสุดในเกือบทุกการฝัง เมื่อเปรียบเทียบกับ $\varphi_p = 4$ ที่ได้รับจากงาน [30] ประมาณ 0.91 dB สำหรับภาพ Sailboat, และ

ประมาณ 1 dB สำหรับภาพ Peppers. เนื่องจากขอบเขตสูงสุดที่ $\varphi_p = 4$ มีพื้นที่ที่ไม่เพียงพอสำหรับการทำนายที่ถูกต้อง

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า PSNR ของ [30] ที่ $\varphi_p = 4$ และวิธีการที่นำเสนอที่ $\varphi_p = 6$ สำหรับภาพ Lena, Pepper และ Baboon โดยที่การฝังข้อมูลเริ่มต้นที่ 0.038 bpp จนถึง 0.954 bpp

Pay Load (bpp)	PSNR (dB)					
	Lena		Pepper		Baboon	
	$\varphi_p = 4$	$\varphi_p = 6$	$\varphi_p = 4$	$\varphi_p = 6$	$\varphi_p = 4$	$\varphi_p = 6$
0.038	59.190	59.812	55.788	57.014	54.708	55.001
0.076	55.729	56.188	52.497	53.397	49.473	49.772
0.114	53.716	54.202	50.451	51.021	46.464	46.769
0.153	52.204	52.571	47.223	48.223	43.899	44.251
0.191	50.995	51.318	46.004	46.708	41.974	42.226
0.229	49.798	50.098	44.590	45.491	40.387	40.657
0.267	47.782	48.201	42.964	44.176	38.982	39.354
0.305	46.914	47.324	42.178	43.185	37.724	38.002
0.343	46.021	46.543	41.182	42.226	36.569	36.804
0.381	45.332	45.736	40.162	41.190	35.473	35.724
0.420	44.490	44.973	39.349	40.498	34.452	34.792
0.458	43.581	44.105	38.568	39.868	33.468	33.715
0.496	42.922	43.393	37.876	39.180	32.543	32.864
0.534	42.341	42.842	37.231	38.434	31.646	31.993
0.572	41.619	42.106	36.636	37.835	30.794	31.209
0.610	41.070	41.509	36.062	37.225	29.971	30.468
0.648	40.513	40.993	35.508	36.512	29.193	29.791
0.687	39.900	40.394	34.978	36.106	28.425	28.984
0.725	39.360	39.759	34.455	35.563	27.665	28.465
0.763	38.789	39.209	33.979	34.974	26.910	27.516
0.801	38.202	38.498	33.509	34.480	26.140	27.042
0.839	37.600	37.802	33.031	33.832	25.188	26.288
0.877	36.938	37.134	32.527	33.133	-----	-----
0.916	36.192	36.497	31.974	32.473	-----	-----
0.954	35.303	35.706	-----	-----	-----	-----

ต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า PSNR ของ [30] ที่ $\varphi_p = 4$ และวิธีการที่นำเสนอที่ $\varphi_p = 6$ สำหรับภาพ Barbara, Boat และ Sailboat โดยที่การฝังข้อมูลเริ่มต้นที่ 0.038 bpp จนถึง 0.954 bpp

Pay Load (bpp)	PSNR (dB)					
	Barbara		Boat		Sailboat	
	$\varphi_p = 4$	$\varphi_p = 6$	$\varphi_p = 4$	$\varphi_p = 6$	$\varphi_p = 4$	$\varphi_p = 6$
0.038	59.318	59.322	57.336	57.355	57.854	59.663
0.076	56.018	56.011	53.225	53.236	53.195	55.181
0.114	53.630	53.636	50.896	50.883	50.355	51.686
0.153	51.904	51.906	49.010	49.004	47.278	49.292
0.191	49.618	49.613	46.494	46.507	45.545	47.237
0.229	48.467	48.473	45.038	45.043	44.200	45.002
0.267	47.109	47.120	43.996	44.003	42.572	44.009
0.305	45.987	45.988	42.743	42.737	41.402	42.692
0.343	44.956	44.978	41.608	41.678	40.220	41.412
0.381	44.165	44.138	40.916	40.924	39.258	40.356
0.420	43.158	43.182	40.008	40.012	38.278	39.296
0.458	42.379	42.374	39.285	39.297	37.407	38.372
0.496	41.512	41.508	38.485	38.491	36.654	37.507
0.534	40.749	40.752	37.892	37.890	35.963	36.759
0.572	39.991	39.994	37.188	37.192	35.251	35.978
0.610	39.246	39.245	36.582	36.580	34.597	35.338
0.648	38.464	38.465	36.022	36.014	33.994	34.596
0.687	37.638	37.639	35.500	35.494	33.431	33.831
0.725	36.747	36.749	34.993	34.994	32.861	33.253
0.763	35.650	35.652	34.439	34.442	32.293	32.503
0.801	34.512	34.509	34.093	34.095	31.750	32.046
0.839	33.312	33.311	33.656	33.656	31.211	31.311
0.877	32.257	32.254	33.122	33.119	30.624	30.742
0.916	-----	-----	32.712	32.711	30.009	30.005
0.954	-----	-----	32.000	32.004	-----	-----

สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวิธีการ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประยุกต์ข้อมูลภาพชนิดขาวดำซึ่งถูกสร้างขึ้นเองสำหรับการทดสอบ เพื่อฝังลงในภาพมาตรฐานระดับเทาต่าง และภาพทางการแพทย์ โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสำหรับการฝัง และการกู้คืนข้อมูลภาพต้นฉบับแสดงในรูปที่ 4.16 - 4.26 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา Lena ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 54.45 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา Lena ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา Lena (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา Lena ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

Watermark
by
@PANYINDEE

(ข)



(ค)



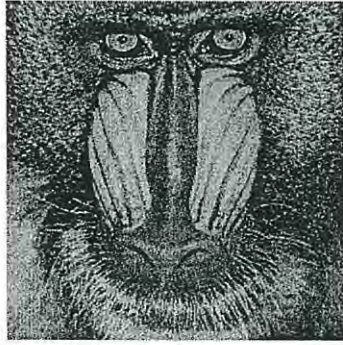
(ง)

Watermark
by
@PANYINDEE

(จ)

- รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา Barbara ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 53.89 dB)
- (ก) ภาพระดับเทา Barbara ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
 - (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
 - (ค) ภาพระดับเทา Barbara (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
 - (ง) ภาพระดับเทา Barbara ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
 - (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

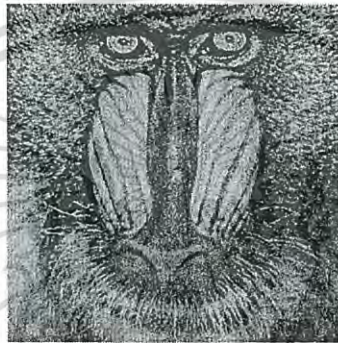
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา Baboon ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 45.09 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา Baboon ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา Baboon (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา Baboon ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

Watermark
by
@PANYINDEE

(ข)



(ค)



(ง)

Watermark
by
@PANYINDEE

(จ)

รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา Peppers ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 49.54 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา Peppers ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา Peppers (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา Peppers ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

Watermark
by
@PANYINDEE

(ข)



(ค)



(ง)

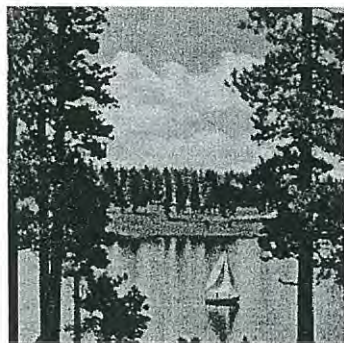
Watermark
by
@PANYINDEE

(จ)

รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา Boat ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 50.12 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา Boat ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา Boat (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา Boat ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

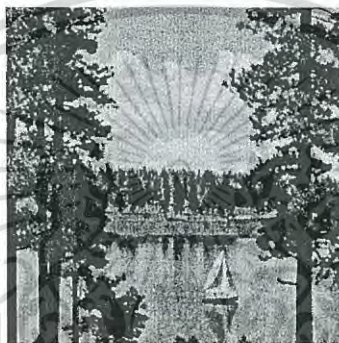
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



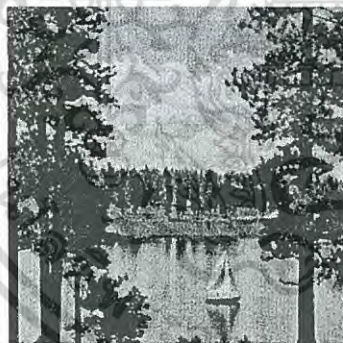
(ก)



(ข)



(ค)



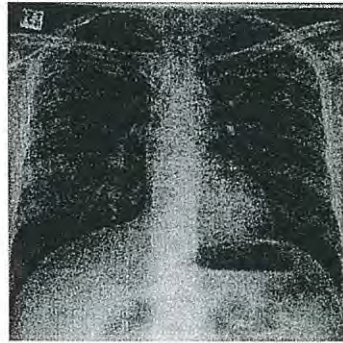
(ง)



(จ)

- รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา Sailboat ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 50.22 dB)
- (ก) ภาพระดับเทา Sailboat ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
 - (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
 - (ค) ภาพระดับเทา Sailboat (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
 - (ง) ภาพระดับเทา Sailboat ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
 - (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

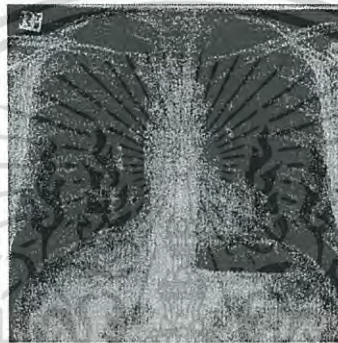
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

Watermark
by
@PANYINDEE

(ข)



(ค)



(ง)

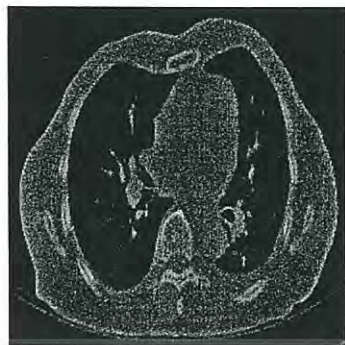
Watermark
by
@PANYINDEE

(จ)

รูปที่ 4.22 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา เอกซเรย์ ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 60.24 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา เอกซเรย์ ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา เอกซเรย์ (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา เอกซเรย์ ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

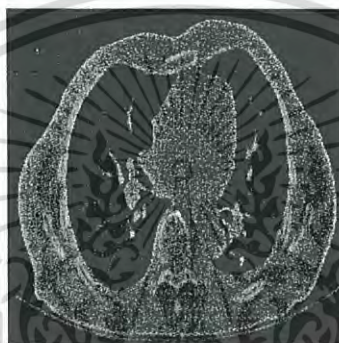
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



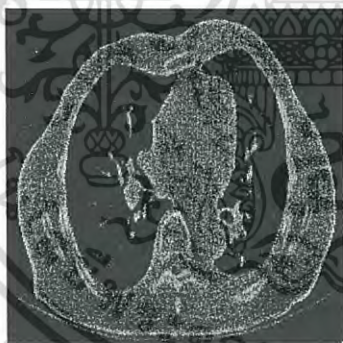
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

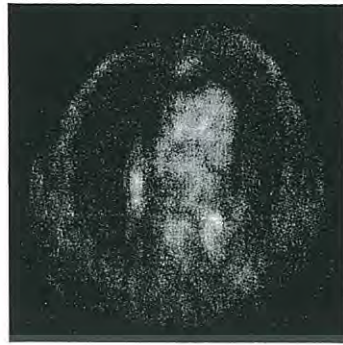


(จ)

รูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา CT ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 59.63 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา CT ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา CT (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา CT ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

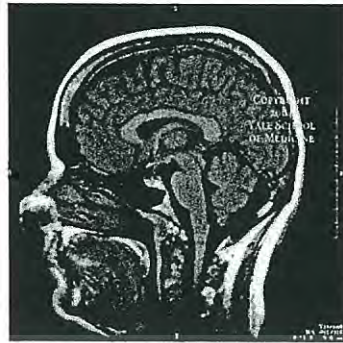


(จ)

รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
ฝังลงในภาพระดับเทา PET ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 60.12 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา PET ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา PET (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา PET ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



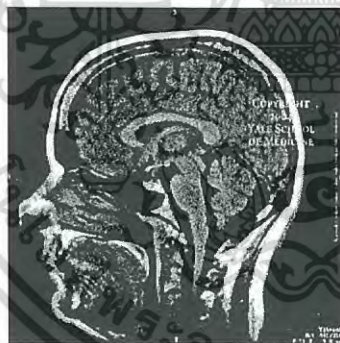
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.25 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝังลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ ฝังลงในภาพระดับเทา MRI ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 56.43 dB)

- (ก) ภาพระดับเทา MRI ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
- (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
- (ค) ภาพระดับเทา MRI (ก) ที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
- (ง) ภาพระดับเทา MRI ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
- (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

- รูปที่ 4.26 แสดงตัวอย่างการทดสอบฝึกลายน้ำดิจิทัลขนาด 200×200 พิกเซล โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ ฝึกลงในภาพระดับเทา Ultrasound ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล (PSNR = 56.65 dB)
- (ก) ภาพระดับเทา Ultrasound ต้นฉบับขนาด 512×512 พิกเซล
 - (ข) ภาพลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับขนาด 200×200 พิกเซล
 - (ค) ภาพระดับเทา Ultrasound (ก) ที่ถูกฝึกลายน้ำดิจิทัล (ข) โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ
 - (ง) ภาพระดับเทา Ultrasound ที่กู้คืนจากภาพ (ค)
 - (จ) ภาพลายน้ำดิจิทัลที่กู้คืนจากภาพ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุป และข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษา และพัฒนาขั้นตอนวิธีการฝังลายน้ำแบบที่สามารถกู้ภาพต้นฉบับกลับคืนได้ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวิธีการฝังลายน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยทั่วไป การฝังลายน้ำลงในภาพต้นฉบับจะส่งผลทำให้คุณภาพของภาพต่ำลงตามปริมาณของการฝัง ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ตามเงื่อนไขที่เคยกกล่าวไว้ในบทนำ ดังนั้น การหาวิธีการฝังที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น หลายปีที่ผ่านมามีหลายบทความวิจัยซึ่งนำเสนอการพัฒนาวิธีการฝังอย่างต่อเนื่อง และมีนัยสำคัญสำหรับตัวทำนายในรูปแบบใหม่ ๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็เช่นเดียวกัน หลายบทความพยายามใช้ตัวทำนายที่แตกต่าง เพื่อลดความบิดเบือนของภาพหลังการฝัง ซึ่งตัวทำนายเหล่านี้มีอิทธิพลอย่างมากต่องานสมัยใหม่ในกระบวนการฝัง PEE เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายถูกใช้สำหรับการฝัง ข้อมูลจะถูกขยายเป็น 2 เท่าตามกฎของเทคนิค PEE ดังนั้น เพื่อให้ได้รับผลลัพธ์ค่า PSNR สูงสุด ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายจำเป็นต้องมีคุณลักษณะแบบอุดมคติ (หรือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายเป็นศูนย์) ในทางเดียวกัน เมื่อสัมประสิทธิ์ตัวเลขของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายต่ำ การขยายเพื่อฝังจะไม่ส่งผลต่อการบิดเบือนมากนัก หากความคลาดเคลื่อนจากการทำนายมีค่าที่สูง การขยายสำหรับการฝังจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการบิดเบือนของภาพ หรืออีกในหมายความหนึ่ง ภาพหลังการฝังจะถูกบิดเบือนเป็นสองเท่าตามขนาดของการฝัง สิ่งเกิดว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่สูงมีโอกาสก่อให้เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow ได้มากกว่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่มีค่าต่ำ ปริมาณของแมพ ซึ่งจะถูกฝังเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลทั้งหมดสำหรับการฝัง ดังนั้น ผลกระทบตามมา คือ ข้อมูลที่ต้องฝังสูงขึ้นตามขนาดของแมพ เพราะฉะนั้น หนึ่งในฟังก์ชันการทำนายจึงมีผลต่อกระบวนการทั้งหมดของการฝังลายน้ำ อ้างอิงตามขั้นตอนวิธีการของ [26] ซึ่งรวมหลายเทคนิคเข้าไว้ด้วยกัน อาทิเช่น PEE, HS, DMT, Sorting เป็นต้น หนึ่งในตัวทำนายที่มีชื่อเสียงของพวกเขามีชื่อว่า Rhombus ถูกใช้ ค่าเฉลี่ยจากสี่ตำแหน่งพิเซลข้างเคียงจากสี่ทิศทางซึ่งมีนัยสำคัญต่อความบิดเบือนหลังการฝัง รูปแบบดังกล่าวช่วยให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสามารถเรียงลำดับได้ในทุกการฝัง สิ่งเกิดว่า ตัวทำนายของพวกเขามีลักษณะเป็นแบบคงตัว (หรือ มีค่าถ่วงน้ำหนักอยู่ที่ 0.25 เท่ากันทั้ง 4 ตำแหน่ง) หรืออีกนัยหนึ่ง คือหนึ่งในฟังก์ชันการทำนายจะถูกใช้สำหรับทุก ๆ ขนาดของการฝัง และทุก ๆ ภาพสำหรับการทดสอบ ซึ่งผลลัพธ์จะดีสำหรับบางภาพ และบางขนาดของการฝังเท่านั้น อันเนื่องมาจากในแต่ละขนาดของการฝัง และแต่ละภาพควรมีรูปร่างในการทำนายที่เหมาะสมในแบบของตัวเอง เพื่อให้ได้รับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่เข้าใกล้ค่าศูนย์มากที่สุดที่เป็นไปได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอหนึ่งตัวทำนายใหม่ที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างได้ตามขนาดของข้อมูลที่ต้องการฝัง และตามแต่ละลักษณะของภาพ เพื่อให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุด เทคนิค EVM ถูกใช้ร่วมด้วยในงานนี้ ซึ่งหนึ่งเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ (GA) สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้รับผลลัพธ์ PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้

การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการกับภาพมาตรฐานระดับเทา 8 บิต ขนาด 512x512 พิกเซล จำนวน 6 ภาพ และภาพทางการแพทย์จำนวน 5 ภาพ จาก 5 เครื่องมือที่แตกต่างกัน การทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกการฝังข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการฝังข้อมูลแบบสุ่ม(สัญญาณรบกวน) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอกับงานในอดีตก่อนหน้า กลุ่มที่สองเป็นการประยุกต์ใช้งานในภาพทางการแพทย์โดยฝังภาพลายน้ำดิจิทัลชนิดขาวดำ(แบบคงที่) ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาเพื่อการทดสอบนี้ ผลลัพธ์ถูกแสดงไว้ในบทที่ 4 วิธีการที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่สูงกว่าในเกือบทุก ๆ การฝัง ทุก ๆ ภาพที่ทดสอบ ตัวทำนายที่นำเสนอใหม่ทำงานได้ดีสามารถทำนายได้ถูกต้องสูงกว่าตัวทำนายแบบดั้งเดิม [23] ซึ่งส่งผลให้ความจุในการฝังสูงขึ้น สังเกตว่า ขนาดของพื้นที่แมปมีขนาดลดลงกว่างานในอดีต อันเนื่องมาจากการทำนายที่มีประสิทธิภาพ หนึ่งเครื่องมือในการบีบอัดข้อมูลไม่จำเป็นสำหรับงานนี้

วิจารณ์ผลลัพธ์จากการทดลอง พบว่า วิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ค่า PSNR ที่สูงกว่างานในอดีต อันเนื่องมาจากแนวคิดการใช้ตัวทำนายแบบที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงได้ ซึ่งดีกว่าตัวทำนายแบบคงตัว ตัวทำนายแบบคงตัวไม่พิจารณาในบริเวณที่ไกลออกไป เห็นได้ชัดในภาพการทดสอบ เช่น Pepper และ Sailboat ผลลัพธ์ค่า PSNR โดยเฉลี่ยสำหรับการฝังของวิธีการที่นำเสนอสูงกว่าเกือบ 2 dB เพราะรูปทรงตัวทำนายที่กว้างออกในแนวแกน x และแนวแกน y เพื่อให้ทำนายได้ถูกเมื่อนำมาใช้ร่วมกับเทคนิค EVM ข้อมูลที่มีขนาดเล็กสำหรับการฝังบรรลุความเป็นไปได้สูงสุดสำหรับค่า PSNR อย่างไรก็ตาม รูปทรงของตัวทำนายที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ และระดับการเรียงข้อมูลที่สอดคล้อง GA ถูกใช้สำหรับการกวาดหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเหล่านี้ ขอบเขตของการกวาดหาสำหรับพารามิเตอร์ของการทำนาย และพารามิเตอร์ของการเรียงข้อมูลของเทคนิค EVM เป็นสิ่งสำคัญ การจำกัดขอบเขตเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อช่วยลดภาระการทำงานของ GA สังเกตว่า การกำหนดขอบเขตที่กว้างเกินไปอาจไม่จำเป็น หรือ การกำหนดขอบเขตที่แคบเกินไปอาจไม่พบบริเวณที่เหมาะสม ขอบเขตในการกวาดหาจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการประมวลผล ผลลัพธ์ที่ได้รับจากขอบเขตเหล่านั้น การจะเข้าถึงเป้าหมาย GA จะทำซ้ำจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ หรือ ครบตามจำนวนรอบที่ถูกตั้งไว้ก่อนหน้า ขอบเขตที่เหมาะสมในงานนี้ได้รับมาจากการทดสอบ

ในการทดลองกับกลุ่มตัวอย่างบางภาพแบบจำเพาะเจาะจง เช่น ภาพทางการแพทย์ โดยทั่วไปภาพประเภทนี้จะพบสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ภายในภาพ ซึ่งพื้นผิวของภาพส่วนใหญ่มีสีดาราเรียบเป็นบริเวณกว้าง แต่ในบางบริเวณ เช่น เนื้อเยื่อที่สนใจจะพบว่ามีลักษณะของพิกเซลที่มีความแปรปรวนสูง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการทำนายที่นำเสนอ การทดสอบส่วนใหญ่ฝังข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวของขนาดภาพทั้งหมด ซึ่งรายละเอียดของประสิทธิภาพอยู่นอกเหนือจากขอบเขตงานวิจัยนี้ จึงไม่ขออธิบายถึง

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

การปรับปรุงวิธีการในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่ายังมีประเด็นที่น่าสนใจเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ดังต่อไปนี้

ประการแรกสำหรับแนวทางในการพัฒนา อาจพิจารณาหาฟังก์ชันการทำนายรูปแบบอื่นที่เหมาะสมโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือในการค้นหาเข้ามาช่วยเพื่อลดในความซับซ้อนของกระบวนการ และระยะเวลาในการประมวลผล

ประการต่อมา การปรับปรุงประสิทธิภาพของช่วงสำหรับค่าเทรซโพลต์ที่เหมาะสม ในอดีตที่ผ่านมา รวมถึงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เส้นทางการวิ่งเข้าสู่ช่วงที่เหมาะสมที่สุดถือว่าเป็นสิ่งจำเป็น และอาจถูกออกแบบใหม่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. B. Meggs, "A History of Graphic Design (Third ed.)", John Wiley & Sons, pp. 58, 1998.
- [2] A. Z. Tirkel, G. A. Rankin, R. M. van Schyndel, W. J. Ho, N. R. A. Mee, C. F. Osborne "Electronic Water Mark", DICTA-93 Macquarie University, pp. 666-672, 1993.
- [3] Jen-Bang Feng, luon-Chang Lin, Chwei-Shyong Tsai, and Yen-Ping Chu, "Reversible Watermarking: Current Status and Key Issues", *International Journal of Network Security*, vol. 2, no. 3, pp. 161-171, 2006.
- [4] J. Tian, "Reversible watermarking using a difference expansion", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 890-896, 2003.
- [5] A. M. Alattar, "Reversible watermark using difference expansion of triplets", In *Proc. Int. Conf. Image Process.*, vol. 1, pp. 501-504, 2003.
- [6] A. M. Alattar, "Reversible watermark using difference expansion of quads", In *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Process.*, vol. 3, pp. 377-380, 2004.
- [7] A. M. Alattar, "Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 8, pp. 1147-1156, 2004.
- [8] L. H. J. Kamstra and A. M. Heijmans, "Reversible data embedding into images using wavelet and sorting", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 14, no. 12, pp. 2082-2090, 2005.
- [9] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, "Reversible data hiding", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 354-362, 2006.
- [10] D. M. Thodi and J. J. Rodriguez, "Reversible watermarking by prediction-error expansion", In *Proc. IEEE Southwest Symp. Image Anal. Interpretation*, pp. 21-25, 2004.
- [11] D. M. Thodi and J. J. Rodriguez, "Expansion embedding techniques for reversible watermarking", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 16, no. 3, pp. 721-730, 2007.
- [12] S. Lee, C. D. Yoo, and T. Kalker "Reversible image watermarking based on integer-to-integer wavelet transform", *IEEE Trans. Inform. Forensics Security*, vol. 2, no. 3, pp. 321-330, 2007.
- [13] J. Fridrich, M. Golijan, and R. Du, "Lossless data embedding for all image formats", In *Proc. SPIE, Security Watermarking Multimedia Contents*, 2002.

- [14] G. Xuan, J. Chen, J. Zhu, Y. Q. Shi, Z. Ni, and W. Su, "Lossless data hiding based on integer wavelet transform", In *Proc. IEEE Workshop Multimedia Signal Process.*, pp. 312-315, 2002.
- [15] B. Yang, M. Schmucker, C. Busch, X. Niu, and S. Sun, "Approaching optimal value expansion for reversible watermarking", In *Proc. 7th ACM Multimedia Security Workshop*, pp. 95-102, 2005.
- [16] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, "Reversible data hiding", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 354-362, 2006.
- [17] S. Lee, C. D. Yoo, and T. Kalker "Reversible image watermarking based on integer-to-integer wavelet transform," *IEEE Trans. Inform. Forensics Security*, vol. 2, no. 3, pp. 321-330, 2007.
- [18] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, W. Su, Q. Sun, and X. Lin, "Robust lossless image data hiding", In *Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia Expo*, pp. 2199-2202, 2004.
- [19] Y. Hu, H. K. Lee, and J. Li, "DE-based Reversible data hiding with improved overflow location map", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 250-260, 2009.
- [20] X. Li, B. Yang and T. Zeng, "Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 12, pp. 3524-3533, 2011.
- [21] H. J. Hwang, H. J. Kim, V. Sachnev, and S. H. Joo, "Reversible watermarking method using optimal histogram pair shifting based on prediction and sorting", *KSII, Trans. Internet Inform. Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 655-670, 2010.
- [22] G. Coatrieux, W. Pan, N. Cuppens-Bouahia, F. Cuppens, and C. Roux, "Reversible watermarking based on invariant image classification and dynamic histogram shifting", *IEEE Trans. Inf. Forensics Security.*, vol. 8, no. 1, pp. 111-120, 2013.
- [23] V. Sachnev, H. J. Kim, J. Nam, S. Suresh and Y. Q. Shi, "Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 7, pp. 989-999, 2009.
- [24] C. Dragoi and D. Coltuc, "Improved rhombus interpolation for reversible watermarking by difference expansion", In *Proc. EUSIPCO*, pp. 1688-1692, 2012.
- [25] B. Ou, X. Li, Y. Zhao and R. Ni, "Reversible data hiding based on PDE predictor," *Journal of Systems and Software.*, vol. 86, no. 10, pp. 2700-2709, 2013.
- [26] C. Panyindee, and C. Pintavirooj, "Reversible Watermarking Using Gaussian Weight Prediction and Genetic Algorithm", In *Proc. IMECS*, vol. 1, pp. 457-461, 2013.
- [27] C. Panyindee and C. Pintavirooj, "Optimizations using the genetic algorithm for reversible watermarking", In *Proc. ECTI-CON*, pp. 1-5, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] X. Li, B. Li, B. Yang, and T. Zeng, "General Framework to Histogram-Shifting-Based Reversible Data Hiding", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 6, pp. 2181-2191, 2013.
- [29] W. Shaowei, Z. Yao, N. RongRong, and P. Jeng-Shyang, "Lossless data hiding based on prediction-error adjustment", *Sci China Ser F-Inf Sci*, vol. 52, no. 2, pp. 269-275, 2009.
- [30] H. J. Kim, V. Sachnev, Y. Q. Shi, J. Nam, and H. G. Choo, "A novel difference expansion transform for reversible data embedding", *IEEE Trans. Inform. Forensic Security*, vol. 3, no. 3, pp. 456-465, 2008.
- [31] M. Goljan, J. Fridrich, and R. Du, "Distortion-free data embedding for images", In *Proc. Inform. Hiding Workshop*, pp. 27-41, 2001.
- [32] J. Fridrich, M. Golijan, and R. Du, "Lossless data embedding for all image formats", In *Proc. SPIE, Security Watermarking Multimedia Contents*, 2002.
- [33] M. van der Veen, F. Bruekers, A. Leest, and S. Cavin, "High capacity reversible watermarking for audio", In *Proc. SPIE, Security, Steganography, Watermarking Multimedia Contents*, vol. 5020, pp. 1-11, 2003.
- [34] A. Leest, M. van der Veen, and F. Bruekers, "Reversible watermarking for images", In *Proc. SPIE, Security, Steganography, Watermarking Multimedia Contents*, 2004.
- [35] M. Celik, G. Sharma, A. M. Tekalp, and E. Saber, "Reversible data hiding", In *Proc. Int. Conf. Image Process.*, pp. 157-160, 2002.
- [36] B. Yang, M. Schmucker, W. Funk, C. Busch, and S. Sun, "Integer DCT based reversible watermarking for images using companding technique", In *Proc. SPIE Security, Steganography, Watermarking Multimedia Contents*, vol. 5306, pp. 405-415, 2004.
- [37] B. Yang, M. Schmucker, C. Busch, X. Niu, and S. Sun, "Approaching optimal value expansion for reversible watermarking", In *Proc. 7th ACM Multimedia Security Workshop*, pp. 95-102, 2005.
- [38] G. Xuan, J. Chen, J. Zhu, Y. Q. Shi, Z. Ni, and W. Su, "Lossless data hiding based on integer wavelet transform", In *Proc. IEEE Workshop Multimedia Signal Process.*, , pp. 312-315, 2002.
- [39] G. Xuan, Y. Q. Shi, Z. C. Ni, J. Chen, C. Yang, Y. Zhen, and J. Zheng, "High capacity lossless data hiding based on integer wavelet transform", In *Proc. IEEE Int. Conf. Circuits Syst.*, pp. 29-32, 2004.
- [40] G. Xuan, C. Yang, Y. Zhen, Y. Q. Shi, and Z. Ni "Reversible data hiding based on wavelet spread spectrum", In *Proc. IEEE Int. Workshop Multimedia Signal Process.*, pp. 211-213, 2004.

- [41] D. Zou, Y. Q. Shi, Z. Ni, and W. Su, "A semi-fragile lossless digital watermarking scheme based on integer wavelet transform", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 16, no. 10, pp. 1294-1300, 2006.
- [42] C. Kotvicha, P. Sanguansat and M. L. K. Kasemsa, "Expand variance mean sorting for reversible watermarking", In *Proc. IEEE Int. Conf. Signal Inform. Process.*, pp. 668-673, 2012.
- [43] A. Chipperfield, P. Fleming, H. Pohlheim and C. Fonseca, "Genetic Algorithm Toolbox for Use with MATLAB User's Guide Version 1.2", Department of Automatic Control and System Engineering, University of Sheffield, England.
- [44] The USC-SIPI Image Database, Miscellaneous [Online]. Available: <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc.> [Accessed: Oct. 11, 2013].
- [45] Miscellaneous Gray Level Images (512x512) [Online]. Available: <http://decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/g512.php>. [Accessed: Oct. 11, 2013].



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



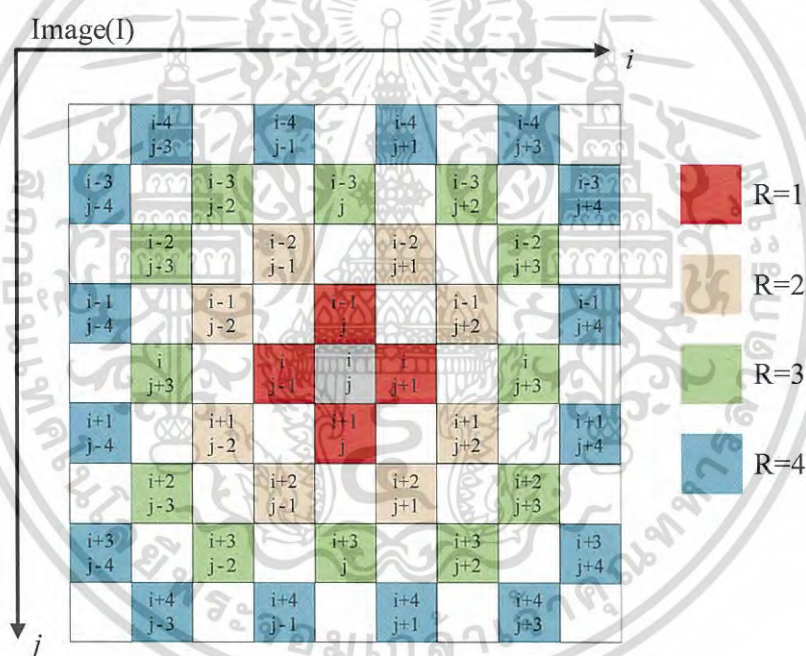
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสมการในตำแหน่ง
 ครอสเซต และดอทเซตของการคำนวณค่าการทำนาย,
 พารามิเตอร์ σ_x, σ_y สำหรับตัวทำนายเกาส์เซียนแบบถ่วง
 น้ำหนัก และการคำนวณ φ_s สำหรับการเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้
 เทคนิค EVM

ก.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสมการในครอสเซต และดอทเซตสำหรับการ
 คำนวณค่าการทำนาย



รูปที่ ก.1 แสดงตัวอย่างแบบจำลองเมตริกซ์ภาพที่มีรัศมี 4 ระดับ (R1-R4) ของตำแหน่งพิกเซลที่
 เป็นไปได้ซึ่งถูกใช้สำหรับการคำนวณค่าการทำนาย

จากรูปที่ ก.1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแบบจำลองเมตริกซ์ภาพเพื่อหาความสัมพันธ์
 ของสมการค่าการทำนายสำหรับแต่ละรัศมี ดังนี้
 เมื่อ $R = 1$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$u'_{i,j} = \sum_{l=-1}^0 (w_{l,l+1} v_{i+l,j+l+1} + w_{l+1,l} v_{i+l+1,j+l}) \quad (ก1.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $R = 2$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$u'_{i,j} = \sum_{l=-1}^0 (w_{l,l+1}v_{i+l,j+l+1} + w_{l+1,l}v_{i+l+1,j+l}) + \sum_{l=-2}^1 (w_{l,l+3}v_{i+l,j+l+3} + w_{l+3,l}v_{i+l+3,j+l}) \quad (ก1.2)$$

เมื่อ $R = 3$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$u'_{i,j} = \sum_{l=-1}^0 (w_{l,l+1}v_{i+l,j+l+1} + w_{l+1,l}v_{i+l+1,j+l}) + \sum_{l=-2}^1 (w_{l,l+3}v_{i+l,j+l+3} + w_{l+3,l}v_{i+l+3,j+l}) + \sum_{l=-3}^{-2} (w_{l,l+5}v_{i+l,j+l+5} + w_{l+5,l}v_{i+l+5,j+l}) \quad (ก1.3)$$

เมื่อ $R = 4$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$u'_{i,j} = \sum_{l=-1}^0 (w_{l,l+1}v_{i+l,j+l+1} + w_{l+1,l}v_{i+l+1,j+l}) + \sum_{l=-2}^1 (w_{l,l+3}v_{i+l,j+l+3} + w_{l+3,l}v_{i+l+3,j+l}) + \sum_{l=-3}^{-2} (w_{l,l+5}v_{i+l,j+l+5} + w_{l+5,l}v_{i+l+5,j+l}) + \sum_{l=-4}^{-3} (w_{l,l+7}v_{i+l,j+l+7} + w_{l+7,l}v_{i+l+7,j+l}) \quad (ก1.4)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของแต่ละรัศมี R ตามตัวอย่างจากวงที่ 1-4

R=1	R-1=0	R=2	R-1=1	R=3	R-1=2	R=4	R-1=3
			R-3=-1		R-3=0		R-3=1
					R-5=-2		R-5=-3
							R-7=-3

สังเกตว่า ความสัมพันธ์ของรัศมี R วงที่ 1-4 คือ 1, 3, 5 และ 7 มีการเพิ่มขึ้นทีละ 2 หรือ $(2k-1)$ ดังนั้น ค่าการทำนายสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u'_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^R \sum_{l=-R}^{R-(2k-1)} (w_{l,l+2k-1} v_{i+l,j+l+2k-1} + w_{l+2k-1,l} v_{i+l+2k-1,j+l})}{\sum_{k=1}^R \sum_{l=-R}^{R-(2k-1)} (w_{l,l+2k-1} + w_{l+2k-1,l})} \quad (ก1.5)$$

พิจารณาต่อ เมื่อ $R = 1$ ประกอบด้วย 4 พิกเซล
 $R = 2$ ประกอบด้วย $8+4 = 12$ พิกเซล
 $R = 3$ ประกอบด้วย $12+8+4 = 24$ พิกเซล
 $R = 4$ ประกอบด้วย $16+12+8+4 = 40$ พิกเซล

ข้อสังเกต เมื่อ R เพิ่มจำนวนของพิกเซลที่ถูกใช้สำหรับการทำนายก็เพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของพิกเซลสามารถพิจารณาในรูปของอนุกรมเรขาคณิต ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_n &= (2a_1 + (n-1)d) \\ &= 2n^2 + 2n \end{aligned} \quad (ก1.6)$$

พิจารณาต่อความสัมพันธ์ของ $R = 1$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ตำแหน่งคู่

Cross set N (even)	Dot set M (even)
$r_1 = 2 : 2 : N - 2$	$r_1 = 2 : 2 : N - 2$
$c_1 = 2 : 2 : M - 2$	$c_1 = 2 : 2 : M - 1$
$r_2 = 3 : 2 : N - 1$	$r_2 = 2 : 2 : N - 1$
$c_2 = 3 : 2 : M - 1$	$c_2 = 2 : 2 : M - 2$

พิจารณาต่อความสัมพันธ์ของ $R = 2$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคู่

Cross set N (even)	Dot set M (even)
$r_1 = 3 : 2 : N - 3$	$r_1 = 3 : 2 : N - 3$
$c_1 = 3 : 2 : M - 3$	$c_1 = 4 : 2 : M - 2$
$r_2 = 4 : 2 : N - 2$	$r_2 = 4 : 2 : N - 2$
$c_2 = 4 : 2 : M - 2$	$c_2 = 3 : 2 : M - 3$

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ของ $R = 3$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคู่

Cross set N (even)	Dot set M (even)
$r_1 = 4 : 2 : N - 4$	$r_1 = 4 : 2 : N - 4$
$c_1 = 4 : 2 : M - 4$	$c_1 = 5 : 2 : M - 3$
$r_2 = 5 : 2 : N - 3$	$r_2 = 5 : 2 : N - 3$
$c_2 = 5 : 2 : M - 3$	$c_2 = 4 : 2 : M - 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความสัมพันธ์ของ $R = 4$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคู่

Cross set N (even)	Dot set M (even)
$r_1 = 5 : 2 : N - 5$	$r_1 = 5 : 2 : N - 5$
$c_1 = 5 : 2 : M - 5$	$c_1 = 6 : 2 : M - 4$
$r_2 = 6 : 2 : N - 4$	$r_2 = 6 : 2 : N - 4$
$c_2 = 6 : 2 : M - 4$	$c_2 = 5 : 2 : M - 5$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวของ R ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคู่สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแถว (N) และหลัก (M) ได้ดังนี้

Cross set N (even)	Dot set M (even)
$r_1 = R+1 : 2 : N-(R+1)$	$r_1 = R+1 : 2 : N-(R+1)$
$c_1 = R+1 : 2 : M-(R+1)$	$c_1 = R+2 : 2 : M-R$
$r_2 = R+2 : 2 : N-R$	$r_2 = R+2 : 2 : N-R$
$c_2 = R+2 : 2 : M-R$	$c_2 = R+1 : 2 : M-(R+1)$

พิจารณาความสัมพันธ์ของ $R = 1$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคี่

Cross set N (odd)	Dot set M (odd)
$r_1 = 2 : 2 : N-1$	$r_1 = 2 : 2 : N-1$
$c_1 = 2 : 2 : M-1$	$c_1 = 2 : 2 : M-2$
$r_2 = 3 : 2 : N-2$	$r_2 = 2 : 2 : N-2$
$c_2 = 3 : 2 : M-2$	$c_2 = 2 : 2 : M-1$

พิจารณาความสัมพันธ์ของ $R = 2$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคี่

Cross set N (odd)	Dot set M (odd)
$r_1 = 3 : 2 : N-2$	$r_1 = 3 : 2 : N-2$
$c_1 = 3 : 2 : M-2$	$c_1 = 4 : 2 : M-3$
$r_2 = 4 : 2 : N-3$	$r_2 = 4 : 2 : N-3$
$c_2 = 4 : 2 : M-3$	$c_2 = 3 : 2 : M-2$

พิจารณาความสัมพันธ์ของ $R = 3$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคี่

Cross set N (odd)	Dot set M (odd)
$r_1 = 4 : 2 : N-3$	$r_1 = 4 : 2 : N-3$
$c_1 = 4 : 2 : M-3$	$c_1 = 5 : 2 : M-4$
$r_2 = 5 : 2 : N-4$	$r_2 = 5 : 2 : N-4$
$c_2 = 5 : 2 : M-4$	$c_2 = 4 : 2 : M-3$

พิจารณาคอมพลิเมนต์ของ $R = 4$ สำหรับแถว (N) และหลัก (M) ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคือ

Cross set N (odd)	Dot set M (odd)
$r_1 = 5 : 2 : N-4$	$r_1 = 5 : 2 : N-4$
$c_1 = 5 : 2 : M-4$	$c_1 = 6 : 2 : M-5$
$r_2 = 6 : 2 : N-5$	$r_2 = 6 : 2 : N-5$
$c_2 = 6 : 2 : M-5$	$c_2 = 5 : 2 : M-4$

จากคอมพลิเมนต์ของ R ในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งที่สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแถว (N) และหลัก (M) ได้ดังนี้

Cross set N (odd)	Dot set M (odd)
$r_1 = R+1 : 2 : N-R$	$r_1 = R+1 : 2 : N-R$
$c_1 = R+1 : 2 : M-R$	$c_1 = R+2 : 2 : M-(R+1)$
$r_2 = R+2 : 2 : N-(R+1)$	$r_2 = R+2 : 2 : N-(R+1)$
$c_2 = R+2 : 2 : M-(R+1)$	$c_2 = R+1 : 2 : M-R$

โปรดสังเกต การเพิ่มขึ้นของ N จะเพิ่มทีละ 1 ดังนี้

1	2	3	4	5	6	7	8	N
0	1	0	1	0	1	0	1	
2	3	4	5	6	7	8	9	N+1
0	1	0	1	0	1	0	1	mod(N+1,2)
1	2	3	4	5	6	7	8	N
0	1	0	1	0	1	0	1	
0	1	0	1	0	1	0	1	mod(N,2)

พิจารณาคอมพลิเมนต์ของพิกเซลในโครสเซตชุดแรกในเมตริกซ์ภาพตำแหน่งคู่ และคือ

Cross set (even)	Cross set (odd)
$r_1 = R+1 : 2 : N-(R+1)$	$r_1 = R+1 : 2 : N-R$
$c_1 = R+1 : 2 : M-(R+1)$	$c_1 = R+2 : 2 : M-R$

เมื่อ $r_1 = R+1 : 2 : N-(R+\text{mod}(N+1,2))$
 $c_1 = R+1 : 2 : M-(R+\text{mod}(M+1,2))$

ดังนั้น

$$a_n = R+1+(n-1)2 = R+1+2n-2 = R2n-1$$

$$R+2n-1 = N - (R+\text{mod}(n+1,2))$$

$$2n = N-2R-\text{mod}(N+1,2)+1$$

$$N = N/2 - R - (\text{mod}(N+1,2))/2 + 1/2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A1 = \{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N+1, 2)/2 + 1/2\}\} \quad (\text{ก1.7})$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของพิกเซลในครอสเซตชุดที่สองในเมตริกซ์ตำแหน่งคู่ และคี่

Cross set (even)	Cross set (odd)
$r_1 = R+1 : 2 : N-(R+1)$	$r_1 = R+1 : 2 : N-R$
$c_1 = R+1 : 2 : M-(R+1)$	$c_1 = R+2 : 2 : M-R$

เมื่อ $r_1 = R+1 : 2 : N-(R+\text{mod}(N+1, 2))$
 $c_1 = R+1 : 2 : M-(R+\text{mod}(M+1, 2))$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} a_n &= R+1+(n-1)2=R+1+2n-2=R2n-1 \\ R+2n-1 &= N-(R+\text{mod}(n+1, 2)) \\ 2n &= N-2R-\text{mod}(N+1, 2)+1 \\ n &= N/2-R-(\text{mod}(N+1, 2))/2+1/2 \end{aligned}$$

$$A1 = \{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N+1, 2)/2 + 1/2\}\} \quad (\text{ก1.8})$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของพิกเซลในดอทเซตชุดที่หนึ่ง และสอง ในเมตริกซ์ตำแหน่งคู่ และคี่

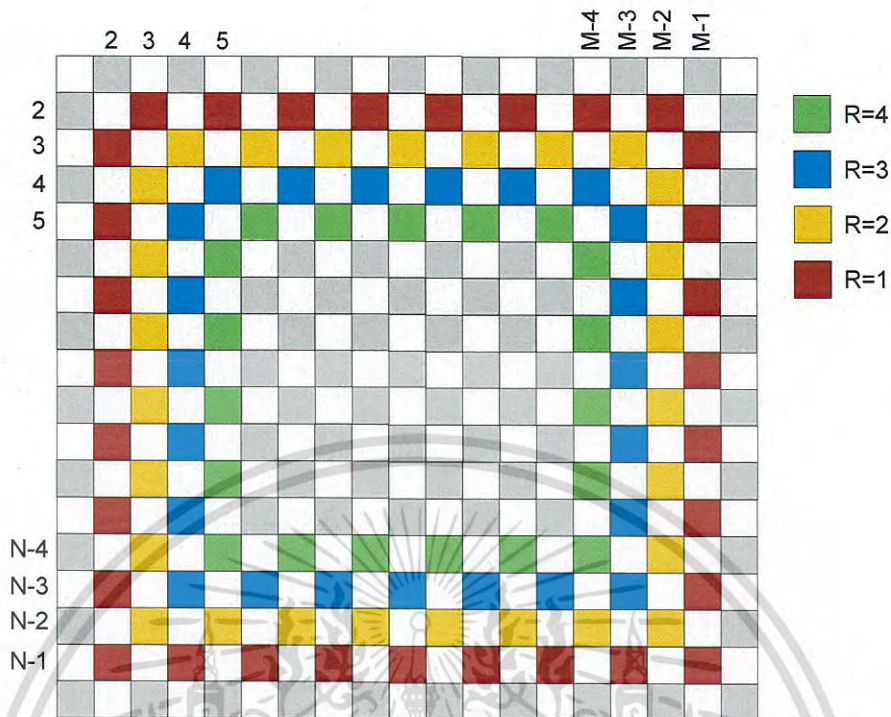
Dot set (even)	Dot set (odd)
$r_1 = R+1:2:N-(R+1)$	$r_1 = R+1:2:N-R$
$c_1 = R+1:2:M-(R+1)$	$c_1 = R+2:2:M-R$
$r_2 = R+1:2:N-(R+1)$	$r_2 = R+1:2:N-R$
$c_2 = R+1:2:M-(R+1)$	$c_2 = R+2:2:M-R$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ของพิกเซลในครอสเซตของทั้งสองกลุ่มสามารถสรุปเป็นสมการดังนี้

$$(i, j) \in (\{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}, \{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}) \cup (\{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}, \{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}) \quad (\text{ก1.9})$$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ของพิกเซลในดอทเซตของทั้งสองกลุ่มสามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$(i, j) \in (\{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}, \{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}) \cup (\{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}, \{R+2n-1 | n \in \{1, \dots, N/2 - R - \text{mod}(N-1, 2)/2 + 1/2\}\}) \quad (\text{ก1.10})$$



รูปที่ ก.2 แสดงขอบเขตความเป็นไปได้ 4 ระดับ (R1-R4) ของตำแหน่งพิกเซลซึ่งถูกใช้สำหรับการคำนวณหาค่าการทำงาน

ก.2 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ σ_x และ σ_y สำหรับตัวทำนายเกาส์เซียนเวท

$$f(x,y) = e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)} \tag{ก1.11}$$

จากสมการ ก.1.11 พิจารณาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ σ_x สำหรับรัศมีเวทวงหนึ่ง R=1 และรัศมีเวทวงที่สอง R=2 ทางแนวแกน x ดังต่อไปนี้

$$w_{R=1} = e^{-\left(\frac{1}{2\sigma_x^2}\right)}, w_{R=2} = e^{-\left(\frac{2}{2\sigma_x^2}\right)}$$

$$\frac{w_1}{w_2} = \alpha = \frac{e^{-\left(\frac{1}{2\sigma_x^2}\right)}}{e^{-\left(\frac{4}{2\sigma_x^2}\right)}}$$

$$\alpha = e^{\frac{4}{2\sigma_x^2} - \frac{1}{2\sigma_x^2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

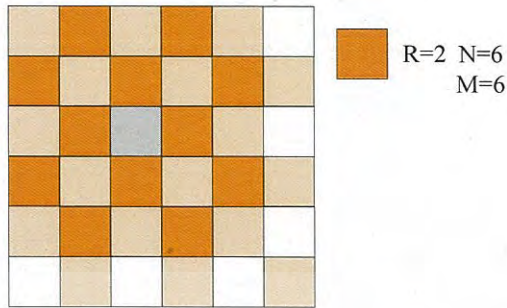
$$\begin{aligned}
 &= e^{\frac{3}{2\sigma_x^2}} \\
 \ln \alpha &= \ln e^{\frac{3}{2\sigma_x^2}} \\
 2\sigma_x^2 &= \frac{3}{2 \ln \alpha} \\
 \text{และ} \quad \sigma_x &= \sqrt{\frac{3}{3 \ln \alpha}}
 \end{aligned} \tag{ก1.12}$$

จากสมการ ก1.11 พิจารณาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ σ_y สำหรับรัศมีเวทวงที่หนึ่ง $R = 1$ ทางแนวแกน x และทางแนวแกน y ดังต่อไปนี้

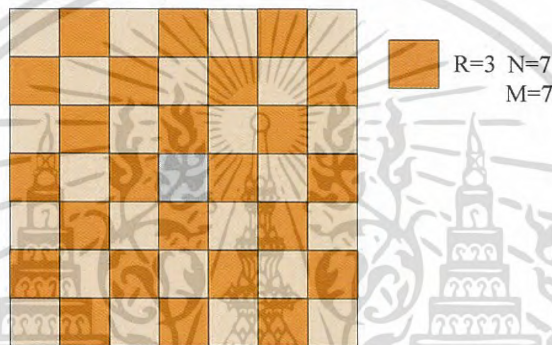
$$\begin{aligned}
 w^x_{R=1} &= \beta \cdot w^y_{R=1} \\
 e^{\frac{1}{2\sigma_x^2}} &= \beta \cdot e^{\frac{1}{2\sigma_y^2}} \\
 \frac{e^{\frac{1}{2\sigma_x^2}}}{e^{\frac{1}{2\sigma_y^2}}} &= \beta \\
 \frac{e^{\frac{1}{2\sigma_y^2} - \frac{1}{2\sigma_x^2}}}{e^{\frac{1}{2\sigma_y^2} - \frac{1}{2\sigma_x^2}}} &= \beta \\
 \ln e^{\frac{1}{2\sigma_y^2} - \frac{1}{2\sigma_x^2}} &= \ln \beta \\
 \frac{1}{2\sigma_y^2} - \frac{1}{2\sigma_x^2} &= \ln \beta \\
 \frac{1}{2\sigma_y^2} &= \ln \beta + \frac{1}{2\sigma_x^2} \\
 \frac{1}{\sigma_y^2} &= 2 \ln \beta + \frac{1}{\sigma_x^2} \\
 \frac{1}{\sigma_y^2} &= \frac{6 \ln \beta + \ln \alpha}{3} \\
 \sigma_y^2 &= \frac{3}{6 \ln \beta + \ln \alpha} \\
 \text{และ} \quad \sigma_y &= \sqrt{\frac{3}{6 \ln \beta + \ln \alpha}}
 \end{aligned} \tag{ก1.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

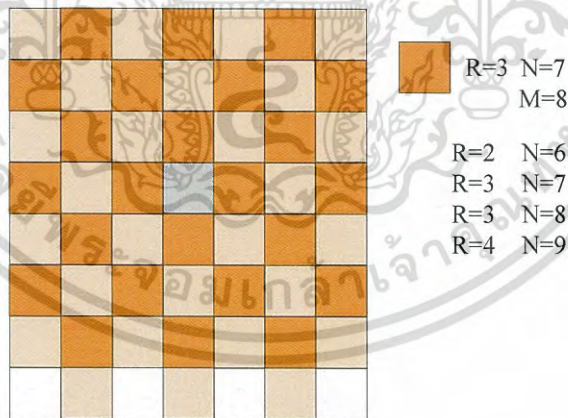
พิจารณาต่อที่รัศมี $R = 2-4$ ดังรูปที่ ก.2, ก.3, และ ก.4 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ ก.3 แสดงตัวอย่าง $R = 2$ สำหรับ 6 แถว และ 6 หลัก



รูปที่ ก.4 แสดงตัวอย่าง $R = 3$ สำหรับ 7 แถว และ 7 หลัก



รูปที่ ก.5 แสดงตัวอย่าง $R = 3$ สำหรับ 8 แถว และ 7 หลัก

จากความสัมพันธ์ของรัศมี R_1-R_4 สำหรับแถว (N) และหลัก (M) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$R \in \left\{ 1, 2, \dots, \min \left(\left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{M-1}{2} \right\rfloor \right) \right\} \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor \tag{ก1.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสมการในตำแหน่งครอสเซต และดอทเซต
สำหรับการคำนวณ φ_s ของการเรียงค่า PE โดยใช้เทคนิค EVM

พิจารณาความสัมพันธ์แต่ละการขยาย (ex) (ตัวอย่าง ex=1-8) ดังต่อไปนี้

ex = 1

$$n = 3^2 - \left(\frac{3^2 - 1}{2}\right) - 4 = 1$$

ex = 2

$$n = 3^2 - \left(\frac{3^2 - 1}{2}\right) = 5$$

ex = 3

$$n = 5^2 - \left(\frac{5^2 - 1}{2}\right) - 4 = 9$$

ex = 4

$$n = 5^2 - \left(\frac{5^2 - 1}{2}\right) = 13$$

ex = 5

$$n = 7^2 - \left(\frac{7^2 - 1}{2}\right) - 4 = 21$$

ex = 6

$$n = 7^2 - \left(\frac{7^2 - 1}{2}\right) = 25$$

ex = 7

$$n = 9^2 - \left(\frac{9^2 - 1}{2}\right) - 4 = 37$$

ex = 8

$$n = 9^2 - \left(\frac{9^2 - 1}{2}\right) = 41$$

จากความสัมพันธ์ของการขยายสำหรับ ex = 1, 3, 5, 7 และ 9 พบว่ามีความสอดคล้องของรูปแบบสมการ ดังนั้น สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$n = (ex + 2)^2 - \left(\frac{(ex + 2)^2 - 1}{2}\right) - 4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= (ex+2)^2 - \frac{(ex+2)^2}{2} + \frac{1}{2} - 4 \\
 &= \frac{(ex+2)^2}{2} - \frac{7}{2} = \frac{ex^2 - 4ex + 4}{2} - \frac{7}{2} = \frac{ex^2}{2} + 2ex + 2 - \frac{7}{2}
 \end{aligned}$$

และ

$$n = \frac{ex^2}{2} + 2ex + -\frac{3}{2} \quad (\text{ก1.15})$$

จากความสัมพันธ์ของการขยายสำหรับ $ex = 2, 4, 6$ และ 8 พบว่ามีความสอดคล้องของรูปแบบสมการ ดังนั้น สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 n &= (ex+1)^2 - \left(\frac{(ex+1)^2 - 1}{2} \right) \\
 &= \frac{(ex+1)^2}{2} + \frac{1}{2} = \frac{ex^2 - 2ex + 1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{ex^2}{2} + ex + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \\
 &= \frac{ex^2}{2} + ex + 1
 \end{aligned}$$

และ

$$n = \frac{ex^2}{2} + ex + 1 \quad (\text{ก1.16})$$

เมื่อแทน $ex = 1$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^1 = \frac{\left(\sum_{l=0}^0 \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^0 \sum_{l=-1}^{1-2k} (\mu_{i,j}) \right)}{\frac{1^2}{2} + 2(1) - \frac{3}{2}}$$

เมื่อแทน $ex = 2$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^2 = \frac{\left(\sum_{l=-1}^1 \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^1 \sum_{l=-1}^{1-2k} (\mu_{i+l,j+l+2} + \mu_{i+l+2,j+l}) \right)}{\frac{2^2}{2} + 2 + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทน $ex = 3$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^3 = \frac{\left(\sum_{l=-1}^1 \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^1 \sum_{l=-2}^{2-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l}) \right)}{\frac{3^2}{2} + 2(3) - \frac{3}{2}}$$

เมื่อแทน $ex = 4$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^4 = \frac{\left(\sum_{l=-2}^2 \mu_{i+l,j+l} + \sum_{l=-2}^{2-2} (\mu_{i+l,j+l+2} + \mu_{i+l+2,j+l}) \right) + \sum_{l=-2}^{2-4} (\mu_{i+l,j+l+4} + \mu_{i+l+4,j+l})}{\frac{4^2}{2} + 4 + 1}$$

เมื่อแทน $ex = 5$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^5 = \frac{\left(\sum_{l=-2}^2 \mu_{i+l,j+l} + \sum_{l=-3}^{3-2} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l}) \right) + \sum_{l=-3}^{3-4} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l})}{\frac{5^2}{2} + 2(5) - \frac{3}{2}}$$

และ เมื่อแทน $ex = 6$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^6 = \frac{\left(\sum_{l=-3}^3 \mu_{i+l,j+l} + \sum_{l=-3}^{3-2} (\mu_{i+l,j+l+2} + \mu_{i+l+2,j+l}) \right) + \sum_{l=-3}^{3-4} (\mu_{i+l,j+l+4} + \mu_{i+l+4,j+l}) + \sum_{l=-3}^{3-6} (\mu_{i+l,j+l+6} + \mu_{i+l+6,j+l})}{\frac{6^2}{2} + 6 + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

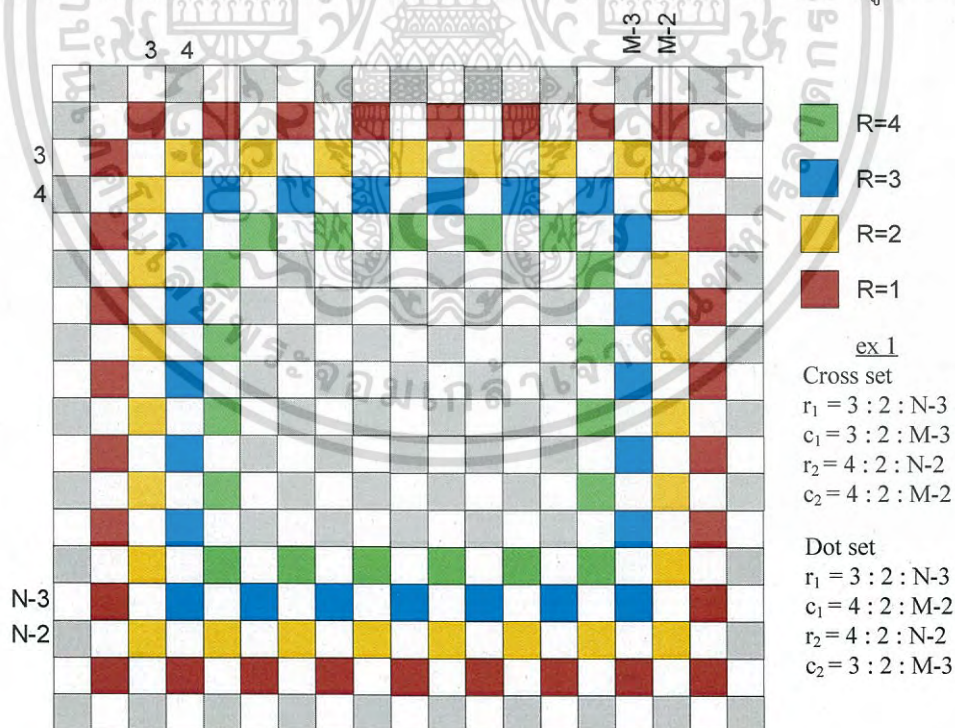
จากความสัมพันธ์ของแต่ละ φ_s ของ ex กรณีที่เป็นคู่ (even) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^{ex} = \frac{\left(\sum_{l=-\frac{ex}{2}}^{\frac{ex}{2}} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\frac{ex}{2}} \sum_{l=-\frac{ex}{2}}^{\frac{ex}{2}-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l}) \right)}{\frac{ex^2}{2} + ex + 1} \quad (2.17)$$

และความสัมพันธ์ของแต่ละ φ_s ของ ex กรณีที่เป็นคี่ (odd) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tilde{\mu}_{i,j}^{ex} = \frac{\left(\sum_{l=-\frac{(ex-1)}{2}}^{\frac{(ex-1)}{2}} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\frac{(ex-1)}{2}} \sum_{l=-\frac{(ex-1)}{2}}^{\frac{(ex-1)}{2}-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l}) \right)}{\frac{ex^2}{2} + 2ex - \frac{3}{2}} \quad (2.18)$$

พิจารณาข้อจำกัดสำหรับพื้นที่การขยาย ที่เป็นไปได้โดยพิจารณาจากตัวอย่าง $R=1-4$ ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 แสดงตัวอย่างการขยายที่เป็นไปได้ของ $R=1-4$

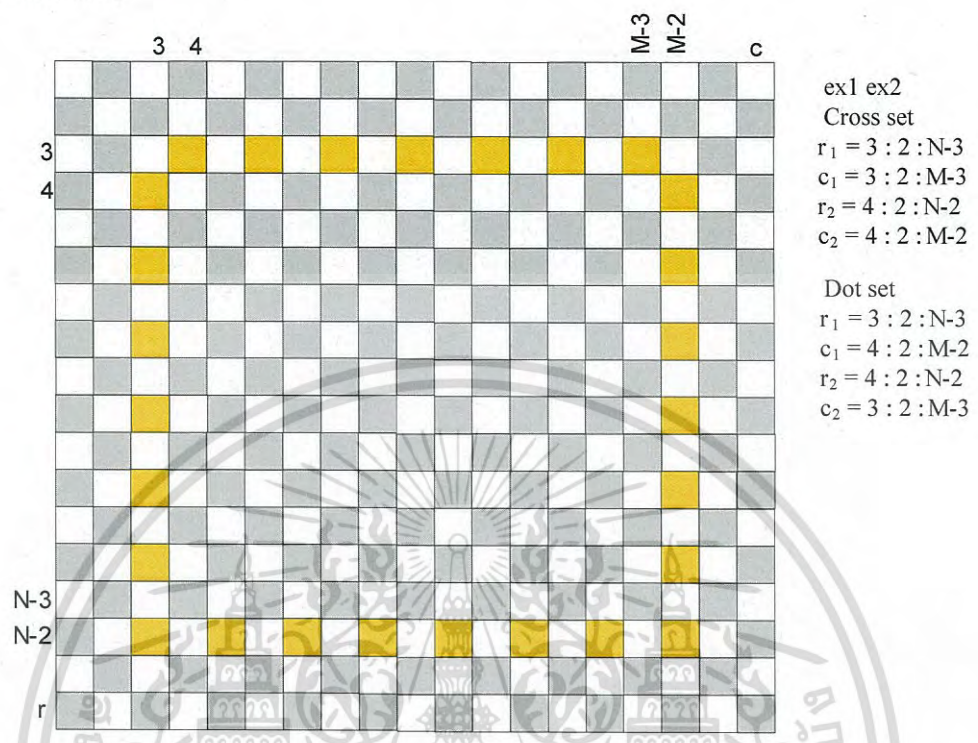
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความสัมพันธ์ของแต่ละการขยาย (ตัวอย่าง 6 ระดับ) สำหรับครอสเซต และดอทเซต พิจารณาในเมตริกซ์ภาพของแต่ละแถว และแต่ละหลัก

Cross set		Dot set	
ex=1	$r_1 = 3 : 2 : N-3$ $c_1 = 3 : 2 : M-3$ $r_2 = 4 : 2 : N-2$ $c_2 = 4 : 2 : M-2$	ex=1	$r_1 = 3 : 2 : N-3$ $c_1 = 4 : 2 : M-2$ $r_2 = 4 : 2 : N-2$ $c_2 = 3 : 2 : M-3$
ex=2		ex=2	
ex=3	$r_1 = 4 : 2 : N-4$ $c_1 = 4 : 2 : M-4$ $r_2 = 5 : 2 : N-3$ $c_2 = 5 : 2 : M-3$	ex=3	$r_1 = 4 : 2 : N-4$ $c_1 = 5 : 2 : M-3$ $r_2 = 5 : 2 : N-3$ $c_2 = 4 : 2 : M-4$
ex=4		ex=4	
ex=5	$r_1 = 5 : 2 : N-5$ $c_1 = 5 : 2 : M-5$ $r_2 = 6 : 2 : N-4$ $c_2 = 6 : 2 : M-4$	ex=5	$r_1 = 5 : 2 : N-R$ $c_1 = 6 : 2 : M-(R+1)$ $r_2 = 6 : 2 : N-(R+1)$ $c_2 = 5 : 2 : M-R$
ex=6		ex=6	
R = (ex/2)	$r_1 = R+2 : 2 : N-(R+2)$ $c_1 = R+2 : 2 : M-(R+2)$ $r_2 = R+3 : 2 : N-(R+1)$ $c_2 = R+3 : 2 : M-(R+1)$	ex=6	$r_1 = R+2 : 2 : N-(R+2)$ $c_1 = R+3 : 2 : M-(R+1)$ $r_2 = R+3 : 2 : N-(R+1)$ $c_2 = R+2 : 2 : M-(R+2)$

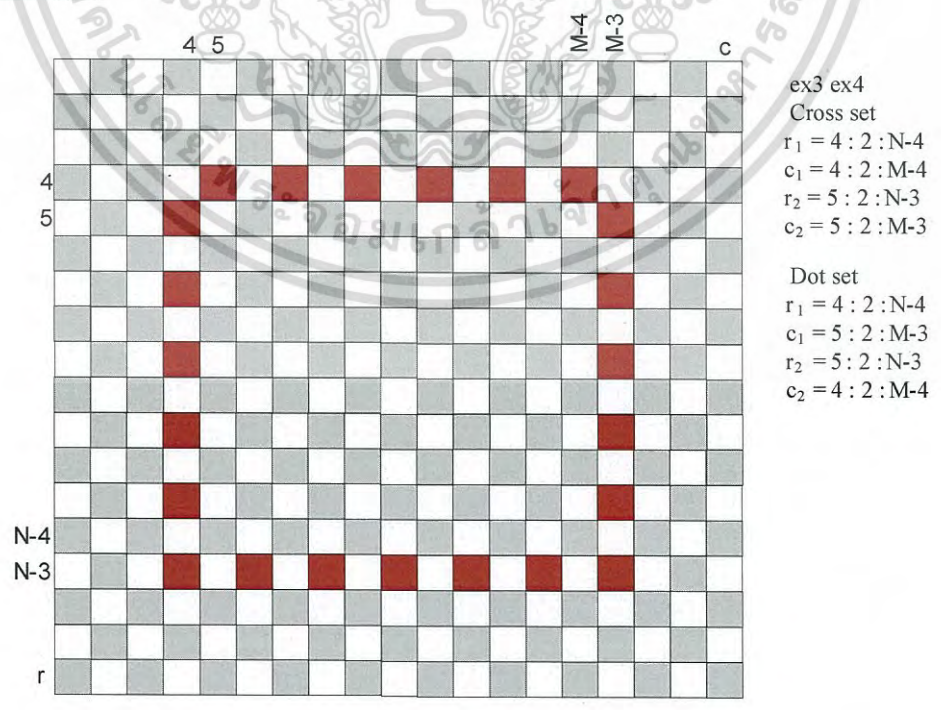
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาตัวอย่างแบบจำลองเมตริกซ์ภาพสำหรับพื้นที่ที่สามารถขยายได้สูงสุด 2 ระดับ (ex1 และ ex2)



รูปที่ ก.7 แสดงตัวอย่างขอบเขตที่เป็นไปได้สำหรับการขยาย 2 ระดับ

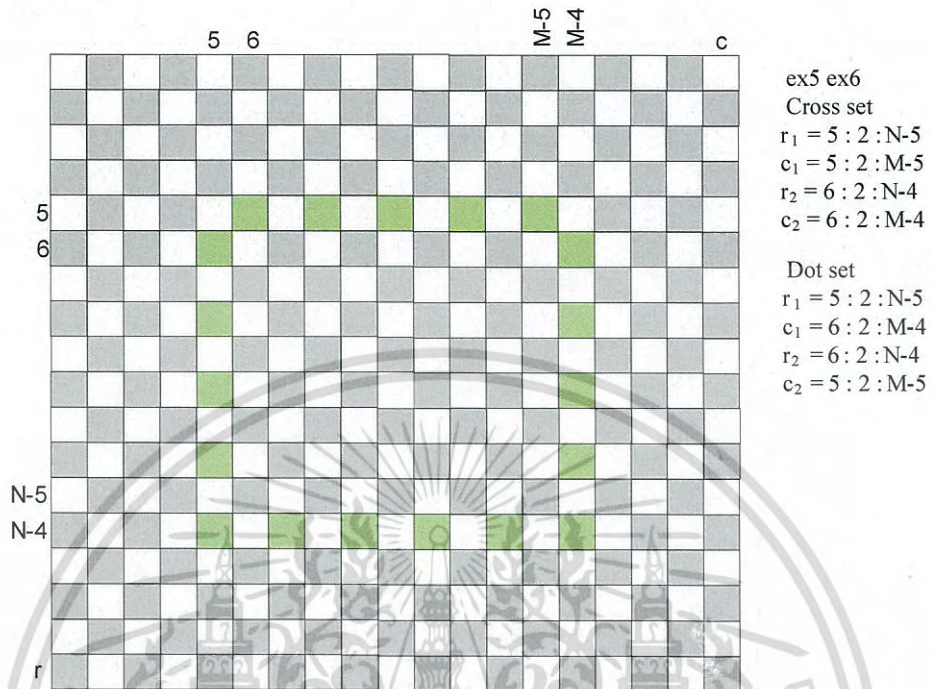
พิจารณาตัวอย่างแบบจำลองเมตริกซ์ภาพสำหรับพื้นที่ที่สามารถขยายได้สูงสุด 4 ระดับ (ex3 และ ex4)



รูปที่ ก.8 แสดงตัวอย่างขอบเขตที่เป็นไปได้สำหรับการขยาย 4 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาตัวอย่างแบบจำลองเมตริกซ์ภาพสำหรับพื้นที่ที่สามารถขยายได้สูงสุด 6 ระดับ (ex5 และ ex6)



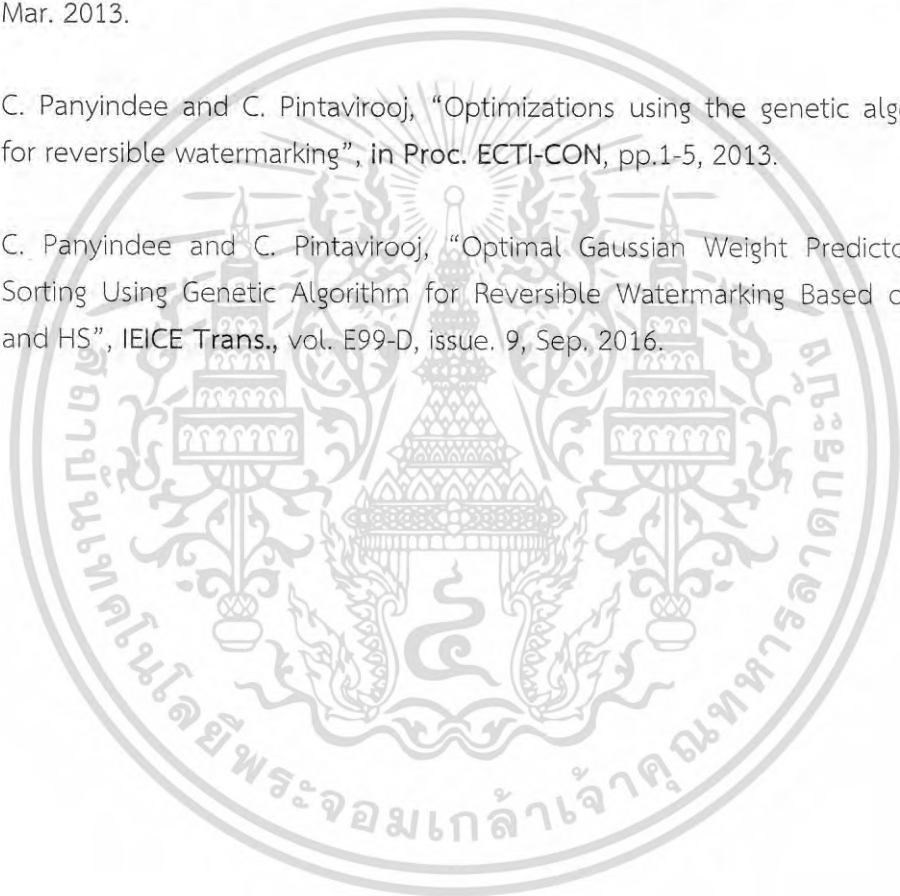
รูปที่ ก.9 แสดงตัวอย่างขอบเขตที่เป็นไปได้สำหรับการขยาย 6 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ฉบับสิ้นระดับนานาชาติจำนวน 2 ฉบับ และในวารสารวิชาการจำนวน 1 บทความดังนี้

1. C. Panyindee and C. Pintavirooj, "Reversible Watermarking Using Gaussian Weight Prediction and Genetic Algorithm", in Proc. IMECS, vol.1, pp. 457-461, Mar. 2013.
2. C. Panyindee and C. Pintavirooj, "Optimizations using the genetic algorithm for reversible watermarking", in Proc. ECTI-CON, pp.1-5, 2013.
3. C. Panyindee and C. Pintavirooj, "Optimal Gaussian Weight Predictor and Sorting Using Genetic Algorithm for Reversible Watermarking Based on PEE and HS", IEICE Trans., vol. E99-D, issue. 9, Sep. 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายชัยพร ปานยินดี
วัน เดือน ปีเกิด 1 พฤศจิกายน 2527
ที่อยู่ 161/2 หมู่ 4 ซอยลุงอาน ตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร 74000

ประวัติการศึกษา 2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอนบุรี
2548 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอนบุรี
ประวัติการทำงาน 2550- ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้