นิพนธ์ต้นฉบับ

การเพิ่มประสิทธิภาพ ในกระบวนการฝังลายน้ำดิจิตอล

ธำรงรัตน์ อมรรักษา[1] และ รพี พืชพันธ์ [2]

Abstract

Amornraksa, T. and Puertpan, R.

Efficiency improvement in watermark embedding process

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2002, 24(1) : 77-87

Digital watermarking is a technique used to provide a proof of intellectual ownership by embedding a secret information, known as a watermark, into multimedia data. In this paper, a technique based on luminance averaging is proposed to improve the efficiency in the watermark retrieval process by minimizing the degradation of the watermarked image. In the experiments, we compared four different components contained within the image; red, blue, green color components, and luminance component, to be used as a channel to carry the watermark signal. Moreover, three different techniques used to adjust the watermark amplitude, namely, Gaussian, Equal gain, and No pixel-weighting marks, were compared to observe their performance. The experimental results showed that applying Gaussian pixel-weighting marks technique in the blue color component gave the best performance.

Key words : digital watermarking, image averaging, image processing

Department of Computer Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangkok 10140

[1]Ph.D. (Electric Engineering) , [2]วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง) นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10520

Corresponding e-mail : t.amornraksa@cpe.eng.kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ 16 สิงหาคม 2544 รับลงพิมพ์ 21 พฤศจิกายน 2544

บทคัดย่อ

ธำรงรัตน์ อมรรักษา และ รพี พืชพันธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพ ในกระบวนการฝังลายน้ำดิจิตอล

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2545 24(1) : 77-87

การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลคือวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการพิสูจน์ถึงความเป็นเจ้าของ โดยการซ่อนข่าวสารลับที่รู้จักกันในนามของ ลายน้ำดิจิตอล ลงไปในตัวข้อมูลชนิดมัลติมีเดีย บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล โดยอาศัยพื้นฐานของค่าเฉลี่ยสัญญาณความสว่างในแบบต่าง ๆ เพื่อที่ทำให้เกิดการลดทอนภาพลักษณ์ของรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับลงน้อยที่สุด ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบการฝังสัญญาณลายน้ำลงในช่องสัญญาณแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และช่องสัญญาณความสว่างของรูปภาพต้นฉบับ รวมถึงได้มีปรับแต่งค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำก่อนทำการฝังด้วย 3 วิธีการ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียน ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักอัตราขยายที่เท่ากัน และแบบที่ไม่มีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพที่ได้รับ ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียนต่อสัญญาณลายน้ำ ในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

สื่อข้อมูลมัลติมีเดีย ไม่ว่าจะเป็นรูปภาพดิจิตอล เสียงเพลงดิจิตอล หรือวิดีโอดิจิตอล ในปัจจุบันนี้ได้มีการทำขึ้นอย่างแพร่หลาย โดยตัวสื่อข้อมูลมัลติมีเดียนั้นมีข้อน่าสังเกตอย่างหนึ่งว่า ส่วนใหญ่จะเป็นสื่อข้อมูลที่ให้คุณประโยชน์เพื่อด้านเทคโนโลยีการศึกษาหรือเพื่อความบันเทิง และการผลิตสื่อข้อมูลมัลติมีเดียนั้นนอกจากจะต้องใช้ความรู้ในเชิงวิชาการแล้ว ยังอาจต้องใช้แรงบันดาลใจและกำลังใจที่ต้องทุ่มเทลงไปอีกมากมาย อย่างไรก็ตามปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์ในตัวสื่อข้อมูลมัลติมีเดียโดยการทำซ้ำและเผยแพร่ในทางการค้าก็เกิดขึ้นมาเป็นเงาตามตัวซึ่งนอกจากจะทำให้สูญเสียรายได้จากการเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์แล้วยังอาจทำให้เกิดการลดคุณค่าในสื่อข้อมูลมัลติมีเดียนั้นอีกด้วย

ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ในสื่อข้อมูลมัลติมีเดียชนิดรูปภาพดิจิตอลด้วยการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล ซึ่งจะเป็นการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับในแบบที่สายตามนุษย์ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ โดยทั่วไปการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลสามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกเป็นแบบที่สามารถสังเกตเห็นสัญญาณลายน้ำดิจิตอลได้เหมือนกับการปะติดตราประทับของเจ้าของลิขสิทธิ์ลงไปบนรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับในตำแหน่งที่เหมาะสมและไม่ทำให้เกิดการสูญเสียภาพลักษณ์จนเกินไป ส่วนประเภทที่สองเป็นแบบที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความฉบับนี้สามารถจัดอยู่ในประเภทที่สอง แต่เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่าการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลเป็นการทำให้รูปภาพดิจิตอลต้นฉบับสูญเสียภาพลักษณ์ลงซึ่งในบทความฉบับนี้จะเป็นงานวิจัยที่มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลโดยอาศัยค่าเฉลี่ยสัญญาณความสว่างเป็นตัวปรับแต่งความเหมาะสมในการฝังสัญญาณลายน้ำซึ่งแสดงการเปรียบเทียบได้ในสามรูปแบบ คือค่าเฉลี่ยสัญญาณความสว่างแบบเกาส์เซียน ค่าเฉลี่ยความสว่างแบบอัตราขยายที่เท่ากัน และแบบที่ไม่เฉลี่ยค่าความสว่าง ส่วนกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำดิจิตอลได้อาศัยค่าเฉลี่ยภาพดิจิตอลแบบแปดจุดภาพรอบด้าน (8 neighborhood pixels) ในการดึงสัญญาณลายน้ำดิจิตอลออกมาเพื่อพิสูจน์สิทธิความเป็นเจ้าของ

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในยุคแรกๆ ของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล Schyndel และคณะ (1994) ได้นำเสนอวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลลงใน Least Significant Bit (LSB) โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า LSB เป็นตำแหน่งที่เกิดผลกระทบต่อรูปภาพโดยรวมน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลวิธีนี้จะยังคงอ่อนไหวต่อการโจมตี

ด้วยสัญญาณรบกวนและง่ายต่อการทำลายเนื่องจากวิธีนี้ได้ทำการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลในตำแหน่งของ LSB ในลักษณะเดียวกันกับการปรับแต่งบิทที่มีความสำคัญน้อยที่สุด Bender และคณะ (1995) ได้นำเสนอวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลแบบ Patchwork โดยการเลือกสุ่มคู่จุดภาพจำนวน n คู่ และทำการปรับแต่งค่าสัญญาณความสว่างในแต่ละคู่พิเซลในแบบเพิ่มค่าสัญญาณความสว่างของจุดภาพแรกหนึ่งหน่วย และลดค่าสัญญาณความสว่างของจุดภาพที่สองลงหนึ่งหน่วย ในทำนองเดียวกันกับแบบ LSB วิธีการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลวิธีนี้จะยังคงอ่อนไหวต่อการโจมตีด้วยสัญญาณรบกวนเช่นกัน ในขณะที่ Tanaka และคณะ (1990), Matsui และคณะ (1994) ได้นำเสนอแนวความคิดที่ว่าการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลในลักษณะการใส่สัญญาณรบกวนจะทำให้เกิดการสูญเสียภาพลักษณ์โดยรวมน้อยที่สุดจนสายตาคนเราไม่สามารถสังเกตเห็นได้ถึงความแตกต่างที่ชัดเจน

ในยุคต่อมาการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลจะกระทำในโดเมนความถี่ โดยที่ Boland และคณะ (1995) ได้นำเสนอวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลในแบบใช้การแปลงในหลากหลายย่านการประมวลผล เช่น Discrete Cosine Transform (DCT), Discrete Fourier Transform (DFT), Daubechies และ Discrete Wavelet Transform (DWT) ซึ่งค่าสัมประสิทธิของการแปลงในแต่ละแบบได้ถูกใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล

สำหรับการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับบทความฉบับนี้ได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kutter และคณะ (1998) โดยอาศัยหลักการของการกล้ำความลึกของสัญญาณ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่ามีความคงทนต่อการปรับแต่งรูปภาพทางการประมวลผลทางดิจิตอล ต่อมา Puertpan และคณะ (2001) ได้พัฒนาการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นโดยการใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียนเป็นการตั้งค่าตัวปรับละเอียดของตัวลายน้ำดิจิตอลก่อนจะทำการฝังลงในรูปภาพ สำหรับการกู้คืนตัวลายน้ำดิจิตอลได้ใช้หลักการหาค่าเฉลี่ยภาพดิจิตอลแบบ cross-shaped neighborhood pixels เหมือนใน Kutter และคณะ (1998) ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่ารูปภาพดิจิตอลที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิตอลมีคุณภาพที่ดีกว่า โดยวัดได้จากตัวชี้วัดประสิทธิภาพ Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) ของรูปภาพที่ถูกฝังลายน้ำดิจิตอลไว้

วิธีการกู้คืนลายน้ำดิจิตอลยังได้ถูกพัฒนาต่อไปอีกโดยใช้หลักการค่าเฉลี่ยของรูปภาพดิจิตอลแบบแปดจุดภาพรอบด้านและตัวกรองค่าความถี่กลาง (mean filter) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกู้คืนตัวลายน้ำดิจิตอลสูงขึ้น โดยวัดได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ในการกู้คืนได้ของลายน้ำ นอกจากนี้ยังได้จำลองทำการโจมตีภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิตอลโดยวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว ด้วยสามวิธีหลักๆ ที่เป็นที่นิยมใช้ในการปรับแต่งภาพดิจิตอล คือการพร่ามัวรูปภาพ การใส่สัญญาณรบกวนในรูปภาพ และการกรองสัญญาณความถี่สูง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเป็นที่น่าพอใจ นั่นคือตัวลายน้ำดิจิตอลที่ถูกกู้คืนกลับมาได้ยังมีคุณภาพดีพอที่จะทราบว่าเป็นข้อมูลอะไร

2. วิธีการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล

ในการทดลองจะทำการสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิตอลซึ่งเป็นภาพขาวดำชนิดฐานสอง (binary) ขนาด 256×256 จุดภาพ (pixel) ให้มีลักษณะของสัญญาณแบบเลือกสุ่ม (independent identically distributed, i.i.d.) โดยกำหนดตำแหน่งของหน่วยความจำอาเรย์ของสัญญาณลายน้ำดิจิตอลในลักษณะสองมิติ ให้ส่วนที่เป็นสีขาวของภาพขาวดำแทนด้วยค่าตัวเลข 0 ส่วนที่เป็นสีดำให้มีค่าเป็น 1 ซึ่งจะได้ชุดอาเรย์ที่มีค่า 0 และ 1 หลังจากนั้นทำการสลับค่าอาเรย์แบบเลือกสุ่ม โดยอาศัยการเลือกสุ่มแบบสองมิติในลักษณะของ Gaussian distribution ซึ่งได้ตั้งค่าความแปรปรวน (variance) ไว้ที่ 100 ยังผลให้เกิดอาเรย์ของภาพสัญญาณลายน้ำดิจิตอลแบบเกาส์เซียนที่ไม่จำเพาะเจาะจง (Gonzalez *et al*., (1992)) ลักษณะการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลโดยทั่วไปสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบที่มีการแปลงย่านการประมวลผล (transformed domain) และแบบที่ไม่มีการแปลงย่านการประมวลผล (non-transformed domain) โดยการพิจารณาค่าความลึกของสัญญาณของรูปภาพดิจิตอล ต้นฉบับเป็นค่ามูลฐานซึ่งในบทความนี้ได้อาศัยค่าความลึกของสัญญาณแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของรูปภาพต้นฉบับในการพิจารณา โดยในแต่ละช่องสัญญาณแสงจะใช้ข้อมูลขนาด 8 บิต ซึ่งแสดงค่าเป็นเลขจำนวนเต็มเริ่ม

จาก 0 จนถึง 255 ในการฝังสัญญาณลายน้ำแบบแรกจะเป็นการเปลี่ยนย่านการประมวลผลให้อยู่ในรูปแถบความถี่ที่แตกต่างกันโดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการแปลง รูปแบบที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป เช่น DCT, DFT หรือ DWT ซึ่งค่าสัญญาณมูลฐานที่อยู่ในรูปจำนวนเต็มจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน และขั้นตอนการฝังสัญญาณลายน้ำจะถูกกระทำในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนเช่นเดียวกัน สำหรับการฝังสัญญาณลายน้ำในแบบหลังจะเป็นแบบที่ไม่มีการเปลี่ยนย่านการประมวลผลโดยจะใช้ค่ามูลฐานของรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับในกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำโดยตรง

งานวิจัยนี้ ได้อาศัยวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลในแบบที่สองเป็นหลัก โดยได้แบ่งแยกวิธีการดังกล่าวออกเป็นอีก 2 ประเภท คือการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลแบบเติมแต่ง (additive) และการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลแบบทวีคูณ (multiplicative) โดยมีรูปแบบดังนี้

$$WPixel\,[x, y] = OPixel\,[x, y] + wcL[x, y] \qquad (1)$$

$$Wpixel\,[x, y] = OPixel\,[x, y] \times wcL[x, y] \qquad (2)$$

โดย $WPixel\,[x, y]$ จะแสดงถึงค่าความลึกของช่องสัญญาณสีหรือช่องสัญญาณความสว่างในรูปภาพภายหลังการใส่สัญญาณลายน้ำดิจิตอลแล้ว $OPixel\,[x, y]$ คือค่าความลึกของช่องสัญญาณสีหรือช่องสัญญาณความสว่างในรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับ และขนาดของสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังทั้งแบบเติมแต่งและแบบทวีคูณคือ $wcL\,[x, y]$ จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณลายน้ำดิจิตอล w จะเป็นทั้งค่าบวกและลบ ซึ่งแสดงถึงสัญญาณลายน้ำดิจิตอลที่เป็นภาพขาวดำ ส่วนค่า $cL\,[x, y]$ จะเป็นขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกของสัญญาณสีที่เหมาะสมโดยจะขึ้นอยู่กับตัวปรับละเอียด $L\,[x, y]$ ซึ่งก็คือค่าความสว่างตรงจุดภาพนั้นๆ และตัวปรับหยาบ c เพื่อปรับแต่งค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำที่ต้องการ

ความเหมาะสมของการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลแบบเติมแต่งจะอยู่ในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องสัญญาณสีในช่วงแคบๆ ซึ่งจะทำให้ความสมบูรณ์ของภาพลักษณ์ (fidelity) ของรูปภาพที่เกิดจากการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลไม่ลดต่ำลงมากนัก ลักษณะเด่นในการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลแบบทวีคูณจะมีความเหมาะสม ในแง่ของการเพิ่มความคงทน (robustness) ต่อสัญญาณลายน้ำดิจิตอลที่ต้องผ่านกระบวนการประมวลผลทางรูปภาพดิจิตอล ในหลากหลายรูปแบบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในบทความฉบับนี้เป็นการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลบนรูปภาพดิจิตอลสี ซึ่งมีการแปรเปลี่ยนของช่องสัญญาณสีในช่วงแคบๆ โดยจะได้อาศัยหลักการฝังลายน้ำดิจิตอลแบบเติมแต่งในการทดลองต่อไป

2.1 ตัวปรับละเอียด $L\,[x, y]$

บทความนี้ ได้แยกประเภทของตัวปรับละเอียดใน 3 ลักษณะ กล่าวคือ แบบค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักเกาส์เซียน แบบค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักอัตราขยายที่เท่ากัน และแบบที่ไม่มีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก รูปแบบแรกได้อาศัยการกระจายแบบเกาส์เซียนของการคำนวนหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละตำแหน่งในมาร์ค (mask) ของเกาส์เซียน ดังแสดงไว้ในสมการต่อไปนี้

$$G_{gaussian}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \qquad (3)$$

โดย (x, y) เป็นคู่ลำดับของเกาส์เซียนมาร์คในแบบ 3×3 จุดภาพ

$$\begin{bmatrix} (-1,\ -1) & (-1,\ 0) & (-1,\ 1) \\ (0,\ -1) & (0,\ 0) & (0,\ 1) \\ (1,\ -1) & (1,\ 0) & (1,\ 1) \end{bmatrix} \qquad (4)$$

σ^2 เป็นค่าความแปรปรวนของการกระจายแบบเกาส์เซียน ซึ่งกำหนดค่าไว้ที่ 0.5 จะได้เกาส์เซียนมาร์คดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0.0431 & 0.1171 & 0.0431 \\ 0.1171 & 0.3183 & 0.1171 \\ 0.0431 & 0.1171 & 0.0431 \end{bmatrix} \qquad (5)$$

ค่าความลึกของสัญญาณความสว่าง (luminance amplitude) ณ ตำแหน่ง (x, y) ใดๆ ของรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับ จะแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ดังนั้นจะได้ว่าผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักเกาส์เซียน $L[x, y]$ ณ ตำแหน่งความสว่างใดๆ เท่ากับ

$$L[x, y] = 0.0431 \times z_1 + 0.1171 \times z_2 + ... + 0.0431 \times z_9 \quad (7)$$

สำหรับรูปแบบที่สองค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักอัตราขยายที่เท่ากัน จะได้มาร์คดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0.1111 & 0.1111 & 0.1111 \\ 0.1111 & 0.1111 & 0.1111 \\ 0.1111 & 0.1111 & 0.1111 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ดังนั้นผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักแบบอัตราขยายที่เท่ากัน $L[x, y]$ ณ ตำแหน่งความสว่างใดๆ จะเท่ากับ

$$L[x, y] = 0.1111 \times z_1 + 0.1111 \times z_2 + ... + 0.1111 \times z_9 \quad (9)$$

ในรูปแบบที่สามค่าเฉลี่ยแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก จะได้มาร์คดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

เพราะฉะนั้น ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก $L[x, y]$ ณ ตำแหน่งความสว่างใดๆ จะเท่ากับ

$$L[x, y] = z_5 \quad (11)$$

2.2 ตัวปรับหยาบ c และค่าความลึกของลายน้ำดิจิตอล w

ตัวปรับหยาบเป็นส่วนที่ใช้ในการปรับความแรงของสัญญาณความลึกของลายน้ำดิจิตอล สามารถมีขนาดตั้งแต่ 0.0 จนถึงประมาณ 1.0 หรืออาจมากกว่านั้นตามความต้องการ โดยทั่วไปจะหมายถึงตัวปรับค่าของตัวปรับละเอียดเพื่อให้การใช้งานของตัวปรับละเอียดอยู่ในย่าน 0% ถึง 100% ซึ่งค่าที่เหมาะสมสำหรับการฝังลายน้ำดิจิตอลในแต่ละช่องสัญญาณสีแล้ว จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 จนถึง 0.5 โดยจะมีความเหมาะสมแตกต่างกันไปในแต่ละช่องสัญญาณสี

สำหรับลายน้ำดิจิตอลที่ใช้ในการทดลอง ได้ถูกสร้างจากรูปแบบที่เป็นสัญลักษณ์ของห้องปฏิบัติการระบบสื่อสารมัลติมีเดีย (MCL logo) ซึ่งเป็นภาพขาวดำ (binary image) โดยได้ทำการแปลงพื้นสีขาวของสัญลักษณ์ให้เป็นค่าตัวเลข 0 และพื้นที่ที่เป็นสีดำให้เป็นตัวเลข 1 โดยก่อนที่จะนำไปใช้กับสมการการฝังลายน้ำดิจิตอลแบบเติมแต่ง จะต้องแปลงค่าตัวเลข 0 และ 1 โดยใช้สมการที่ (12) นี้เสียก่อน

$$w = 2w - 1 \quad (12)$$

เช่นถ้าสัญญาณลายน้ำมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อแทนค่าลงในสมการแล้วจะได้ผลลัพธ์เป็น -1 จะเห็นได้ว่าค่าความลึกของสัญญาณลายน้ำดิจิตอลของรูปภาพขาวดำจะมีค่าเป็น -1 และ +1 ซึ่งจะหมายถึงการลบและการบวกความลึกของสัญญาณความสว่างของรูปภาพต้นแบบในแต่ละช่องของสัญญาณสีนั่นเอง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของช่องสัญญาณสีในแต่ละจุดภาพ จะเป็นไปในลักษณะที่สอดคล้องกับค่าความสว่างในแต่ละจุดภาพของรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับ ซึ่งในการทดลองได้มีการปรับตั้งค่าความสว่างโดยอาศัยตัวปรับละเอียดใน 3 ลักษณะดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

2.3 ค่าชี้วัดคุณภาพของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล

PSNR เป็นค่าที่ใช้ชี้วัดถึงคุณภาพของรูปภาพที่ได้จากกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลโดยจะทำการเปรียบเทียบกับภาพดิจิตอลต้นฉบับ ค่าชี้วัดคุณภาพของภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล PSNR นี้ ถูกหาได้จากการกำหนดภาพดิจิตอลต้นฉบับ $X[i, j]$ ให้มีขนาดเป็น $N \times N$ จุดภาพเท่ากับภาพได้จากกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำ $Y[i, j]$ โดยในขั้นตอนแรกจะต้องหาค่า Mean Square Error (MSE) ก่อน ตามสมการดังนี้

$$MSE = \frac{\sum (X[i,j]-Y[i,j])^2}{N^2} \qquad (13)$$

MSE เป็นการกระทำในแบบจุดภาพ/จุดภาพ ของทั้งรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับและรูปภาพที่ถูกฝังลายน้ำ ขณะที่ค่า Root Mean Square Error (RMSR) ถูกหาได้จากรากที่สองของค่า MSE ซึ่งผลลัพธ์ของ PSNR จะเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$PSNR\ (dB) = 20\log_{10}\left(\frac{255}{RMSE}\right) \qquad (14)$$

ทั้งนี้คุณภาพของภาพภายหลังกระบวนฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลที่ดีจะวัดจากค่า PSNR ที่สูงขึ้น และโดยทั่วไปแล้วค่า PSNR ที่เกิดจากกระบวนการทางสัญญาณ (signal processing) ใดๆ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 dB ให้สังเกตว่า เนื่องจากค่า PSNR นี้ถูกคำนวณจากค่าความแตกต่างระหว่างค่าของจุดภาพที่เปลี่ยนไปเทียบกับจุดภาพต้นฉบับแบบจุดภาพ/จุดภาพ ถ้ารูปภาพผลลัพธ์ที่ได้มีความผิดเพี้ยนทางกายภาพ (geometric distortion) ค่า PSNR ที่คำนวณได้ก็จะผิดเพี้ยนไปด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามในบทความนี้ ค่า PSNR เป็นเพียงค่าหนึ่งที่ใช้เปรียบเทียบถึงความแตกต่างระหว่างรูปภาพต้นฉบับกับรูปภาพที่ถูกใส่ลายน้ำดิจิตอลแล้วเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริง การที่จะเปรียบเทียบถึงประสิทธิของวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น ความแตกต่างเมื่อใช้สายตามนุษย์เปรียบเทียบ

3. วิธีการกู้คืนตัวลายน้ำดิจิตอล

โดยทั่วไปวิธีการกู้คืนลายน้ำดิจิตอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือแบบที่ต้องใช้รูปภาพดิจิตอลต้นฉบับ และแบบที่ไม่ต้องใช้รูปภาพต้นฉบับ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการกู้คืนลายน้ำโดยไม่ต้องอาศัยรูปภาพต้นฉบับ ซึ่งจะสามารถทำได้โดยการสร้างแบบจำลองของรูปภาพต้นฉบับขึ้นมาก่อนจากรูปภาพที่ถูกฝังลายน้ำดิจิตอลไว้แล้วโดยใช้เทคนิคการหาค่าเฉลี่ยรูปภาพดิจิตอล ใน Hearn และคณะ (1997) ด้วยการพิจารณาว่าตัวลายน้ำดิจิตอล คือสัญญาณรบกวนที่ถูกใส่เข้าไปในรูปภาพ และทำให้เกิดการสูญเสียภาพลักษณ์โดยรวมของรูปภาพดิจิตอล แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ดวงตาคนเราไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งโดยทั่วๆ ไปแล้วสัญญาณรบกวนจะถูกพิจารณาว่าเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูง (high frequency) ดังนั้นเมื่อเราใช้ตัวกรองสัญญาณใดๆ เช่น ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (low pass filter) ที่กรองความถี่สูงออกทำให้สามารถกรองสัญญาณรบกวน หรือ สัญญาณลายน้ำดิจิตอลออกมาได้ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นรูปภาพดิจิตอลที่มีลักษณะจำลองหรือเสมือนกับรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับ ซึ่งก็หมายความว่าในการที่เราไม่ต้องอาศัยรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับในขั้นตอนการกู้คืนลายน้ำดิจิตอลนั้น เราจำเป็นต้องสร้างรูปภาพดิจิตอลต้นฉบับขึ้นมาเองโดยการลบส่วนที่เป็นตัวลายน้ำดิจิตอลออกจากรูปภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำอยู่ก่อนแล้ว เพื่อที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้มาลบออกจากรูปภาพเสมือนของต้นฉบับ สิ่งที่ได้รับจะเป็นขนาดเสมือนของสัญญาณความลึกของลายน้ำดิจิตอลในแต่ละจุดภาพ ซึ่งในบทความนี้ได้ใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยรูปภาพหลายๆ แบบเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยแบบแปดจุดภาพรอบด้านจะมีมาร์คของค่าเฉลี่ยรูปภาพดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 \end{bmatrix} \qquad (15)$$

กำหนดให้รูปภาพดิจิตอลที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล ณ ตำแหน่ง ใดๆ เท่ากับ

$$\begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{bmatrix} \qquad (16)$$

ดังนั้นรูปภาพเสมือนต้นฉบับ $O\,[x, y]$ ที่ได้จากค่าเฉลี่ยรูปภาพดิจิตอล ณ ตำแหน่ง ใดๆ คือ

$$O[x, y] = 0.125 \times w_1 + 0.125 \times w_2 + \ldots + 0.125 \times w_9 \qquad (17)$$

ในการแสดงผลของสัญญาณลายน้ำดิจิตอลต่อจากนี้ยังคงต้องมีการแปลงขนาดความลึกของสัญญาณลายน้ำดังกล่าวให้กลับมาเป็นภาพขาวดำอีกครั้งหนึ่ง โดยอาศัยหลักการแบ่งแยกค่า threshold ซึ่งจะตั้งค่าไว้ที่ 0 เพื่อใช้ในการแบ่งแยกสีขาวและสีดำของสัญญาณลายน้ำดิจิตอล โดยถ้าขนาดความลึกสัญญาณของสัญญาณลายน้ำมีค่าเป็นบวก ก็ให้สัญญาณลายน้ำดิจิตอลในจุดภาพนั้นเป็นสีดำ แต่ถ้ามีค่าเป็นลบ ก็ให้เป็นสีขาว แล้วทำการสลับตำแหน่งของแต่ละจุดภาพให้อยู่ที่ตำแหน่งเดิมโดยอาศัยลำดับเดิมที่ใช้ในขั้นตอนการฝังสัญญาณลายน้ำ

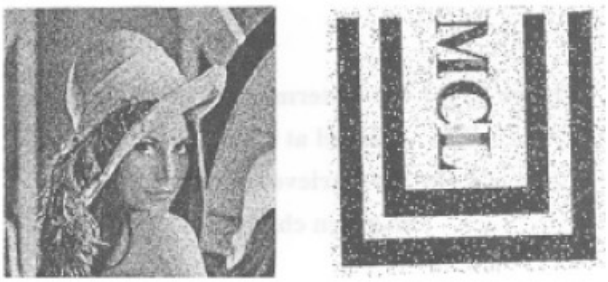
ผลการทดลองและอภิปราย

ในการทดลองเราได้ใช้รูปภาพดิจิตอลสี "girl" , "lena" , "mandrill" , "peppers" , "canel" และ "lamp" เป็นภาพต้นฉบับซึ่งมีความหลากหลายในด้านต่างๆ เช่น สี (color) ลวดลาย (texture) รูปแบบ (pattern) และอื่นๆ โดยรูปที่ใช้จะมีขนาด 256 × 256 จุดภาพในการประมวลผล และได้สร้างสัญญาณลายน้ำดิจิตอลเป็นภาพขาวดำของตราประทับห้องปฏิบัติการสื่อสารมัลติมีเดีย (MCL logo) ที่มีขนาดเท่ากัน

(a) (b)

Figure 1. (a) the original image "lena"
(b) the original (black and white) watermark image "MCL"

Figure 1 (a) แสดงตัวอย่างของรูปภาพต้นฉบับ "*lena*" ซึ่งแต่ละจุดภาพจะมีขนาด 24 บิทโดย 8 บิทแรกใช้แทนค่าสัญญาณแสงสีแดง 8 บิทที่สองแทนค่าสัญญาณแสงสีเขียวและ 8 บิทสุดท้ายแทนค่าสัญญาณแสงสีน้ำเงิน Figure 1 (b) แสดงภาพขาวดำของลายน้ำดิจิตอล "*MCL*" ขนาด 256 × 256 จุดภาพ ที่ใช้ในกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล และเป็นชนิดเดียวกันกับภาพดิจิตอลต้นฉบับ โดยจุดภาพสีขาวจะแทนด้วยค่าเลขฐานสิบหก FF FF FF และจุดภาพสีดำด้วยค่า 00 00 00



(a) (b)

Figure 2. (a) the watermarked image in red channel at c = 0.2
(b) the retrieved watermark image in red channel

Figure 2 (a) เป็นผลลัพธ์ของภาพดิจิตอลต้นฉบับที่ได้จากกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำลงในช่องสัญญาณแสงสีแดง โดยตั้งค่าตัวปรับหยาบ c ไว้ที่ 0.3 และค่า PSNR ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 37.46 dB ซึ่งภาพลักษณ์ของภาพดิจิตอลต้นฉบับจะถูกลดทอนลงจนสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนเมื่อเพิ่มค่าตัวปรับหยาบ c อยู่ที่ประมาณ 0.2 Figure 2 (b) แสดงภาพลายน้ำดิจิตอลที่ได้ผ่านขั้นตอนการกู้คืนสัญญาณ โดยอาศัยเทคนิคการหาค่าเฉลี่ยรูปภาพดิจิตอลแบบแปดจุดภาพรอบด้านในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำดิจิตอล ซึ่งให้ผลของค่าความถูกต้องในการกู้คืนที่ 94.90 %

Figure 3 (a) แสดงผลลัพธ์จากการฝังสัญญาณลายน้ำลงในช่องสัญญาณแสงสีเขียว โดยตั้งค่าตัวปรับหยาบ c ไว้ที่ 0.3 ซึ่งค่า PSNR ที่วัดได้จากการฝังลายน้ำในช่องสัญญาณนี้คือ 37.46 dB จากการทดลองปรับค่าตัวปรับหยาบ c ในย่านการใช้งาน 0.1 - 1.0 มีผลให้รูปภาพดิจิตอลต้นฉบับถูกลดทอนภาพลักษณ์ลงจนตาคน

(a) (b)

Figure 3. (a) the watermarked image in green channel at c = 0.1
(b) the retrieved watermark image in green channel

เราสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ที่ค่าประมาณ 0.1 Figure 3 (b) แสดงภาพลายน้ำดิจิตอลหลังจากผ่านกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำแบบแปดจุดภาพรอบด้านซึ่งได้ค่าความถูกต้องของข้อมูลอยู่ที่ 94.43 %

(a) (b)

Figure 4. (a) the watermarked image in blue channel at c = 0.5
(b) the retrieved watermark image in blue channel

Figure 4 (a) แสดงผลลัพธ์จากการฝังสัญญาณลายน้ำลงในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงิน จากการตั้งค่าตัวปรับหยาบ c ไว้ที่ 0.3 นำมาซึ่งตัวชี้วัดคุณภาพ PSNR ที่ 37.46 dB และจากการแปรค่าตัวปรับหยาบที่ค่าต่างๆ กันคุณภาพของรูปภายหลังการฝังลายน้ำจะถูกลดทอนลงจนตาคนเราสามารถสังเกตเห็นได้ที่ค่า c เท่ากับ 0.5 ขณะที่ใน Figure 5 (b) ได้แสดงภาพลายน้ำดิจิตอลที่ได้ผ่านขั้นตอนการกู้คืนแบบแปดจุดภาพรอบด้านซึ่งให้ผลของค่าความถูกต้องในการกู้คืนที่ 95.22 %

(a) (b)

Figure 5. (a) the watermarked image in luminance channel at c = 0.1
(b) the retrieved watermark image in luminance channel

Figure 5 (a) เป็นผลของภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำในช่องสัญญาณความสว่าง โดยตั้งค่าตัวปรับหยาบ c ไว้ที่ 0.3 และค่า PSNR ที่ได้วัดมีค่าเท่ากับ 37.46 dB ซึ่งภาพลักษณ์ของภาพดังกล่าวจะถูกลดทอนลงจนสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนเมื่อเพิ่มค่าตัวปรับหยาบ c อยู่ที่ประมาณ 0.1 Figure 5 (b) แสดงภาพลายน้ำดิจิตอลที่ได้ผ่านขั้นตอนการกู้คืนแบบแปดจุดภาพรอบด้านซึ่งให้ผลของค่าความถูกต้องในการกู้คืนที่ 94.82 % จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่า PSNR ที่ได้จากรูปภาพทั้ง 4 เมื่อมีการใส่สัญญาณลายน้ำที่ค่าตัวปรับหยาบ c เท่ากับ 0.3 ณ ช่องสัญญาณต่างๆ มีค่าเท่ากันคือ 37.46 dB เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าของจุดภาพที่เท่าเทียมกัน ดังนั้นเมื่อทำการวัดค่าชี้วัดคุณภาพ PSNR โดยใช้สมการที่ (13) และ (14) จึงให้ค่าที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปภาพผลลัพธ์ทั้ง 4 ด้วยตาเปล่า จะพบว่ารูปภาพภายหลังจากการฝังลายน้ำดิจิตอลในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงิน จะให้คุณภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการฝังลายน้ำลงในช่องสัญญาณอื่นๆ นอกจากนี้

ในการทดลอง เรายังได้ปรับค่าตัวปรับหยาบ c เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในกระบวนการฝังลายน้ำดิจิตอลจนสายตามนุษย์สามารถสังเกตเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน โดยค่าที่ได้เท่ากับ 0.2, 0.1, 0.5 และ 0.1 สำหรับการฝังลายน้ำลงในช่องสัญญาณแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และช่องสัญญาณความสว่างตามลำดับ (ดู Figure 2 (a) - 5 (a) ประกอบ) ซึ่งสรุปได้ว่า การฝังลายน้ำโดยใช้ค่าตัวปรับหยาบ c ที่เท่ากัน ลายน้ำที่ถูกฝังในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินจะให้การสูญเสียภาพลักษณ์โดยรวมต่อสายตามนุษย์น้อยที่สุด กล่าวสรุปโดยรวมได้ว่า ช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินมีความเหมาะสมต่อการฝังสัญญาณลายน้ำมากที่สุด รองลงมาคือช่องสัญญาณแสงสีแดง และสีเขียวหรือช่องสัญญาณความสว่างตามลำดับ

เนื่องจากการวิธีการเปรียบเทียบคุณภาพของรูปภาพที่ถูกใส่ลายน้ำดิจิตอลถูกกระทำโดยใช้ค่า PSNR ซึ่งในบางบทความได้สรุปว่า ค่าดังกล่าวควรจะมีขนาดไม่ต่ำกว่า 38 dB เพราะฉะนั้นในการใช้งานจริงของวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำที่ได้เสนอมานั้น จึงควรทำการปรับแต่งค่าตัวปรับหยาบ c จนรูปภาพผลลัพธ์ที่ได้มีค่า PSNR สูงกว่า 38 dB

เนื่องจากช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินเป็นช่องสัญญาณที่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วสายตาคนเราจะสังเกตเห็นความแตกต่างได้น้อยที่สุด ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปเราจึงใช้ช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินในการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล โดยสร้างรูปภาพตัวอย่างที่แตกต่างกันใน 4 ลักษณะ คือรูปภาพที่อยู่ในโทนสีแดง (โดยการปรับค่าความแรงในช่องสัญญาณแสงสีแดงให้มีค่ามากๆ เช่นที่ 245-250) โทนสีเขียว โทนสีน้ำเงิน และภาพที่ปรับความสว่างเพิ่มสูงสุด แล้วทำการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลลงในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินเท่านั้น ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อจะหาโทนสีของภาพที่เหมาะสมสำหรับวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำที่ได้เสนอมา ผลการทดลองได้ถูกแสดงไว้ใน Table 1

Table 1 ได้แสดงให้เห็นว่ารูปภาพที่มีโทนสีน้ำเงินจะให้คุณภาพของภาพลักษณ์ภายหลังการฝังลายน้ำที่ดีที่สุด ในขณะที่รูปภาพที่ถูกปรับค่าความสว่างไว้จะให้คุณภาพของภาพลักษณ์ที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจาก การปรับค่าโทนสีของภาพจะส่งผลกระทบโดยตรงกับค่าตัวปรับละเอียด $L[x, y]$ ซึ่งโทนสีเขียวจะมีผลกระทบสูงสุด เพราะมีค่าการถ่วงน้ำหนัก (weighting) ในสัญญาณความสว่างสูงที่สุด (จากสมการ $Y = 0.299R + 0.587G + 0.144B$) จึงทำให้รูปภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการทำภาพพิมพ์ลายน้ำวิธีนี้มีความเปลี่ยนแปลงไปจากรูปภาพต้นฉบับมากที่สุด ในขณะที่ค่าการถ่วงน้ำหนักในโทนแสงสีแดงกับน้ำเงินมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน จึงส่งผลกระทบต่อภาพผลลัพธ์โดยรวมน้อยกว่าภาพที่มีโทนสีเขียว ถึงแม้ว่าความแตกต่างระหว่างค่า PSNR จากภาพต้นฉบับที่มีโทนแสงสีแดงและน้ำเงินจะมีค่าเพียงประมาณ 0.39 dB แต่ก็เป็นการสนับสนุนเหตุผลดังกล่าวข้างต้นว่าถูกต้อง นอกจากนี้ยังบ่งบอกเป็นนัยๆ อีกด้วยว่า รูปภาพต้นฉบับที่มีโทนแสงสีน้ำเงินจะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าภาพที่มีโทนแสงสีแดง แม้สายตามนุษย์จะไม่สังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงนั้นๆ

Table 1. The PSNR at different values of signature strength in four embedding channels

Signature Strength	Lena			
	Luminance	Red	Green	Blue
0.1	41.68	47.40	45.96	47.79
0.2	35.66	41.38	39.94	41.77
0.3	32.14	37.85	36.42	38.25
0.4	29.64	35.36	33.92	35.75
0.5	27.71	33.42	31.99	33.81

เพื่อที่จะเพิ่มคุณภาพของภาพลักษณ์ที่ได้ภายหลังการฝังลายน้ำดิจิตอลแล้ว ตัวปรับละเอียดจะถูกปรับแต่งให้มีค่าที่เหมาะสมซึ่งในการทดลองเราได้ใช้ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียน ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักอัตราขยายที่เท่ากัน และแบบที่ไม่มีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก มาทำการเปรียบเทียบ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงไว้ใน Table 2

จาก Table 2 จะเห็นได้ว่าการฝังลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพที่แตกต่างกันทั้ง 6 รูป โดยใช้ตัวปรับความละเอียดที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียนจะให้คุณภาพของรูปภาพผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากค่า PSNR ที่มากที่สุด โดยจะมีค่าสูงกว่าวิธีการที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน นั่นคือแบบที่ไม่มีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก โดยเฉลี่ยประมาณ 0.5 dB ซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มคุณภาพ

Table 2. The PSNR at different values of signature strength from three embedding methods

Signature Strength	Girl			Lena		
	Gaussian	Equal gain	No weight	Gaussian	Equal gain	No weight
0.1	47.95	47.42	47.41	47	46.49	46.4
0.2	41.93	41.4	41.39	40.97	40.47	40.38
0.3	38.41	37.88	37.87	37.45	36.95	36.85
0.4	35.91	35.38	35.37	34.95	34.45	34.36
0.5	33.97	33.44	33.43	33.02	32.51	32.42

Signature Strength	Mandrill			Peppers		
	Gaussian	Equal gain	No weight	Gaussian	Equal gain	No weight
0.1	46.15	45.63	45.57	47.13	46.61	46.58
0.2	40.13	39.61	39.55	41.11	40.58	40.56
0.3	36.61	36.08	36.02	37.59	37.06	37.04
0.4	32.8	33.58	33.53	35.09	34.56	34.54
0.5	32.17	31.65	31.59	33.15	32.63	32.6

Signature Strength	Canal			Lamp		
	Gaussian	Equal gain	No weight	Gaussian	Equal gain	No weight
0.1	44.21	43.68	43.67	43.42	42.9	42.86
0.2	38.19	37.66	37.64	37.4	36.88	36.84
0.3	34.67	34.14	34.12	33.88	33.36	33.31
0.4	32.17	31.64	31.62	31.38	30.86	30.82
0.5	30.23	29.7	29.69	29.44	28.93	28.88

(quality) ของรูปภาพที่เป็นที่ยอมรับ (significant) ในสาขาการประมวลผลภาพดิจิตอล (Digital image processing)

สรุปผลการทดลอง

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียน ในกระบวนการฝังลายน้ำดิจิตอล โดยถูกนำไปใช้เป็นตัวปรับความละเอียดของความแรงของสัญญาณลายน้ำเพื่อเพิ่มคุณภาพของรูปภาพผลลัพธ์ที่ได้ภายหลังการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถวัดได้จากค่า PSNR ที่สูงขึ้น โดยเฉลี่ยประมาณ 0.5 dB เมื่อเทียบกับการใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักอัตราขยายที่เท่ากัน และแบบที่ไม่มีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า ช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินมีความเหมาะสมต่อการฝังลายน้ำดิจิตอลโดยวิธีการที่ได้นำเสนอมามากที่สุดจากการเปรียบเทียบค่า PSNR ที่ได้ ณ จุดใดๆ เทียบกับช่องสัญญาณแสงสีแดง สีเขียว และช่องสัญญาณความสว่าง (ที่ค่าตัวปรับหยาบที่เท่ากัน สายตามนุษย์จะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงจากช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงินน้อยที่สุด) นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังแสดงให้เห็นอีกว่า รูปภาพที่มีโทนแสงสีน้ำเงินจะมีการสูญเสียภาพลักษณ์โดยรวมน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับรูปภาพที่มีโทนสีอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์แห่งชาติ NECTEC ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตามโครงการ NT-B-06-4C-20-319

เอกสารอ้างอิง

Bender, W., Gruhl, D. and Morimoto, N. 1995. Techniques for data hiding, Proceedings of SPIE, 2420: 40-48.

Boland, F. M., Ruanaidh, J. J. K. O. and Dautzenberg, C. 1995. Watermarking digital images for copyright protection, **In** IEEE International Conference on Image Processing and its Applications, Edinburgh, Scotland, 326-330.

Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. 1992. Digital image processing, Addison-Wesley, MA.

Hearn, D. and Baker, M. P. 1997. Computer graphics C version, Prentice Hall INC.

Kutter, M., Jordan, F. and Bossen, F. 1998. Digital signature of color images using amplitude modulation, Journal of Electronic Imaging, 7: 326-332.

Matsui, K. and Tanaka, K. 1994. Video-steganography, Proceedings of IMA Intellectual Property Project, 1: 187-206.

Puertpan, R. and Amornraksa, T. 2001. Gaussian pixel weighting marks in amplitude modulation of color image watermarking', Proceedings of the IEEE 6th International Symposium on Signal Processing and its Applications ISSPA 2001, Kuala-Lampur, Malaysia, August 13-16.

Puertpan, R. Nintanavongsa, P. and Amornraksa, T. 2001. Gaussian pixel weighting mark in amplitude modulation of color image watermarking with 8 neighborhood retrieval, Proceedings of the sixth working conference on Communications and Multimedia Security (CMS2001), Darmstadt, Germany, May 21-22.

Puertpan, R. Toomnark, S. and Amornraksa, T. 2001. Gaussian pixel weighting marks in amplitude modulation of color image watermarking with mean filter retrieval, Proceedings of the 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2001), Orlando, Florida, USA, July 22-25, volume VI, pp.157-162.

Schyndel, R. G. V., Tirkel, A. Z. and Osborne, C. F. 1994. A digital watermark, International Conference on Image Processing, 2: 86-90.

Tanaka, K., Nakamura, Y. and Matsui, K. 1990. Embedding secret information into a dithered multi-level image, Proceedings of 1990 IEEE Military Communications Conference, 216-220.