

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาพดิจิทัล ประวัติศาสตร์การพรางภาพ (Steganography) และการฝังลายน้ำ ลายน้ำดิจิทัล การแปลงเอสวีดี (Single value decomposition, SVD) และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามลำดับดังต่อไปนี้

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาพดิจิทัล

ภาพถูกนำมาใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างมนุษย์มาเป็นเวลาช้านานแล้ว ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่ว่าภาพเพียงหนึ่งภาพสามารถใช้แทนความหมายของสิ่งที่ไม่อาจเขียนออกมาเป็นข้อความได้อย่างจับสั่น ในชีวิตประจำวันมนุษย์ได้เห็นภาพในลักษณะต่างๆ มากมาย ทั้งภาพในธรรมชาติทั่วไป ภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพหรือภาพที่ได้จากจอภาพคอมพิวเตอร์ โดยในที่นี้จะเน้นที่การแสดงผลภาพของคอมพิวเตอร์ เมื่อวิทยาการทางด้านคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าขึ้นมนุษย์สามารถนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานได้มากกว่าการแสดงผลภาพอย่างเดียว จึงจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของภาพและใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการประมวลผลภาพ

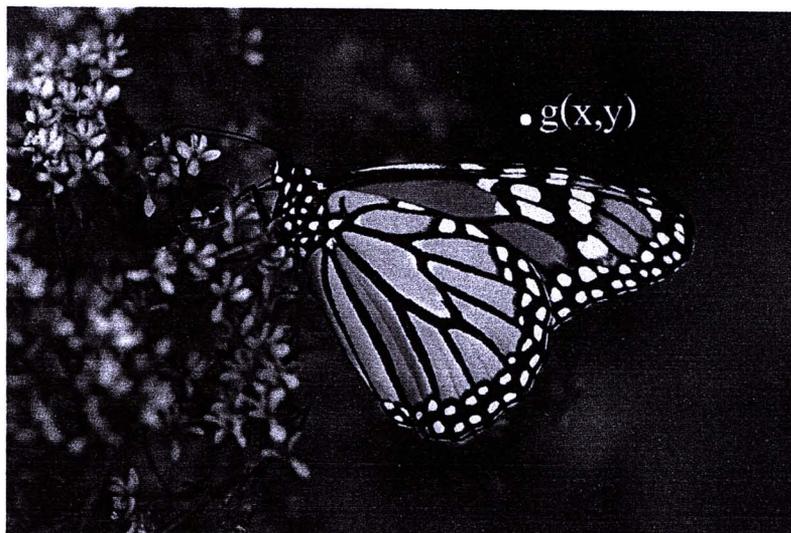
##### 2.1.1 ภาพเชิงกายภาพ (Physical image)

เป็นกระบวนการทางแสง (Optical process) ซึ่งเกิดจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) ที่มีช่วงความถี่แตกต่างกันไป เช่น แสงขาว (White light) แสงรังสีอินฟราเรด (Infrared) แสงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และแสงรังสีเอกซเรย์ (X-ray) เป็นต้น ตกกระทบลงบนวัตถุแล้วสะท้อนมาสู่ระบบประสาททางด้านการมองเห็นของมนุษย์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของระบบประสาททางด้านการมองเห็นของมนุษย์ทำให้ไม่สามารถรับรู้พลังงานบางช่วงความถี่ได้ เช่น แสงรังสีเอกซเรย์ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ที่เหมาะสม เพื่อแปลงพลังงานดังกล่าวให้อยู่ในรูปของแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ประมวลผลภาพ

##### 2.1.2 ภาพเชิงดิจิทัล (Digital image)

คือฟังก์ชัน 2 มิติ  $g(x,y)$  ของค่าความเข้ม (Intensity) โดยที่  $x$  และ  $y$  คือ ค่าแสดง

ตำแหน่งในระบบพิกัดฉากและค่าของ  $g$  ณ ตำแหน่ง  $(x,y)$  ใดๆ จะเป็นสัดส่วนกับความสว่างของแสง ณ ตำแหน่งนั้น (Castleman, 2001; Baxes, 2002) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพในความหมายของฟังก์ชัน 2 มิติ  $g(x,y)$   
ของค่าความเข้ม ณ ตำแหน่ง  $(x,y)$

### 2.1.3 การแปลงภาพอนาลอกให้เป็นภาพเชิงดิจิทัล (Image digitization)

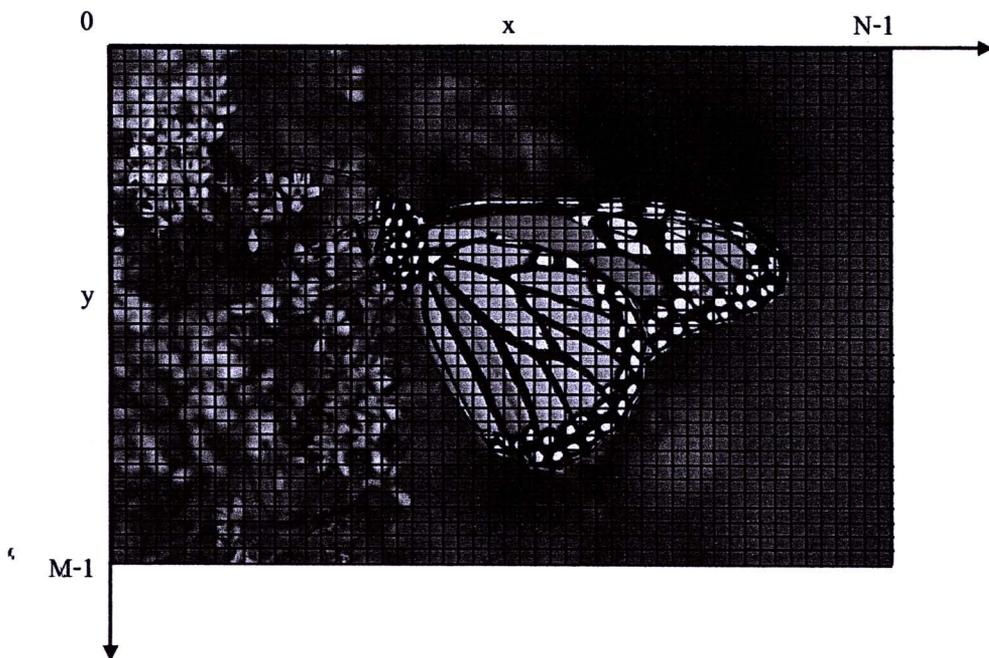
เมื่อต้องการนำภาพในธรรมชาติมาประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ จำเป็นที่จะต้องดำเนินการแปลงภาพเชิงกายภาพให้เป็นภาพเชิงดิจิทัล ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

#### ก. การบันทึกภาพ (Image acquisition)

การบันทึกภาพด้วยอุปกรณ์เชิงแสง (Optical device) นี้ เป็นการแปลงภาพเชิงต่อเนื่อง (Continuous image) 3 มิติ ซึ่งเป็นภาพที่สามารถเห็นในธรรมชาติรอบตัวเรา ให้เป็นภาพเชิงต่อเนื่อง 2 มิติ เช่น ภาพบนจอภาพของคอมพิวเตอร์

#### ข. การสุ่มเลือกทางจุดภาพ (Image sampling)

เป็นกระบวนการแปลงภาพ 2 มิติที่ได้ ให้เป็นภาพเชิงดิจิทัล โดยการสุ่มเลือกทางจุดตำแหน่ง (Spatially sampling) โดยจะสุ่มเลือกเฉพาะบางจุดบนภาพทางแนวแกน  $x$  และ  $y$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสุ่มเลือกทางจุดตำแหน่งของภาพ ซึ่งขณะปฏิบัติจริง การสุ่มทั้งสองแกนจะมีความถี่มากกว่าในภาพที่แสดงนี้

ผลที่ได้นี้สามารถแทนด้วยเมตริกซ์ (Matrix) ของปริมาณเชิงจำนวนเต็มขนาด  $M \times N$  ดังนี้

$$G = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & g(0,2) & \dots & g(0,N-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & g(1,2) & \dots & g(1,N-1) \\ g(2,0) & g(2,1) & g(2,2) & \dots & g(2,N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(M-1,0) & g(M-1,1) & g(M-1,2) & \dots & g(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

หน่วยเล็กๆ ของภาพที่ถูกแบ่งด้วยเส้นแบ่งทั้งสองแนวเรียกว่าจุดภาพ ดังนั้น  $g(2,8)$  แทนจุดภาพ ณ ตำแหน่งแถวที่ 2 สดมภ์ที่ 8 และ  $g(M-1,N-1)$  แทนจุดภาพ ณ ตำแหน่งแถวสุดท้ายคือ  $M-1$  สดมภ์สุดท้ายคือ  $N-1$  ในทางปฏิบัติค่า  $M$  และ  $N$  นิยมให้เป็นค่าจำนวนเต็มที่เป็นกำลังของสอง เช่น  $M = 2^k$ ,  $N = 2^n$  โดยที่  $k$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ใดๆ เช่น  $2^{10} = 1024$ ,  $2^9 = 512$ ,  $2^8 = 256$  เป็นต้น

### ค. การประมาณค่าความเข้มในแต่ละจุดภาพ (Quantization)

ในกรณีที่เป็นภาพระดับสีเทา สีดำถูกแทนด้วยค่า 0 และสีขาวถูกแทนด้วยค่า 255 โทนสีจะไล่ระดับจากเข้มมาอ่อน และถูกแทนด้วยจำนวนเต็มที่มีค่าระหว่างค่าทั้งสอง โดยภาพระดับสีเทาถูกแทนที่ด้วย 256 ระดับสี หรือ  $2^8$  โดย 8 คือจำนวนบิตในหน่วยความจำที่ใช้เพื่อเก็บค่าหนึ่งค่า ดังนั้นสีดำมีค่าความเข้มเป็น 0 หรือเขียนแทนด้วย  $00000000_2$  และสีขาวมีค่าความเข้มเป็น 255 ถูกแทนด้วย  $11111111_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยภาพระดับสีเทาจะมีฟังก์ชันของค่าความเข้มเป็นปริมาณสเกลาร์ ภาพระดับสีเทาบางครั้งอาจเรียกว่า “ภาพสีเดียว” (Monochrome image) ภาพนี้เกิดจากการผสมสีของแม่สีทั้ง 3 สี (ระบบสี RGB) ในอัตราส่วนที่เท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 โทนสีของภาพระดับสีเทาที่ค่าสีตั้งแต่ระดับ 0 ถึง 255



รูปที่ 2.4 ภาพระดับสีเทา

ในกรณีที่เป็นภาพขาวดำ ค่าความเข้ม ณ จุดภาพใด ๆ จะถูกแทนด้วยสีขาวหรือสีดำเท่านั้น โดยสีขาวมีค่าความเข้มเป็น 1 และสีดำมีค่าความเข้มเป็น 0 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยใช้เนื้อที่เพื่อจัดเก็บข้อมูลสีเพียง 1 บิตเท่านั้น



รูปที่ 2.5 ภาพขาวดำ

## 2.1.4 การกระทำในระดับจุดภาพ (Pixel-based operations)

### ก. การกระทำเชิงพีชคณิต (Arithmetical operations)

เป็นการบวก ลบ คูณ หาร ค่าความเข้มของจุดภาพ การกระทำเชิงพีชคณิตสามารถแบ่งออกเป็นการกระทำระหว่างค่าคงที่กับภาพ (Monadic arithmetical operations) และการกระทำระหว่างภาพ 2 ภาพหรือมากกว่า 2 ภาพ (Dynamic arithmetical operations) โดยภาพที่จะนำมากระทำทางพีชคณิตนั้น ต้องมีข้อมูลบนแต่ละจุดภาพเป็นข้อมูลประเภทเดียวกัน และมีจำนวนองค์ประกอบที่เท่ากัน แต่ขนาดของภาพอาจไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน

### ข. การกระทำทางตรรกศาสตร์ต่อภาพ (Logical operations)

การกระทำทางตรรกศาสตร์ต่อภาพแบ่งออกเป็น Uninary operation และ Binary operation เช่น AND/NAND OR/XOR และ NOT เป็นต้น

### ค. การกระทำเชิงเรขาคณิต (Geometric Operations)

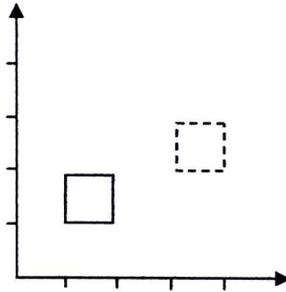
การกระทำเชิงเรขาคณิตเป็นการนำภาพมาเปลี่ยนแปลงแก้ไขตำแหน่งหรือขนาดของภาพ ประกอบด้วย การเลื่อน การหมุน และการย่อ/ขยาย

#### 1) การเลื่อนจุดพิกัด (Translation)

จุดใดๆ ก็ตามในระบบพิกัดสามารถถูกเลื่อนจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ โดยการเปลี่ยนค่าพิกัด (x,y) ของภาพไปเป็นค่าพิกัด (x',y') ด้วยระยะทางที่เลื่อนไป  $T_x$  และ  $T_y$  ตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ ค่าโคออดิเนตของตำแหน่งใหม่ได้จากการบวกค่าระยะทาง ( $T_x, T_y$ ) ที่เลื่อนไปกับค่าโคออดิเนตที่ตำแหน่งเดิม ทำให้ได้ตำแหน่งใหม่ตามต้องการเรียก ( $T_x, T_y$ ) ว่า "Translation Vector" ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และสามารถเขียนแทนด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$x' = x + T_x \quad (2.1)$$

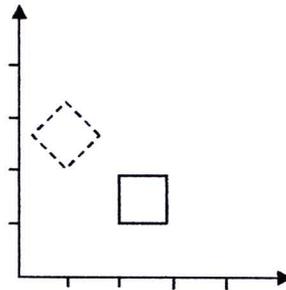
$$y' = y + T_y \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.6 การเลื่อนจุดพิกัดของภาพ โดยเส้นทึบ (—) แทนจุดพิกัดใด ๆ และเส้นประ (-----) แทนจุดพิกัดใหม่ที่เลื่อนตำแหน่ง

## 2) การหมุน (Rotation)

เป็นการแปลงภาพอีกแบบหนึ่ง การหมุนภาพต้องกำหนดว่าจุดใดเป็นจุดหมุนเสมอ หลังจากทีภาพถูกหมุนไปแล้วระยะห่างระหว่างจุดหมุนกับภาพจะยังคงมีค่าเท่าเดิม รูปร่างลักษณะของภาพยังคงเดิม แต่ภาพจะมีการจัดวางที่ต่างไปจากเดิม อันเนื่องมาจากการหมุนนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การหมุนภาพ โดยเส้นทึบ (—) แทนภาพต้นฉบับ และเส้นประ (-----) แทนภาพที่ถูกหมุนไปจากเดิม

โดยระยะทางที่เปลี่ยนไปนี้ ถูกกำหนดโดยขนาดมุมในการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 อธิบายถึงการเปลี่ยนจุดจากตำแหน่ง  $(x,y)$  ไปเป็น  $(x',y')$  โดยขนาดมุมที่หมุนไปเป็นมุม  $\beta$  และมีจุดหมุนอยู่ที่จุดกำเนิดมุม  $\theta$  เป็นขนาดมุมที่วัดจากแกนอนจนถึงแนวเส้นที่ผ่านจุดเริ่มต้น  $(x,y)$  ทำให้สามารถหาสมการสำหรับการหมุนจากความสัมพันธ์ของมุมและระยะทางมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$x' = r \cos \theta \cos \beta - r \sin \theta \sin \beta \quad (2.3)$$

$$y' = r \sin \theta \cos \beta + r \cos \theta \sin \beta \quad (2.4)$$

โดย  $r$  คือ ระยะทางจากจุดกำเนิดถึงจุดที่พิจารณา นอกจากนี้ยังได้ว่า

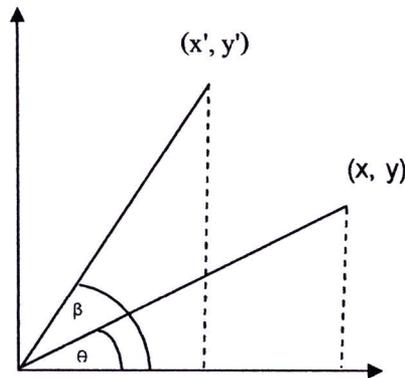
$$x = r \cos \theta \quad (2.5)$$

$$y = r \sin \theta \quad (2.6)$$

ทำให้สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$x' = x \cos(\beta) - y \sin(\beta) \quad (2.7)$$

$$y' = x \sin(\beta) + y \cos(\beta) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนจุดจากตำแหน่ง  $(x, y)$  ไปเป็น  $(x', y')$

โดยเป็นการหมุนรอบจุดกำเนิด

### 3) การย่อหรือขยายภาพ (Scaling)

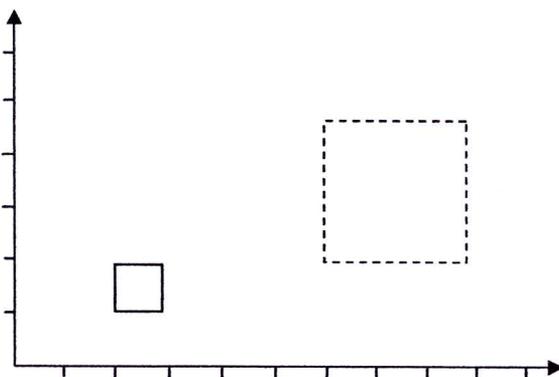
สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดของภาพได้โดยการเปลี่ยนขนาดหน้าต่างแสดงภาพ หรือเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องแสดงภาพ ภาพวัตถุสามารถเปลี่ยนขนาดได้โดยการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างจุด ซึ่งสามารถเปลี่ยนขนาดของวัตถุได้โดยการคูณระยะห่างระหว่างจุด หรือค่าโคออดิเนตเดิม  $(x, y)$  ด้วยค่าซึ่งทำระยะห่างมากขึ้นหรือทำให้ระยะห่างลดลง ค่านี้เรียกว่า สเกลลิ่งแฟกเตอร์ (Scaling factor) คือ  $S_x$  และ  $S_y$  ซึ่งเป็นการขยายขนาดวัตถุตามแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามลำดับ ถ้าสเกลลิ่งแฟกเตอร์มากกว่า 1 ก็จะได้ภาพขยาย ถ้าค่าน้อยกว่า 1 ก็จะได้ภาพย่อแต่ถ้าค่าเท่ากับ 1 ก็หมายถึงไม่มีผลต่อขนาดของภาพวัตถุทำให้ได้ค่าโคออดิเนตใหม่ของวัตถุที่ถูกขยายเป็น  $(x', y')$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เมื่อใดก็ตามที่มีการย่อหรือขยายภาพมีจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “จุดประจำที่” (Fixed point) ของการย่อหรือขยายภาพซึ่งใช้สำหรับเป็นจุดอ้างอิง ถ้าให้จุด  $(x,y)$  เป็นจุดใด ๆ ของภาพก็จะสามารถย่อหรือขยายได้โดยการคูณด้วยแฟกเตอร์  $S_x$  สำหรับทิศทางในแกน  $x$  และแฟกเตอร์  $S_y$  สำหรับทิศทางในแกน  $y$  ก็จะได้จุดใหม่  $(x',y')$  ดังนี้

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $p$  คือจุดใด ๆ ในภาพ

$$p' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนขนาดของภาพ โดยเส้นทึบ (—) แทนภาพต้นฉบับ และเส้นประ (-----) แทนภาพที่ถูกขยายขนาด

เมื่อ  $p'$  คือจุดใหม่ที่ภาพย้ายไป

$$S = \begin{pmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $S$  คือสเกลลิงแฟกเตอร์ จะได้ว่าจุดใหม่ที่ภาพย้ายไปคือ



สํานักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่ 18	ส.ย. 2555
เลขทะเบียน	246938
เลขเรียกหนังสือ	

$$\begin{aligned}
 p' &= Sp \\
 &= \begin{pmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} S_x x \\ S_y y \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} S_x x \\ S_y y \end{pmatrix} \tag{2.12}
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $S_x$  คือสเกลลิ่งแฟกเตอร์ในแนวนอน  
 $S_y$  คือสเกลลิ่งแฟกเตอร์ในแนวตั้ง

ถ้า  $S_x$  ไม่เท่ากับ  $S_y$  ผลก็คือภาพที่ได้จากย่อหรือขยายจะเกิดการผิดเพี้ยนไปจากภาพเดิม ถ้าสเกลลิ่งแฟกเตอร์มากกว่า 1 ภาพที่ถูกขยายแล้วจะถูกเคลื่อนย้ายห่างออกไปจากจุดประจำที่ ถ้าสเกลลิ่งแฟกเตอร์น้อยกว่า 1 ภาพที่ถูกย่อแล้วจะถูกเคลื่อนย้ายเข้ามาใกล้จุดประจำที่มากขึ้น

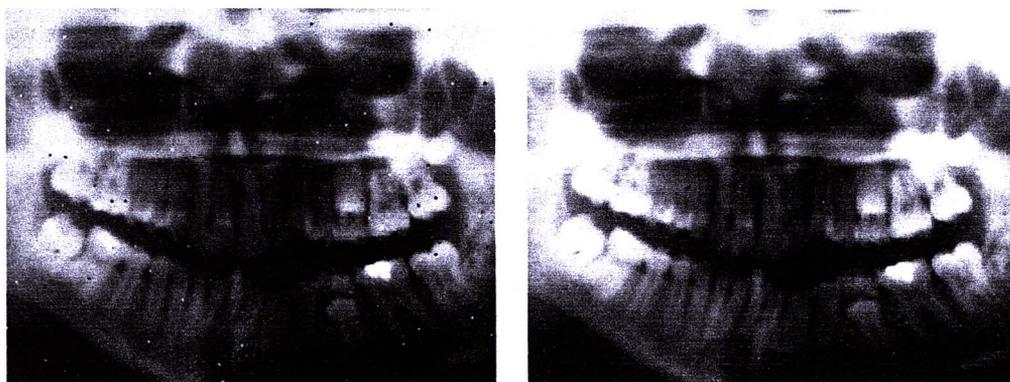
### 2.1.5 การประมวลผลภาพ

การใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพมีลักษณะการประมวลผลที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้ การปรับปรุงคุณภาพของภาพ (Image enhancement) การเรียกคืนภาพ (Image restoration) การแบ่งตัดภาพ (Image segmentation) การบีบอัดและขยายกลับคืนภาพ (Image compression and decompression) การบรรยายและนำเสนอความหมายของภาพ (Image description and representation) และการแปลความหมายและรู้จำภาพ (Image interpretation and recognition)

#### ก. การปรับปรุงคุณภาพของภาพ

เป็นการดำเนินการเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของภาพ ทั้งในด้านความคมชัด ความสว่าง และการกำจัดสิ่งรบกวนที่ไม่ต้องการ (Noise) หรือการทำให้มีความคมชัดมากขึ้น โดยที่การประมวลผลมี 2 ลักษณะคือแบบ Subjective enhancement และแบบ Objective enhancement โดยที่ Subjective enhancement เป็นการทำให้คุณภาพของภาพดีขึ้นโดยใช้วิธีการใดๆ จนกว่าจะได้ผลเป็นที่พอใจ ส่วน Objective enhancement นั้น เป็นการทำให้คุณภาพดีขึ้น ซึ่งมีวิธีการที่แน่นอนเพื่อให้ได้ภาพตามเป้าหมายที่ถูกกำหนดไว้ก่อนแล้ว

(Castleman, 2001) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ภาพก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ทำให้สิ่งรบกวนที่ไม่ต้องการถูกกำจัดออกไป จนสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าเมื่อใช้ภาพต้นฉบับรายละเอียดของภาพที่ต้องการจะปรากฏขึ้น



ก)

ข)

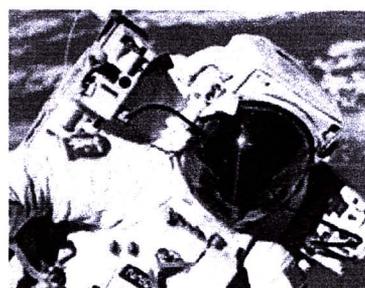
รูปที่ 2.10 การปรับปรุงคุณภาพของภาพ ก) จากภาพที่มีสิ่งรบกวนที่ไม่ต้องการ จนทำให้สิ่งรบกวนนั้นถูกกำจัดออกไปดังในภาพ ข)

## ข. การเรียกคืนภาพ

เป็นการดำเนินการที่คล้ายกับการปรับปรุงคุณภาพของภาพ แต่การเรียกคืนภาพจะเป็นการประมวลผลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น การแก้ความบิดเบือนของภาพที่เกิดขึ้นขณะบันทึกภาพ ในกรณีเกิดการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์บันทึกภาพความผิดพลาดอันเนื่องมาจากปรับโฟกัสทำให้ภาพเบลอ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพดีเป็นปกติ จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการซึ่งเรียกว่า “การเรียกคืนภาพ” กระบวนการนี้สามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของภาพได้ โดยทำการลดหรือกำจัดผลที่เกิดจากความคาดเคลื่อนตามชนิดของความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น แล้วใช้กระบวนการผวนกลับเพื่อที่จะเรียกคืนภาพต้นฉบับ



ก)



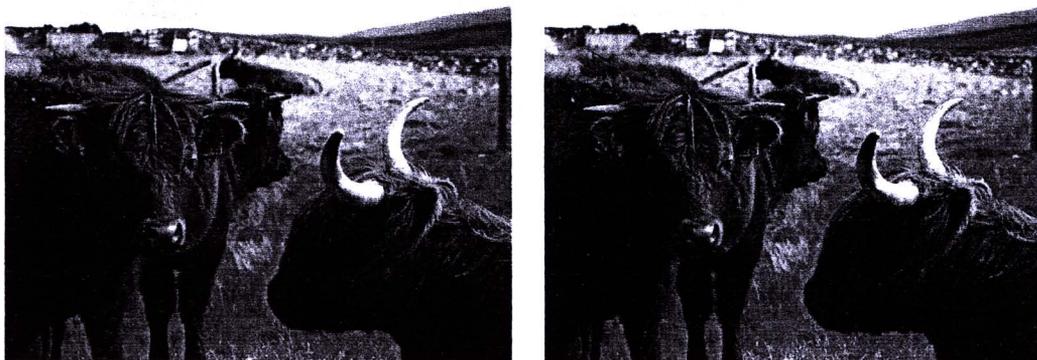
ข)

รูปที่ 2.11 การเรียกคืนภาพ ก) จากภาพที่มีปัญหาขณะถูกบันทึก

ข) สามารถทำให้กลับคืนมามีคุณภาพตามที่ต้องการ

### ค. การบีบอัดและขยายกลับคืน

เป็นกระบวนการที่ทำให้ข้อมูลมีขนาดกะทัดรัด (Compact) เพื่อประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล โดยมีเป้าหมายคือการลดขนาดของข้อมูลให้เล็กที่สุดและคงคุณภาพของภาพไว้ให้ได้มากที่สุด วิธีการนี้มีหลักการสำคัญคือการกำจัดจำนวนข้อมูลที่ซ้ำซ้อน (Redundancy) ที่มีอยู่ในภาพ เมื่อต้องการใช้ข้อมูลภาพนี้ก็จะใช้วิธีการขยายกลับคืนเพื่อสร้างภาพต้นฉบับ โดยการบีบอัดข้อมูลภาพ (Castleman, 2001) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือการบีบอัดแบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless compression) เป็นการบีบอัดข้อมูล que เมื่อขยายกลับมาแล้วภาพจะมีคุณภาพเหมือนข้อมูลต้นฉบับ เนื่องจากการบีบอัดโดยแทนข้อมูลเดิมด้วยสัญลักษณ์หรือข้อมูลใหม่ที่สั้นกว่า และการบีบอัดแบบมีการสูญเสีย (Lossy compression) เป็นการบีบอัดข้อมูล que เมื่อขยายกลับมาแล้วจะมีคุณภาพต่ำกว่าข้อมูลต้นฉบับ เนื่องจากจะมีข้อมูลบางส่วนสูญเสียไปในกระบวนการบีบอัดข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.12



ก)

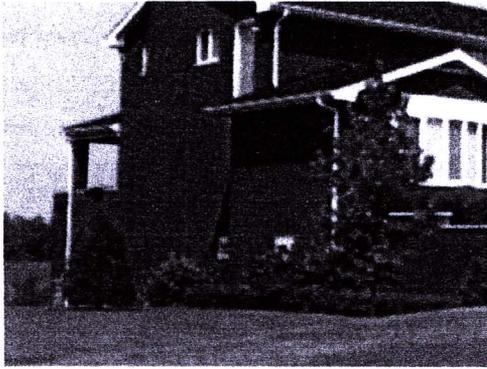
ข)

รูปที่ 2.12 การบีบอัดภาพ ก) จากภาพต้นฉบับก่อนถูกบีบอัด

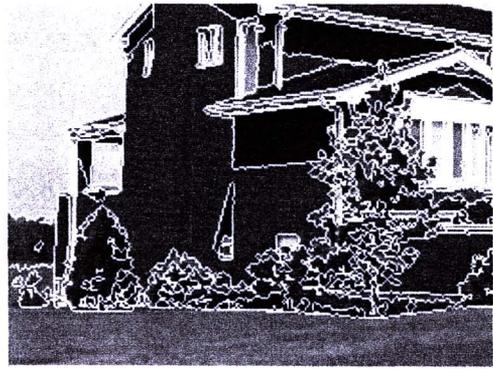
ข) สามารถลดขนาดข้อมูลและคงคุณภาพไว้

### ง. การแบ่งตัดภาพ

เป็นการดำเนินการเพื่อหาอาณาเขตของบริเวณต่างๆ ภายในภาพซึ่งแต่ละบริเวณอาจสื่อความหมายที่แตกต่างกันออกไปทำให้สามารถเข้าใจข่าวสารที่ฝังอยู่ในภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในระดับสูงขึ้นไปได้ เช่น การรู้จำวัตถุในภาพ โดยทั่วไปวิธีการแบ่งตัดภาพแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือการแบ่งตัดโดยอาศัยลักษณะของบริเวณแต่ละบริเวณ (Region) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 การแบ่งตัดโดยใช้ลักษณะของขอบเขต (Boundary) และการแบ่งตัดโดยใช้เส้นขอบ (Edge) ซึ่งเกิดจากการเชื่อมกันของจุดภาพหลาย ๆ จุดภาพ



ก)



ข)

รูปที่ 2.13 การหาขอบภาพ ก) จากภาพต้นฉบับ ข) สามารถตัดแบ่งภาพ  
โดยอาศัยลักษณะของบริเวณแต่ละบริเวณ

#### จ. การบรรยายและนำเสนอความหมายของภาพ

เป็นการดำเนินการเพื่อนำเสนอความหมายของภาพด้วยคุณลักษณะที่แตกต่างกันในภาพ เช่น ขอบภาพ ขอบเขตภาพ บริเวณภาพ รูปทรงภาพ (Shape) และลวดลาย (Texture) เป็นต้น ภายหลังจากคุณลักษณะของภาพที่ถูกเฟ้นหาออกมาจากภาพแล้ว จะเป็นการนำเสนอความหมายภาพ หรือบริเวณใด ๆ ของภาพสามารถอธิบายด้วยคุณลักษณะที่แตกต่างกัน

#### ฉ. การแปลความหมายและรู้จำภาพ

เป็นการดำเนินการเพื่อแปลความหมายและรู้จำบริเวณใด ๆ ของภาพ ซึ่งสามารถนำไปสู่การสรุปความหมายของภาพ และสามารถตอบสนองต่อสิ่งเร้าที่เหมาะสมของหน่วยประมวลผลได้

### 2.1.6 รูปแบบไฟล์ภาพดิจิทัล (Digital image file format)

รูปภาพสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

#### ก. รูปภาพแบบเวกเตอร์ (Vector images)

เป็นข้อมูลภาพสองมิติที่อยู่ในลักษณะของคำสั่งหรือคำอธิบายที่ใช้วาดภาพ ดังนั้นรูปภาพจะไม่ขึ้นกับความละเอียดของภาพ เมื่อทำการย่อขยายรูปภาพแบบนี้คอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณรูปภาพใหม่ทำให้ภาพคมชัดเสมอและไม่หยابมากขึ้น เนื่องจากรูปภาพชนิดนี้เป็นภาพที่เกิดจากการใช้คำสั่งในการวาดจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เก็บภาพที่มีสีสลับซับซ้อนและไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน เช่น ภาพในธรรมชาติ แต่จะถูกใช้ในงานภาพที่มีลักษณะเป็น

รูปทรงเรขาคณิต เช่น ภาพสัญลักษณ์สินค้า และการออกแบบบ้าน เป็นต้น สำหรับโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ ได้แก่ Adobe Illustrator และ AutoCAD เป็นต้น

## ข. รูปภาพแบบราสเตอร์ (Raster images)

เป็นข้อมูลภาพสองมิติที่มีความละเอียดของภาพที่แน่นอน ซึ่งเป็นภาพที่แสดงสีได้ตามธรรมชาติจึงเหมาะสำหรับแสดงภาพทั่วไป ข้อมูลภาพของรูปภาพแบบราสเตอร์จะอยู่ในรูปของ Colormap โดยที่แต่ละส่วนคือ 1 จุดภาพ แต่ละจุดภาพเป็นอิสระต่อกันทำให้สามารถเลือกดำเนินการใดที่จุดภาพที่ละตำแหน่งหรือเป็นกลุ่มก็ได้ เช่น การปรับค่าความสว่างของภาพ จนกระทั่งถึงการดำเนินการที่ยุ่งยากกว่า เช่น การซ้อนภาพหนึ่งลงไปอีกภาพหนึ่ง เป็นต้น สำหรับโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้สร้างรูปภาพแบบราสเตอร์ ได้แก่ Adobe Photoshop เป็นต้น และไฟล์ที่เป็นรูปภาพแบบราสเตอร์ ได้แก่ ไฟล์นามสกุล BMP และ JPG โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1) BMP (Windows bitmap)

เป็นรูปแบบไฟล์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับการใช้งานบนวินโดวส์ โดยเฉพาะ ด้วยลักษณะการจัดเก็บไฟล์เป็นจุดสีทีละจุดจึงทำให้ไม่มีการสูญเสียข้อมูลใดๆ เช่นเดียวกับไฟล์ภาพ TIF ทั้งนี้ไฟล์ BMP สามารถรองรับแบบจำลองสีได้หลายรูปแบบ ทั้งแบบจำลองสี RGB, Indexed Color, Gray Scale และ Bitmap เป็นรูปแบบที่มีการเก็บข้อมูล 4 บิต และ 8 บิต ต่อหนึ่งจุดภาพ

### 2) JPG หรือ JPEG (Joint photographic experts group)

เป็นรูปแบบของไฟล์ภาพที่ใช้กันมาก เพื่อแสดงภาพที่อยู่ในแบบจำลองสี Indexed color และรูปภาพที่ไฟล์เอกสารแบบ HTML (Hypertext markup language) ซึ่งนิยมใช้กันมากในการทำเว็บไซต์ และบริการออนไลน์ต่าง ๆ ไฟล์แบบ JPEG นี้รองรับโหมดสีแบบ CMYK, RGB, Gray scale

## 2.2 ประวัติสเตกาโนการพีและการฝังลายน้ำ

### 2.2.1 ประวัติสเตกาโนการพี

สเตกาโนการพี (Steganography) มาจากคำในภาษากรีก “Stegano” ที่หมายถึง “Covered” และ “graphia” ที่หมายถึง “writing” สเตกาโนการพีเป็นศาสตร์ของการซ่อนข้อมูลข่าวสารในการสื่อสารซึ่งยังคงมีอยู่จนถึงปัจจุบัน วัตถุประสงค์ของสเตกาโนการพีคือ การซ่อนข้อมูลข่าวสารไว้ภายในข้อมูลที่ไม่เป็นที่น่าสงสัย ซึ่งทำให้เป็นการยากที่จะตรวจสอบได้ว่ามีข่าวสารที่เป็นความลับซ่อนอยู่ภายใน ตัวอย่างของสองเรื่องราวที่เกี่ยวข้องกับเทคนิค

สเตกาโนกราฟี ซึ่งถูกบันทึกไว้ในพงศาวดารของ Herodotus (1996) เมื่อ 440 ปีก่อนคริสตกาล เรื่องแรกกล่าวถึง Demeratus ต้องการเตือน Sparta ว่า Xrses เตรียมพร้อมจะบุกโจมตีดินแดนของกรีก เขาได้ใช้วิธีการซ่อนสารลับลงแผ่นบรอนซ์ที่มีแฉกเคลือบอยู่ (ใช้สำหรับเขียนหนังสือ) ด้วยวิธีการขูดแฉกที่เคลือบอยู่บนแผ่นบรอนซ์ จากนั้นเขียนสารลับไว้บนบางส่วนของแผ่นบรอนซ์แล้วก็ทาแฉกทับกลับบนแผ่นบรอนซ์ เสร็จแล้วจึงนำไปส่งผ่านทหารยามไปได้โดยง่าย เรื่องที่สองมีผู้ตีชาวเปอร์เซียชื่อว่า Histiaeus ต้องการส่งสารลับไปยังเมือง Miletus โดยทำการโกนผมทาสของเขาออกและสักข่าวสารอันเป็นความลับไว้บนหัวของทาส หลังจากที่เส้นผมของทาสผู้นั้นยาวขึ้นปกปิดข้อความเหล่านั้น จึงส่งให้ทาสผู้นั้นเดินทางไปยังเมือง Miletus เมื่อไปถึงจึงให้โกนหัวทาสผู้นั้นเพื่อเปิดเผยสารลับนั้นแก่ Aristagoras ผู้สำเร็จราชการแห่งเมือง Miletus หลังจากนั้น Aristagoras จึงเริ่มก่อการจลาจลต่อกษัตริย์เปอร์เซีย

## 2.2.2 ประวัติลายน้ำ

จุดกำเนิดของการฝังลายน้ำเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1282 ที่เมือง Fabirano ประเทศอิตาลี สิ่งที่คิดในตอนนั้นคือทำอย่างไรที่จะแสดงเครื่องหมายที่มองไม่เห็นบนแผ่นกระดาษได้ เนื่องจากในสมัยนั้นมีโรงงานทำกระดาษมากถึง 40 โรงงาน จึงเริ่มมีการสร้างเครื่องหมายประจำตัวขึ้นในระหว่างขั้นตอนการทำกระดาษ โดยใส่ลายเส้นบาง ๆ ลงที่แม่พิมพ์ของกระดาษ ทำให้แผ่นกระดาษเกิดเป็นแถบเส้นบาง ๆ ที่มีความโปร่งใส ซึ่งมีจุดประสงค์ให้ลายน้ำดังกล่าวเป็นเครื่องหมายการค้าของโรงงานผู้ทำกระดาษแผ่นนั้นขึ้นมา จนกระทั่งปลายศตวรรษที่ 18 การฝังลายน้ำบนกระดาษถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในทวีปยุโรปและทวีปอเมริกา ในเวลาต่อมาได้นำการฝังลายน้ำมาใช้ป้องกันการปลอมแปลงธนบัตร แสตมป์และเอกสารชนิดอื่นๆ งานวิจัยเกี่ยวกับการฝังลายน้ำดิจิทัลได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1990 โดย Tanaka และคณะ (1990) ได้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพ หลังจากนั้นก็มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับการฝังลายน้ำดิจิทัลถูกตีพิมพ์มากมายจนถึงในปัจจุบัน

## 2.2.3 ความแตกต่างระหว่างสเตกาโนกราฟีและการฝังลายน้ำ

เป้าหมายหลักของวิธีสเตกาโนกราฟีคือการฝังข้อมูลที่เป็นความลับลงในข้อมูลหลักภายใต้สมมุติฐานที่ว่าบุคคลอื่นไม่สามารถล่วงรู้ข้อมูลลับที่ถูกฝังไว้ในข้อมูลหลักได้ ผลลัพธ์โดยทั่วไปของวิธีนี้จะไม่คงทนนัก ตัวอย่างเช่น ถ้าข้อมูลหลักที่ผ่านการฝังข้อมูลลับมีความเสียหายหรือเปลี่ยนแปลงไปจะไม่สามารถถอดข้อมูลลับคืนกลับมาได้

ส่วนเป้าหมายหลักของวิธีการฝังลายน้ำนั้น นอกจากที่บุคคลอื่นไม่สามารถตรวจสอบได้ว่ามีข้อมูลลับฝังอยู่ในข้อมูลหลักหรือไม่แล้ว ข้อมูลลับที่ถูกฝังอยู่จะยังต้องมีความคงทนต่อการลบทำลายหรือแก้ไขข้อความที่ซ่อนอยู่หากถูกตรวจพบอีกด้วย ผลลัพธ์ของวิธีนี้จะมีความคงทนมากกว่าวิธีสเตกาโนกราฟี ที่มุ่งเน้นเพียงการซ่อนข้อมูลเป็นหลัก

## 2.3 ลายน้ำดิจิทัล

ลายน้ำดิจิทัลคือข้อมูลดิจิทัลที่ถูกฝังลงในสื่อดิจิทัล เช่น ตัวอักษร รูปภาพ รูปภาพกราฟิก รูปภาพเคลื่อนไหวที่สร้างขึ้น เสียง วิดิทัศน์ และเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เพื่อใช้แสดงความเป็นเจ้าของ ติดตาม และป้องกันการละเมิดสิทธิ์ทางปัญญา (สุพจน์ นิตยสุวรรณ, 2545) ทั้งในลักษณะที่สามารถมองเห็นได้ จะแสดงให้เห็นลายน้ำดิจิทัลได้อย่างชัดเจน และลักษณะที่ไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งจะต้องใช้วิธีการเฉพาะเพื่อการสืบค้น โดยลายน้ำดิจิทัลทั้งสองแบบจะต้องไม่สามารถถูกดึงออกจากสื่อได้โดยง่าย (Petitcolas, Anderson และ M. G. Kuhn, 1998; Swanson, Kobayashi และ Tewfik, 1998; Fridrich, 1999)

### 2.3.1 ประเภทของลายน้ำดิจิทัล

ประเภทของลายน้ำดิจิทัลสามารถจำแนกได้ตามปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### ก. จำแนกตามการรับรู้ของสายตามนุษย์ (Human perception)

การรับรู้ของสายตามนุษย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

##### 1) ลายน้ำดิจิทัลแบบมองเห็นได้ (Visible watermark)

จะเป็นการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพต้นฉบับโดยตรง เมื่อฝังลายน้ำดิจิทัลเข้าไปแล้วจะต้องไม่รบกวนภาพต้นฉบับหรือรบกวนให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Swanson, Kobayashi และ Tewfik, 1998) นั้นหมายถึง ยังคงมองเห็นลักษณะของภาพต้นฉบับเดิมได้อย่างชัดเจน และยังสามารถเห็นลายน้ำดิจิทัลที่แทรกลงในภาพต้นฉบับด้วย เพื่อแสดงความเป็นเจ้าของในภาพนั้นๆ บุคคลทั่วไปที่พบเห็นจะสามารถรับรู้ได้โดยทันทีว่าภาพนั้นๆ เป็นของผู้ใด นอกจากนี้ยังเป็นการยับยั้งการกระทำที่จะเป็นการละเมิดสิทธิ์ของภาพนั้นๆ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อด้อยคือภาพต้นฉบับจะมีคุณภาพลดลง เนื่องจากลายน้ำดิจิทัลจะไปบดบังรายละเอียดของภาพต้นฉบับ แต่การฝังลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบนี้ยังคงเป็นที่นิยมใช้ในการแสดงความเป็นเจ้าของ เพราะสามารถดำเนินการได้ง่ายและไม่ซับซ้อน ในบางครั้งความพยายามที่จะกำจัดลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในภาพนั้นๆออก อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูปภาพซึ่งอาจจะเสียหายและมีคุณภาพต่ำลง (Yang et al., 2009; Liu และ Tsai, 2010)

##### 2) ลายน้ำดิจิทัลแบบมองไม่เห็น (Invisible watermark)

ลักษณะที่สำคัญของการฝังลายน้ำดิจิทัลชนิดนี้ คือเมื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพต้นฉบับแล้ว จะไม่สามารถมองเห็นลายน้ำดิจิทัลในภาพต้นฉบับ

และต้องไม่ทำให้ภาพต้นฉบับเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม หรือเปลี่ยนลักษณะไปจากเดิมให้น้อยที่สุด (চারুরত্নী, অমরিকা, এবং বনিতা, তিথাকর, 2545) การฝังลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบนี้ บุคคลอื่นจะไม่สามารถล่วงรู้เลยว่ามีการฝังลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ในรูปภาพนั้นๆ หรือไม่ จึงทำให้บุคคลที่จะทำการคัดลอกย่อมกลัวการถูกติดตามและฟ้องร้องอันเนื่องมาจากลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในรูปภาพ นอกจากนี้การใช้รูปภาพที่ไม่ทราบที่มาที่ไปก็มีความระมัดระวังมากขึ้นด้วย เพราะในกรณีที่เจ้าของภาพนั้นมาพบและพิสูจน์โดยใช้ลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในภาพแสดงถึงความเป็นเจ้าของได้ ก็จะสามารถฟ้องร้องต่อบุคคลที่นำรูปภาพดังกล่าวมาใช้งาน (Wang, Wu และ Niu, 2006; Chou และ Liu, 2010)

## ข. จำแนกตามโดเมนลายน้ำดิจิทัล (Watermarking domain)

ลายน้ำดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามโดเมนที่ลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ คือ โดเมนพื้นที่ และโดเมนความถี่

### 1) โดเมนพื้นที่ (Spatial domain)

เป็นการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในค่าความเข้มสีของภาพต้นฉบับโดยตรง ซึ่งใช้วิธีการเลือกจุดภาพแล้วทำการปรับแต่งค่าความเข้มสี โดยพิจารณาจากตำแหน่งของจุดภาพที่อยู่ในภาพต้นฉบับนั้น ๆ เป็นสำคัญ (Mukherjee, Maitra และ Acton, 2004; Huang et al., 2005; Karybali และ Berberidis, 2006)

### 2) โดเมนความถี่ (Frequency domain)

เป็นการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในโดเมนความถี่ของภาพต้นฉบับ วิธีนี้เริ่มจากการแปลงภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่ โดยใช้วิธีการแปลง (Transform) แบบต่างๆ เช่น การแปลงฟูเรียร์ (Discrete fourier transform, DFT) (Pholsomboon และ Vongpradhip, 2004; Fan และ Sun, 2008; Kang, Dong และ Wang, 2009) หรือการแปลงโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete cosine transform, DCT) (Briassouli และ Strintzis, 2004; Das, Maitra และ Mitra, 2005; Briassouli et al., 2005) หรือการแปลงเวฟเล็ต (Discrete wavelet transform, DWT) (Lin et al., 2008; Liu และ Chou, 2009; Akhaee et al., 2009) หรือการแปลงเอสวีดี (Single value decomposition, SVD) (Liu และ Tan, 2002; WU, 2005; Chang, Tsai และ Lin, 2005; Chang, Hu และ Lin, 2007) จากนั้นทำการแก้ไขค่าเอกฐานของการแปลงที่มีค่าอยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งจะมีผลต่อการตัดสินใจเพื่อกำหนดปริมาณลายน้ำดิจิทัลที่จะฝังลงบนภาพต้นฉบับเพื่อให้มีความสมดุลกันระหว่างการมองเห็นและความคงทน

## ค. จำแนกตามวัตถุประสงค์การใช้ลายน้ำดิจิทัล

วัตถุประสงค์การใช้ลายน้ำดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

### 1) ลายน้ำดิจิทัลแบบเปราะบาง (Fragile watermark)

เป็นวิธีที่มุ่งเน้นไปที่ความเปราะบางของลายน้ำดิจิทัล ซึ่งลายน้ำดิจิทัลที่ถูกฝังไว้ในข้อมูลจะมีความไวต่อการเสียหายและการเปลี่ยนแปลงแม้เพียงเล็กน้อย วิธีการประเภทนี้จะมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการสร้างความน่าเชื่อถือของข้อมูลว่าเป็นของแท้ที่ไม่ได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงแก้ไขใดๆ มาก่อน (Taheri และ Ghaemmaghami, 2005; Ping และ Zhi, 2006)

### 2) ลายน้ำดิจิทัลแบบคงทน (Robust Watermark)

เป็นวิธีฝังลายน้ำดิจิทัลที่ภายหลังการใส่ลายน้ำดิจิทัลแล้ว ลายน้ำดิจิทัลจะยังคงอยู่ตราบเท่าที่การโจมตีมีขนาดไม่รุนแรงเกินไป วิธีนี้จะมีความเหมาะสมกับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของตัวข้อมูลเนื่องจากความยากลำบากในการเปลี่ยนแปลงแก้ไขเพื่อทำลายลายน้ำดิจิทัลที่ฝังอยู่ในภาพ (Calagna et al., 2006; Chandra et al., 2008)

## ง. จำแนกตามข้อมูลที่เป็นสำหรับการถอดลายน้ำดิจิทัล

ตามความต้องการภาพต้นฉบับในระหว่างกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัล สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ต้องใช้ภาพต้นฉบับ ต้องใช้ข้อมูลในภาพต้นฉบับ และไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ

### 1) ต้องใช้ภาพต้นฉบับ (Non-blind watermarking)

ในกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลของวิธีนี้ต้องใช้ภาพต้นฉบับ หรือในบางกรณีอาจต้องใช้ทั้งภาพต้นฉบับและลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับ โดยทั่วไปกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลทำได้โดยนำภาพต้นฉบับมาลบออกด้วยภาพที่ต้องการตรวจสอบ ข้อดีของวิธีการนี้คือลายน้ำดิจิทัลที่ฝังอยู่จะมีความทนทานสูง แต่มีข้อเสียคือต้องเก็บภาพต้นฉบับไว้ใช้ในการพิสูจน์ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ และยังคงต้องเสียเวลาในการค้นหาและเพื่อนำภาพต้นฉบับกลับมาใช้ในการพิสูจน์แต่ละครั้ง (Chandra, 2002)

### 2) ต้องใช้ข้อมูลในภาพต้นฉบับ (Semi-blind watermarking)

เป็นวิธีการถอดลายน้ำดิจิทัลที่แตกต่างจากวิธีที่ผ่านมา กล่าวคือไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ แต่ยังคงต้องการข้อมูลบางส่วนของภาพต้นฉบับ เช่น ขนาดของภาพต้นฉบับ หรือคุณลักษณะทางสถิติของภาพต้นฉบับ หรือเมทริกซ์ของภาพต้นฉบับ แต่ในบางกรณีอาจต้องการใช้ลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับร่วมในการถอดด้วย ข้อดีของวิธีการนี้คือลดความ

สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บลงได้บางส่วน แต่ยังคงมีข้อเสียที่ต้องเสียเวลาในการค้นหาข้อมูล บางส่วนภาพต้นฉบับมาใช้ในระหว่างกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัล (Liu และ Tan, 2002)

### 3) ไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ (Blind watermarking)

เป็นวิธีการที่ไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับและลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับในการถอดลายน้ำดิจิทัลกลับคืน จากข้อดีนี้ทำให้ช่วยลดความสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บและยังช่วยลดเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการค้นหาภาพต้นฉบับลง (Chang, Hu และ Lin, 2007; Chang, Lin และ Hu, 2007; Chandra และ Srinivas, 2008)

## 2.3.2 คุณสมบัติที่ต้องการของลายน้ำดิจิทัล

ทุกวันนี้วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการป้องกันลิขสิทธิ์มากขึ้น เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นภาพนิ่ง วิดิทัศน์ เสียง และเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแต่ละวิธีจะมีวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามยังคงมีคุณสมบัติหลักพื้นฐานที่ต้องการเหมือนกัน สามารถแจกแจงรายละเอียดคุณสมบัติที่ต้องการต่างๆ บนภาพได้ดังต่อไปนี้

### ก. คุณสมบัติที่ต้องการของลายน้ำแบบคงทน

- 1) หลังการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้ว คุณภาพของรูปภาพไม่ควรลดลงมาก
- 2) เมื่อนำภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่มาถูกโจมตี โดยวิธีการประมวลสัญญาณต่าง ๆ ทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงการบีบอัดแบบมีการสูญเสีย วิธีการเหล่านี้ต้องไม่สามารถทำให้ลายน้ำดิจิทัลหายไปหรือถูกทำลายได้
- 3) แม้ลายน้ำดิจิทัลบางส่วนจะหายไป ลายน้ำดิจิทัลที่คงอยู่ต้องชัดเจนพอที่จะสามารถระบุเจ้าของผลงานที่แท้จริงได้
- 4) นอกจากเจ้าของผลงานแล้ว บุคคลอื่นต้องไม่สามารถถอดลายน้ำดิจิทัลออกได้ แม้จะใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างภาพเดียวกันที่ถูกฝังลายน้ำดิจิทัลคนละตัว
- 5) การทำลายลายน้ำดิจิทัลในภาพนั้น อาจทำได้ต่อเมื่อภาพถูกโจมตีด้วยวิธีการใดๆ จนคุณภาพของภาพลดต่ำลงถึงขั้นที่ไม่อาจใช้การใดๆ ได้อีก

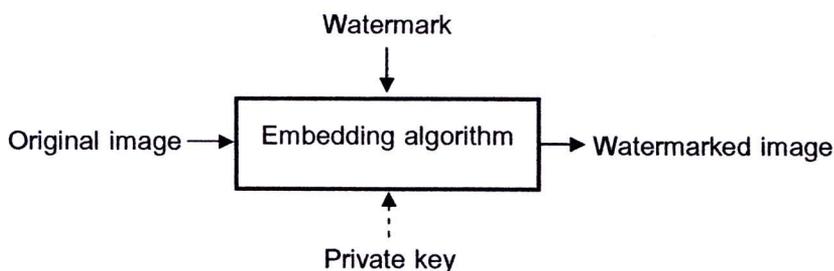
## ข. คุณสมบัติที่ต้องการของลายน้ำแบบเปราะบาง

สำหรับการฝังลายน้ำแบบเปราะบางนั้น จำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ที่ต้องการเพิ่มเติมจากคุณสมบัติที่ต้องการของลายน้ำแบบคงทน ดังนี้

- 1) สามารถตรวจสอบการปลอมแปลงที่เกิดขึ้นกับรูปภาพได้
- 2) สามารถระบุตำแหน่งที่ถูกเปลี่ยนแปลงหรือบริเวณที่ถูกแก้ไขบนรูปภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ได้

### 2.3.3 การฝังลายน้ำดิจิทัล (Watermark embedded)

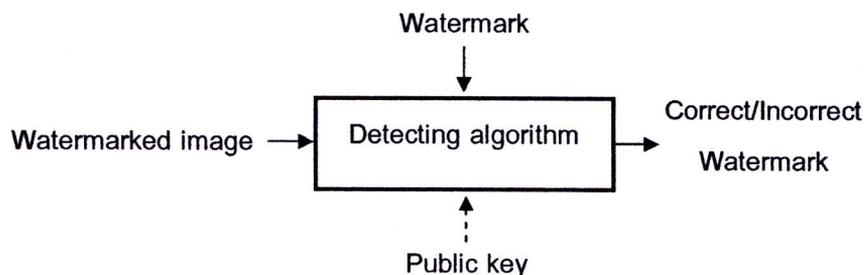
การฝังลายน้ำดิจิทัลคือกระบวนการใส่ลายน้ำดิจิทัลให้ฝังเข้าอยู่ในสื่อดิจิทัลต้นฉบับ โดยให้มีจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้และไม่ทำให้คุณภาพของสื่อเสียหายไป อีกทั้งจะต้องคงทนต่อการโจมตีทำลายทั้งที่ตั้งใจและไม่ตั้งใจ ข้อมูลเข้า (Input) ของกระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัลนี้จะประกอบด้วย ภาพต้นฉบับ ลายน้ำดิจิทัลที่จะนำมาใส่ลงในภาพต้นฉบับ และในบางกรณีจำเป็นต้องใช้รหัสลับส่วนตัว (Private key) ด้วย (Petiteolas, Anderson และ Kahn, 1999) ภาพทั้งสองส่วนนี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแทรก (Embedding algorithm) หลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วข้อมูลผลลัพธ์ (Output) ที่ได้ก็คือภาพผลลัพธ์ที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพต้นฉบับ

### 2.3.4 การตรวจหาลายน้ำดิจิทัล (Watermark detection)

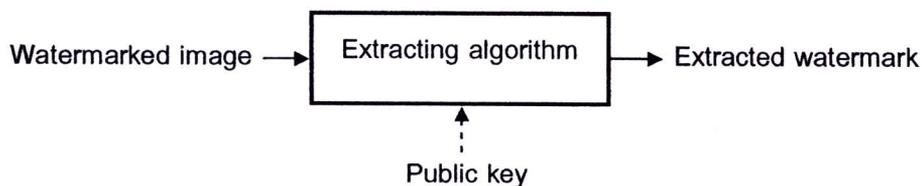
เมื่อมีความต้องการพิสูจน์ความเป็นเจ้าของ โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นการฝังลายน้ำดิจิทัลแบบไม่สามารถมองเห็นได้นั้น จะเริ่มต้นด้วยการตรวจหาว่าในภาพที่ต้องสงสัยนั้นมีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่หรือไม่ โดยใช้กระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ข้อมูลเข้าของกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลนี้คือภาพที่ต้องสงสัยว่ามีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ ลายน้ำดิจิทัลในบางกรณีอาจมีรหัสลับหรือภาพต้นฉบับด้วย



รูปที่ 2.15 การตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อาจฝังอยู่ในภาพต้นฉบับ

### 2.3.5 การถอดลายน้ำดิจิทัล (Watermark extraction)

ในกรณีที่ตรวจพบลายน้ำดิจิทัลในภาพนั้น ขั้นตอนถัดมาก็คือการถอดลายน้ำดิจิทัล การถอดลายน้ำดิจิทัลจะมีแนวทางปฏิบัติอยู่ 2 แบบ แบบแรกคือการถอดลายน้ำดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ (Blind watermarking) เกิดขึ้นเมื่อในบางกรณีที่ไม่สามารถหาภาพต้นฉบับได้ อีกแบบหนึ่งเป็นการถอดลายน้ำดิจิทัลที่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ ซึ่งทั้งสองรูปแบบเป็นกระบวนการที่ทำให้ได้ลายน้ำดิจิทัลและภาพต้นฉบับก่อนถูกฝังลายน้ำดิจิทัลกลับคืนมา ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การถอดลายน้ำดิจิทัลออกจากภาพผลลัพธ์ที่ลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่

### 2.3.6 เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัล

#### ก. การแทนบิตที่มีความสำคัญน้อยที่สุด (Least significant bit replacement, LSB)

การแทนบิตที่มีความสำคัญน้อยที่สุดเป็นเทคนิคที่มีแนวคิดพื้นฐานที่สุดในการฝังลายน้ำดิจิทัล ซึ่งใช้วิธีการเข้าไปแก้ไขบิตต่ำสุดของแต่ละจุดภาพที่อยู่ในภาพต้นฉบับ โดยการแทนที่แต่ละบิตของภาพต้นฉบับเดิมด้วยบิตของลายน้ำดิจิทัล (Petitcolas, Anderson และ M. G. Kuhn, 1998; Swanson, Kobayashi และ Tewfik, 1998; Fridrich, 1999) ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถฝังข้อมูลของลายน้ำดิจิทัลได้จำนวนมาก และเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนทำให้ไม่ต้องการเวลาในการคำนวณมาก แต่ในขณะเดียวกันมีข้อเสียคือความคงทนต่อการถูก

เปลี่ยนแปลงแก้ไขบนตัวรูปภาพของวิธีการนี้ก็มีน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย ซึ่งในเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิตอลที่พัฒนาขึ้นในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่จะอาศัยแนวคิดดังกล่าว

## ข. การปรับแต่งค่าความสว่างในแต่ละคู่ของจุดภาพ (Patchwork)

เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิตอลวิธีที่สองเป็นวิธีการเชิงสถิติ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าแต่ละจุดภาพภายในรูปภาพมีค่าความสว่างเฉลี่ยเป็น 0 และเป็นอิสระจากกัน ดังนั้นหากทำการเลือกจุดภาพขึ้นมาจำนวนสองกลุ่ม ( $a$  และ  $b$ ) อย่างสุ่มแล้ว ผลต่างของค่าเฉลี่ยของความสว่างจากทั้งสองกลุ่มควรมีค่าเข้าใกล้ 0 ดังสมการที่ (2.13) (Bender, 1996)

$$\bar{x}_a - \bar{x}_b = 0 \quad (2.13)$$

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

จากข้อเท็จจริงดังกล่าว ในวิธีการฝังลายน้ำดิจิตอลนี้จะทำการปรับแต่งค่าความสว่างในแต่ละคู่ของจุดภาพให้แตกต่างกัน โดยทำการเพิ่มค่าของแต่ละจุดภาพในกลุ่ม  $a$  ด้วยค่า  $\alpha$  ซึ่งเป็นค่าน้อยๆ และในทำนองเดียวกันก็ลดค่าของแต่ละตำแหน่งในกลุ่ม  $b$  ด้วยค่าเดียวกัน ดังนั้นผลลัพธ์ที่คาดหวังจากสมการที่ (2.13) ควรเป็นดังสมการที่ (2.14)

$$(\bar{x}_a + \alpha) - (\bar{x}_b - \alpha) = 2\alpha \quad (2.14)$$

ค่าและตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการแก้ไขไปดังกล่าวก็จะกลายเป็นรหัสลับ (Secret key) ที่เจ้าของรูปภาพเก็บไว้เพื่อใช้พิสูจน์ลิขสิทธิ์บนตัวรูปภาพในภายหลัง วิธีการนี้มีความคงทนต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เพิ่มมากขึ้นกว่าวิธีแรก แต่อย่างไรก็ดีวิธีการดังกล่าวไม่สามารถรองรับกับการแปลงเชิงเรขาคณิตต่างๆ ได้ เนื่องจากเมื่อได้ผ่านการแปลงดังกล่าวแล้วรูปภาพจะถูกประมาณค่า (Interpolate) ใหม่ ทำให้ค่าความสว่างใหม่ที่ได้ในแต่ละตำแหน่งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

## ค. Texture block coding

วิธีการนี้กระทำโดยการเลือกเอาส่วนหนึ่งของภาพไปฝังไว้ในอีกส่วนหนึ่งของภาพที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งจะเป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดขึ้นกับรูปภาพจะส่งผลให้บริเวณทั้งสองดังกล่าวได้รับผลกระทบในลักษณะเดียวกัน สำหรับกระบวนการตรวจหาลายน้ำนั้น สามารถกระทำได้โดยการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติ (Auto-correlation)

(Bender, 1996) นับว่าเป็นวิธีการที่มีความทนทานค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีข้อเสียหลายประการ คือ

- 1) ไม่มีการใช้รหัสลับหรืออัลกอริทึมพิเศษซึ่งแสดงลักษณะของเจ้าของเฉพาะเจาะจง
- 2) สามารถกระทำได้กับเฉพาะบางรูปภาพที่มีส่วนคล้ายคลึงกันเท่านั้น
- 3) การตรวจหาหลายน้ำดิจิตอลอาจผิดพลาดได้ในกรณีที่รูปภาพมีส่วนที่คล้ายคลึงกันโดยบังเอิญ
- 4) ในขั้นตอนการพิจารณาเลือกพื้นผิวที่ใกล้เคียงกันภายในรูปภาพนั้น กระทำโดยการพิจารณาของมนุษย์เอง ไม่สามารถกระทำโดยอัตโนมัติได้

#### ง. การกระจายแถบความถี่ (Spread spectrum)

การซ่อนลายน้ำดิจิตอลโดยใช้วิธีการกระจายแถบความถี่เป็นวิธีการที่มีความทนทานสูง วิธีการดังกล่าวอาศัยทฤษฎีการมอดูเลชัน (Modulation) ในระบบสื่อสารที่เรียกว่า "Spread spectrum technique" (Pickholtz, Schilling และ Millstein, 1982) โดยวิธีการดังกล่าวใช้ขนาดความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) ที่มากกว่าที่ใช้ในเทคนิคการมอดูเลชันแบบอื่น อันเป็นผลทำให้สามารถลดขนาดของสัญญาณที่ส่งในแต่ละช่วงความถี่ลงได้ ทำให้การส่งสัญญาณด้วยเทคนิคดังกล่าวตรวจจับได้ยาก เนื่องจากระดับสัญญาณในแต่ละย่านความถี่มีระดับต่ำมาก (อยู่ในระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่โดยทั่วไปในช่องสัญญาณ) ซึ่งคุณสมบัติอันนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการซ่อนลายน้ำดิจิตอลลงในรูปภาพได้ โดยการพิจารณารูปภาพที่ต้องการซ่อนเปรียบเสมือนช่องสัญญาณที่จะทำการส่งข้อมูล ในขณะที่แต่ละจุดภาพภายในรูปภาพเปรียบเสมือนสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร ซึ่งในที่นี้ลายน้ำดิจิตอลจะเปรียบเสมือนกับสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง คุณสมบัติที่สำคัญของวิธีนี้คือ ลายน้ำดิจิตอลที่ถูกซ่อนลงในรูปภาพนี้จะต้องไม่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจนเป็นที่สังเกตได้ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวิธีการกระจายแถบความถี่ดังกล่าวข้างต้น โดยการใช้วิธีการดังกล่าว ทำให้ค่าความสว่างของลายน้ำดิจิตอลสามารถกำหนดให้อยู่ในระดับที่ต่ำเพียงพอที่จะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของวิธีการกระจายแถบความถี่คือมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งในกรณีของการประยุกต์ใช้เพื่อการซ่อนลายน้ำดิจิตอล จะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิตอลมีความทนทานต่อกระบวนการประมวลผลภาพ ทั้งในกรณีที่กระทำ

โดยเจตนาเพื่อการทำลายตัวลายน้ำที่ซ่อนอยู่ และในกรณีอื่น ๆ เช่น เพื่อผลในด้านการปรับปรุงภาพ หรือเพื่อการลดขนาดของข้อมูล เป็นต้น (Cox et al., 1997)

การซ่อนข้อมูลโดยวิธีการกระจายแถบความถี่สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I'(x, y) = I(x, y) + \alpha \sum_{i=1}^N w_i S_i(x, y) \quad (2.15)$$

โดยที่	$\alpha$	=	ค่ากำหนดความเข้มของสัญญาณ (Amplitude factor)
	$N$	=	จำนวนของรหัส Spreading code
	$w_i$	=	ข้อมูลที่จะซ่อนลำดับที่ $i$
	$S_i$	=	Spreading code ลำดับที่ $i$

สำหรับการตรวจหาและดึงเอาข้อมูลกลับคืนมานั้น ข้อมูล  $w_i$  ใดๆ จะสามารถดึงกลับมาได้โดยใช้สมการที่ (2.15) อย่างไรก็ตาม วิธีที่นำเสนอ (Cox et al., 1997) ยังมีข้อเสียในขั้นตอนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล ซึ่งในกรณีที่รูปภาพได้ผ่านกระบวนการแปลงบางอย่างมา โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในเชิงเรขาคณิต จำเป็นจะต้องมีการผันกลับกระบวนการแปลงที่เกิดขึ้นกับรูปภาพนั้น (เช่น หมุนรูปภาพกลับด้วยมุม  $-\theta$  หากภาพดังกล่าวถูกหมุนไปจากแกนเดิมเป็นมุม  $\theta$  เป็นต้น) ซึ่งทำให้เพิ่มความซับซ้อนในการตรวจสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ทั่วไปที่เราไม่สามารถทราบค่าของการผันกลับที่แท้จริงได้ ในกรณีดังกล่าวจำเป็นต้องมีการคำนวณเป็นจำนวนมากเพื่อทำการประมาณค่าของกระบวนการผันกลับดังกล่าว นอกจากนี้แล้ววิธีการดังกล่าวยังจำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับในการเปรียบเทียบเพื่อตรวจหาลายน้ำดิจิทัลอีกด้วย ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ ตลอดจนเวลาที่ใช้ในการค้นหารูปภาพดังกล่าวด้วย (สิริพร ผลสมบูรณ์, 2547)

### 2.3.7 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ

- ก. เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพของวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลนั้น ประยุกต์ใช้เกณฑ์การวัดคุณภาพของภาพ (Image quality) (Katzenbeisser และ Petitcolas, 1999) โดยแบ่งออกเป็น

#### 1) เกณฑ์เชิงคุณภาพ (Subjective fidelity criteria)

เพื่อวัดประสิทธิภาพการมองเห็นด้วยตามนุษย์ มีวิธีการคือสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันมาทำการทดลอง โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มคนที่มีพื้นฐานด้านการประมวลผลภาพและกลุ่มคนที่ไม่มีความรู้พื้นฐานด้านนี้มาก่อน ขั้นต่อมาคือให้กลุ่มตัวอย่างทั้งสองมา

พิจารณาภาพที่ฝังภาพลายน้ำดิจิทัลแล้วพร้อมกัน จากนั้นให้คะแนนตามเกณฑ์ที่กำหนด (Subjective fidelity scoring scale) แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือผลการทดลองจะไม่มีมาตรฐานเพียงพอ ทั้งนี้อาจเกิดจากกลุ่มตัวอย่างมีความลำเอียงในการให้คะแนนหรืออาจเกิดจากประสิทธิภาพการมองเห็นของกลุ่มตัวอย่าง เช่น คนตาบอดสีบางสี

## 2) เกณฑ์เชิงปริมาณ (Objective fidelity criteria)

การใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เป็นเกณฑ์วัดผลการทดลอง ข้อดีคือสะดวกต่อการใช้งาน เช่น การใช้ค่า  $PSNR$  (Peak signal-to-noise ratio) ในการวัดความผิดเพี้ยนของภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วเทียบกับภาพต้นฉบับ และการวัดสัดส่วนความเหมือนของลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกได้ทั้งก่อนและหลังการโจมตีเชิงสัญญาณเปรียบเทียบกับลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับใช้ค่าเอกฐานสหสัมพันธ์

การวัดประสิทธิภาพของการฝังลายน้ำดิจิทัลสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้เกณฑ์เชิงปริมาณเป็นเกณฑ์การวัดผลการทดลองซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน ตามกระบวนการวิจัย คือกระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัล ใช้ค่า  $PSNR$  เป็นเกณฑ์การวัดผลการทดลอง กระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลใช้การวัดสัดส่วนความเหมือนและอัตราความผิดพลาดเป็นเกณฑ์การวัดผลการทดลอง

- ข. การตรวจสอบหาค่าความผิดเพี้ยนของภาพโดยใช้ค่า  $PSNR$  เป็นตัววัดเกณฑ์เชิงปริมาณที่ใช้ประเมินค่าสัญญาณรบกวน (ลายน้ำดิจิทัล) ที่ฝังเพิ่มลงไป ในสัญญาณหลัก(ภาพต้นฉบับ) โดยมีหน่วยวัดเป็นเดซิเบล ( $dB$ :Decibel) ซึ่งวิธีคำนวณแสดงได้ดังสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17 ตามลำดับ

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{255^2}{MSE} \right) \text{ dB} \quad (2.16)$$

เมื่อค่า  $MSE$  (Mean-squared-error) เขียนได้ดังนี้

$$MSE = \frac{\sum (f_w(x, y) - f(x, y))^2}{n} \quad (2.17)$$

เมื่อค่า  $f_w(x, y)$  เป็นภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่

$f(x, y)$  เป็นภาพต้นฉบับ

$n$  เป็นจำนวนจุดภาพในภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่และภาพต้นฉบับ

โดยคุณภาพการผิดเพี้ยนของภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้ว จะแปรผกผันตามค่า  $PSNR$  คือหากค่า  $PSNR$  น้อยแสดงว่าภาพมีการผิดเพี้ยนจากภาพต้นฉบับมากและหากค่า  $PSNR$  มากแสดงว่าภาพมีการผิดเพี้ยนน้อย

- ค. การวัดค่าความเหมือนของภาพ (Similarity measurement) ด้วยค่า  $NC$  คือ จะใช้วัดค่าความเหมือนระหว่างลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับและลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาได้ทั้งก่อนและหลังผ่านการโจมตีแล้ว โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในช่วงระหว่างค่า 0 ถึงค่า 1 สำหรับวิธีการคำนวณค่าความเหมือนของภาพ 2 มิติ สามารถทำได้ตามสมการที่ (2.18)

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j W_{(i,j)} - W'_{(i,j)}}{\sum_i \sum_j [W_{(i,j)}]^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $W_{(i,j)}$  และ  $W'_{(i,j)}$  แทนค่าความเข้มสีของจุดภาพ ณ ตำแหน่ง  $(i, j)$  ในลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับและลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาตามลำดับ โดยคุณภาพของลายน้ำดิจิทัลจะแปรผันตามค่าความเหมือนของภาพกล่าวคือค่าความเหมือนสูงมากเท่าใด แสดงว่าลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาจะเหมือนกับภาพต้นฉบับมากขึ้นด้วยเช่นกัน

- ง. การวัดค่าอัตราความผิดพลาดของภาพ (Bit error rate) จะใช้ค่า  $BER$  เป็นตัวแสดงอัตราความผิดพลาดของจำนวนบิตลายน้ำดิจิทัลที่ถอดได้ไม่ถูกต้อง จากจำนวนบิตลายน้ำดิจิทัลทั้งหมดที่ฝังลงไป โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในช่วงระหว่างค่า 0 % ถึงค่า 100% ซึ่งวิธีการคำนวณนั้น แสดงได้ดังสมการที่ (2.19)

$$BER = \left( \frac{1}{M_w \cdot N_w} \cdot \sum_{b=1}^{M_w \cdot N_w} (W_b \oplus W'_b) \right) \cdot 100\% \quad (2.19)$$

เมื่อ  $W_b$  และ  $W'_b$  แทนบิตของลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับที่ฝังอยู่และบิตของลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาตามลำดับ โดย  $M_w$  และ  $N_w$  แทนจำนวนขนาดกว้างยาวของลายน้ำดิจิทัล เมื่อเครื่องหมาย  $\oplus$  แทนการกระทำ Exclusive-OR ซึ่งของคุณภาพของลายน้ำดิจิทัลที่ถอดได้จะแปรผันตามค่า  $BER$  คือถ้าค่า  $BER$  ต่ำแสดงว่าลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาได้มีการผิดเพี้ยนจากลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับน้อย

### 2.3.8 การประยุกต์ใช้ลายน้ำดิจิทัล

ในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์บนภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถชี้หรือแสดงให้เห็นได้ว่าใครคือผู้ที่เป็นเจ้าของหรือผู้เก็บรักษาผลงาน เมื่อมีการทำซ้ำตัวลายน้ำดิจิทัลที่ติดไปกับภาพต้นฉบับจะถูกนำมาใช้เป็นหลักฐานในการชี้ตัวผู้กระทำผิดได้ (Bender, 1996) โดยสามารถแบ่งออกโดยได้ 3 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

#### ก. การใส่คำอธิบายภาพ

เป็นการประยุกต์ใช้ลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบของการใส่คำอธิบาย (Caption) ลงในภาพต้นฉบับ เพื่อช่วยในการค้นหารูปภาพ โดยลายน้ำดิจิทัลจะทำหน้าที่บรรจุคำอธิบายข้อมูลเกี่ยวกับชื่อ วัน เวลา และสถานที่ ลงไปในภาพที่ไม่ต้องการความคงทนต่อการแก้ไข เช่น ภาพเอ็กซเรย์ในทางการแพทย์ ซึ่งลายน้ำดิจิทัลจะทำการบันทึกข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ของคนไข้ลงในภาพเอ็กซเรย์ ไม่ว่าจะเป็นชื่อคนไข้ วัน เวลา ที่มาเข้ารับรักษา ชื่อสถานพยาบาล ดังนั้นวิธีนี้จะช่วยเพิ่มความเร็วในการค้นหาภาพเอ็กซเรย์ของคนไข้ และช่วยลดความผิดพลาดในกรณีที่ข้อมูลของคนไข้กับภาพเอ็กซเรย์ไม่ตรงกัน

#### ข. การป้องกันการคัดลอก

เป็นการนำเทคนิคลายน้ำดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ในการติดตามการใช้หรือการคัดลอกผลงาน โดยใช้ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังติดไปกับภาพต้นฉบับเป็นตัวกำหนดสิทธิ์ในการครอบครอง เช่น ผู้ซื้อผลงานภาพศิลปะนี้มีสิทธิ์ในการครอบครองเท่านั้น หรือผู้ซื้อผลงานนี้มีสิทธิ์ทั้งในการครอบครองและจำหน่าย เมื่อมีการละเมิดลิขสิทธิ์เกิดขึ้น ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังอยู่จะถูกนำมาใช้เป็นหลักฐานในการพิสูจน์สิทธิ์และช่วยในการชี้ตัวผู้กระทำผิดได้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ผู้ละเมิดได้รับสิทธิ์เพียงครอบครอง แต่กลับนำภาพดังกล่าวไปจำหน่าย

#### ค. การรับรองความถูกต้อง

การประยุกต์ใช้ลายน้ำดิจิทัลรูปแบบสุดท้าย เป็นการนำเทคนิคลายน้ำดิจิทัลมาใช้ในการรับรองความถูกต้องของข้อมูล เช่น กรณีของภาพสแกนเอกสารทางการเงินของบริษัท เมื่อถูกผู้ประสงค์ร้ายทำการดัดแปลงให้ตัวเลขภายในภาพสแกนมีความหมายบิดเบือนไปจากความเป็นจริง มีผลทำให้บริษัทได้รับความเสียหาย ซึ่งปัญหานี้สามารถป้องกันได้โดยการนำลายน้ำดิจิทัลแบบเปราะบางมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรับรองความถูกต้องของข้อมูล เนื่องจากลายน้ำดิจิทัลที่ถูกฝังไว้ในข้อมูลจะมีความไวต่อการเสียหาย และสามารถตรวจสอบบริเวณที่ถูกเปลี่ยนแปลงได้

## 2.4 การแปลงเอสวีดี (Singular value decomposition, SVD)

เอสวีดี (SVD) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีบทของพีชคณิตเชิงเส้น เริ่มแรกเอสวีดีถูกนำมาใช้ในการบีบอัดภาพ (Andrews และ Patterson, 1976; Yang และ Lu, 1995; Adriana และ Stanley, 2002; Wongsawat et al., 2004) ต่อมาได้มีการนำมาใช้ในการฝังลายน้ำดิจิทัลอย่างกว้างขวาง ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะสมมากที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์เมทริกซ์ ในการแปลงเอสวีดีเมทริกซ์หนึ่งสามารถจะถูกแยกออกเป็นสามเมทริกซ์ที่มีขนาดเดียวกับเมทริกซ์ต้นฉบับ จากมุมมองของพีชคณิตเชิงเส้น รูปภาพเป็นอาร์เรย์ของจำนวนสมาชิกสเกลาร์ที่ไม่เป็นลบ ซึ่งสามารถถือว่าเป็นเมทริกซ์ เช่น

ให้  $A$  เป็นรูปภาพสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด  $N \times N$ , การแปลงเอสวีดีสามารถจะแยกเมทริกซ์  $A$  ออกเป็นสามเมทริกซ์ที่มีขนาดเดียวกับเมทริกซ์ต้นฉบับ เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} A &= USV^T \\ &= [u_1, u_2, \dots, u_N] \times [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N] \times [v_1, v_2, \dots, v_N]^T \\ &= \sum_{i=1}^N \sigma_i u_i v_i^T \end{aligned} \quad (2.20)$$

โดยที่  $U$  และ  $V$  เป็นเมทริกซ์มุมฉาก (Orthogonal matrices) ที่มีขนาด  $N \times N$  และ  $N \times N$  ตามลำดับ  $S$  เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix) ที่มีขนาด  $N \times N$  นั่นคือ สมาชิกทุกตัวที่มีค่าไม่เป็นศูนย์จะเรียกว่าเอกฐานของเมทริกซ์ (ขนาดของเมทริกซ์  $A$ ) และสมาชิกเอกฐานจะเรียงลำดับจากมากไปน้อย โดยที่สมาชิกแรกในตำแหน่งแนวทแยงมุมจะมีค่ามากที่สุด  $\sigma_i > \sigma_{i+1}$  สดมภ์ของเมทริกซ์  $U$  และ  $V$  จะเรียกว่าค่าเอกฐานเวกเตอร์ซ้ายและค่าเอกฐานเวกเตอร์ขวาตามลำดับ

### ก. ตัวอย่างเอสวีดี

เป็นตัวอย่างเพื่ออธิบายการแปลงเอสวีดี กำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 162 & 161 & 157 & 161 \\ 162 & 161 & 157 & 161 \\ 163 & 155 & 159 & 160 \\ 159 & 157 & 159 & 157 \end{bmatrix}$$

หากการดำเนินการเอวีดีถูกนำไปใช้บนเมทริกซ์นี้แล้ว เมทริกซ์  $A$  จะถูกแยกออกเป็นสามเมทริกซ์ที่มีขนาดเท่ากันดังต่อไปนี้

$$U = \begin{bmatrix} -0.5025 & -0.4767 & 0.1423 & 0.7071 \\ -0.5025 & -0.4767 & 0.1423 & -0.7071 \\ -0.4994 & 0.6849 & 0.5306 & 4.2616e-15 \\ -0.4955 & 0.2766 & -0.8234 & -2.6056e-15 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 637.7837 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5.2063 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.1384 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.6369e-15 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} -0.5065 & 0.2256 & 0.5264 & 0.6446 \\ -0.4971 & -0.7499 & -0.3920 & 0.1920 \\ -0.4954 & 0.6150 & -0.6032 & -0.1120 \\ -0.5010 & -0.0922 & 0.4533 & -0.7315 \end{bmatrix}$$

สมาชิกทุกตัวในแนวทแยงมุมของเมทริกซ์  $S$  นี้เป็นเอกฐานและเราสังเกตเห็นว่าสมาชิกเอกฐานเหล่านี้จะมีการเรียงลำดับจากมากไปน้อย:  $637.7837 \geq 5.2063 \geq 3.1384 \geq 1.6369e-15$

## ข. คุณสมบัติของเอวีดี

โดยทั่วไปถ้า  $A$  เป็นเมทริกซ์ใด ๆ จะมีเอกฐานหลายค่า เอกฐานตัวแรกมักจะมีค่ามากที่สุด เอกฐานตัวสุดท้ายจะมีค่าน้อยมาก และจำนวนของเอกฐานที่มีค่าไม่เป็นศูนย์จะเป็นขนาดของเมทริกซ์  $A$  (Andrews และ Patterson, 1976) เอวีดีนั้นมีลักษณะเฉพาะทางคณิตศาสตร์ที่เด่นอยู่หลายประการ จึงมีการนำคุณสมบัติของเอวีดีมาใช้ประโยชน์ในการฝั้งลายน้ำดิจิทัลสามารถแจกแจงได้ ดังนี้ (Chang, Tsai และ Lin, 2005; Zhou, Tang และ Tang, 2006)

- 1) ขนาดของเมทริกซ์จากการแปลงเอวีดีจะไม่ตายตัว นั่นคือสามารถเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้

- 2) เอกฐานของภาพมีเสถียรภาพดีมาก กล่าวคือแม้มีการรบกวนถูกเพิ่มเข้าไปในรูปภาพ เอกฐานของภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก
- 3) เอกฐานแสดงคุณลักษณะความสว่างหรือความเข้มสีของภาพ ในขณะที่คู่เอกฐานเวกเตอร์แสดงถึงคุณลักษณะทางเรขาคณิตของภาพ ทำให้เอกฐานมีคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติมบางอย่าง เช่น ไม่ผันแปรตามการหมุน ไม่ผันแปรตามการเคลื่อนที่ และไม่ผันแปรตามการเปลี่ยนตำแหน่ง ฯลฯ

Calagna และคณะ (2006) และ Chandra และ Srinivas (2008) ได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของความบิดเบือน อันเกิดจากการประมวลผลกับรูปภาพในเชิงเรขาคณิตบนเอกฐานของภาพ:

- 1) ไม่แปรผันต่อกระบวนการเคลื่อนที่ (Translation invariant)  
นำเมทริกซ์  $A$  มาเติมขอบด้วยค่า 0 (สีดำ) ทั้งสี่ด้านของเมทริกซ์เมทริกซ์ผลลัพธ์  $A_t$  มีเอกฐานที่มีค่าไม่เป็นศูนย์เท่ากับเมทริกซ์  $A$
- 2) ไม่แปรผันต่อกระบวนการสลับเปลี่ยน (Transpose invariant)  
เมทริกซ์  $A$  และเมทริกซ์ที่ผ่านการสลับเปลี่ยน  $A^T$  มีเอกฐานที่มีค่าไม่เป็นศูนย์เหมือนกัน
- 3) ไม่แปรผันต่อกระบวนการหมุน (Rotation invariant)  
เมทริกซ์  $A$  และเมทริกซ์ที่ผ่านการหมุน  $A_r$  (ทำการหมุนเมทริกซ์  $A$  ด้วยมุมต่างๆ) มีเอกฐานที่มีค่าไม่เป็นศูนย์เหมือนกัน
- 4) ไม่แปรผันต่อกระบวนการพลิก (Flip invariant)  
เมทริกซ์  $A$ , แกวของเมทริกซ์ที่ผ่านการพลิก  $A_f$  และหลักของเมทริกซ์ที่ผ่านการพลิก  $A_{f^T}$  มีเอกฐานที่มีค่าไม่เป็นศูนย์เหมือนกัน
- 5) ไม่แปรผันต่อกระบวนการปรับขนาด (Scale resilient)  
เมทริกซ์  $B$  เป็นเมทริกซ์  $A$  ที่ผ่านการปรับขนาดแกว โดยการทำซ้ำทุกแกวแทนที่  $L_1$  ครั้งสำหรับแต่ละเอกฐานที่มีค่าไม่เป็นศูนย์  $\sigma$  ของ  $A$ ,  $B$  มี  $\sqrt{L_1}\sigma$  เมทริกซ์  $C$  เป็นเมทริกซ์  $A$  ที่ผ่านการปรับขนาดสดมภ์ โดยการทำซ้ำทุกสดมภ์แทนที่  $L_2$  ครั้ง สำหรับแต่ละเอกฐานที่มี

ค่าไม่เป็นศูนย์  $\sigma$  ของ  $A, C$  มี  $\sqrt{L_2}\sigma$  ถ้าเมทริกซ์  $D$  ถูกปรับขนาดแถวโดย  $L_1$  ครั้งและปรับขนาดสดมภ์โดย  $L_2$  ครั้ง สำหรับแต่ละเอกฐานที่มีค่าไม่เป็นศูนย์  $\sigma$  ของเมทริกซ์  $A, D$  มี  $\sqrt{L_1 L_2}\sigma$

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสื่อสารที่เรียกว่าอินเทอร์เน็ตในปัจจุบัน ทำให้การคัดลอกข้อมูลดิจิทัลจากแหล่งหนึ่งสามารถแพร่กระจายไปทั่วโลกได้อย่างง่ายดายด้วยความง่ายดายนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์บนข้อมูลดิจิทัลเพิ่มขึ้นตามมา โดยผู้ละเมิดลิขสิทธิ์จึงใจทำการคัดลอกหรือแก้ไขปลอมแปลงข้อมูลดิจิทัล แล้วนำไปขายเพื่อผลประโยชน์ทางการค้า เป็นเหตุให้ในปัจจุบันได้มีการป้องกันและยับยั้งปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์ด้วยการนำวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลมาใช้เพื่อคุ้มครองลิขสิทธิ์ในผลงาน หรือเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์เนื้อหาในผลงานเพิ่มมากขึ้น วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลที่มีอยู่ในปัจจุบันจำนวนมาก ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อตอบสนองการใช้งานลายน้ำดิจิทัลเพียงวัตถุประสงค์เดียวก็คือ การใช้ลายน้ำแบบเปราะบางในการตรวจสอบเพื่อรับรองความเป็นต้นฉบับ หรือการใช้ลายน้ำแบบคงทนในการพิสูจน์ความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ ซึ่งทำให้ผู้ที่เป็นเจ้าของจะต้องเลือกใช้ประโยชน์จากวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลเพื่อป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์บนผลงานได้เพียงอย่างหนึ่งอย่างใดเท่านั้น ทั้งที่ปัญหาการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ในโลกแห่งความเป็นจริง มักจะเป็นปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์หลายวัตถุประสงค์ จึงเป็นการยากหากจะยับยั้งการละเมิดลิขสิทธิ์บนผลงานด้วยการใช้ลายน้ำเพียงวัตถุประสงค์เดียวในสภาพของการใช้งานจริง จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอหาวิธีการฝังและวิธีการถอดลายน้ำอเนกประสงค์บนรูปภาพดิจิทัล เพื่อให้สามารถนำมาใช้ตรวจสอบเพื่อรับรองความเป็นต้นฉบับและพิสูจน์ความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ในคราวเดียวกัน โดยวิธีการฝังและวิธีการถอดลายน้ำอเนกประสงค์ดังกล่าวจะกระทำบนเอชวีดี

จากการศึกษาค้นคว้าในรายละเอียดของวิธีการฝังและวิธีการถอดลายน้ำดิจิทัลบนภาพ พบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้หลายชิ้น สามารถจำแนกตามประเภทของลายน้ำดิจิทัลได้เป็น 2 ประเภทคือ จำแนกตามโดเมนลายน้ำดิจิทัล และจำแนกตามวัตถุประสงค์การใช้ลายน้ำดิจิทัล ซึ่งผู้วิจัยขอแนะนำงานวิจัยเหล่านั้นดังต่อไปนี้

### ก. จำแนกตามโดเมนลายน้ำดิจิทัล

งานวิจัยของวิธีการฝังและถอดลายน้ำดิจิทัลที่กระทำบนเอชวีดี สามารถแบ่งออกตามบริเวณค่าเอกฐานที่ถูกฝังและอัลกอริทึมที่ใช้ในการฝังได้เป็น 3 ประเภทคือ อัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัลบนค่าเอกฐาน (Singular values) อัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัลบน

ค่าเอกฐานเวกเตอร์ซ้ายหรือขวา (Left/right singular vectors) อัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนค่าเอกฐานเวกเตอร์ซ้ายหรือขวาและค่าเอกฐาน (Left/right singular vectors and singular values)

### 1) อัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนค่าเอกฐาน

ในงานวิจัยของ Gorodetski และคณะ (2001) นำเสนอวิธีใหม่ในการฝังลายน้ำแบบมองไม่เห็นลงบนรูปภาพ วิธีการนี้เริ่มจากการแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณ (Block) จากนั้นทำการฝังบิตของข้อมูลลายน้ำลงบนค่าเอกฐานของแต่ละบริเวณ ลายน้ำที่ฝังสามารถทนทานต่อการโจมตีแบบบีบอัดภาพที่ระดับ 40% นอกจากนี้วิธีนี้ยังสามารถทำการถอดลายน้ำโดยไม่จำเป็นต้องใช้ภาพต้นฉบับอีกด้วย วิธีการที่นำเสนอนี้ได้นำคุณสมบัติเด่นของค่าเอกฐานในเอ็สวีดีมาใช้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าเอกฐานเพียงเล็กน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของภาพที่ถูกฝังมากนัก ค่าเอกฐานนั้นทำหน้าที่แสดงคุณลักษณะความสว่างหรือความเข้มสีของภาพในเอ็สวีดี ในขณะที่คู่เอกฐานเวกเตอร์แสดงถึงคุณลักษณะทางเรขาคณิตของภาพ ตรงจุดนี้ผู้วิจัยได้ความรู้ในเรื่องคุณสมบัติที่สำคัญของเอ็สวีดี

ในปีถัดมางานวิจัยของ Lin และ Tan (2002) ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนเอ็สวีดีแบบไม่แบ่งบริเวณ (Global-based SVD watermarking) ซึ่งต้องใช้ภาพต้นฉบับในการถอดลายน้ำดิจิทัล กระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัลของวิธีการนี้ เริ่มจากนำภาพต้นฉบับ  $A$  มาแปลงด้วยเอ็สวีดี ทำให้เมทริกซ์  $A$  ถูกแยกออกเป็นสามเมทริกซ์ที่มีขนาดเดียวกับต้นฉบับ เมทริกซ์  $U$ ,  $S$ , และ  $V$  จากนั้นนำลายน้ำดิจิทัล  $W$  มาฝังลงบนเมทริกซ์  $S$  ต่อมาทำการแปลงเมทริกซ์ใหม่  $S + \alpha W$  ด้วยเอ็สวีดีอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะได้เมทริกซ์  $U_w$ ,  $S_w$  และ  $V_w$  สุดท้ายทำการแปลงเอ็สวีดีกลับ  $A_w = U_w S_w V_w^T$  ในกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลของวิธีนี้ต้องใช้ 3 เมทริกซ์ที่เก็บไว้ คือ  $U_w$ ,  $S_w$ ,  $V_w$  เริ่มจากทำการแปลงเอ็สวีดีของภาพที่ต้องการทดสอบ  $A'_w$  จากนั้นทำการถอดลายน้ำดิจิทัลโดยใช้  $(U_w S'_w V_w^T - S) / \alpha$  วิธีการนี้สามารถทนต่อการใส่สัญญาณรบกวน การใส่สัญญาณรบกวนแบบกรองความถี่ต่ำ การบีบอัดภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 5 หมุนภาพไป 30 องศา และการตัดภาพเป็นบางส่วน ผู้วิจัยได้ความรู้ในวิธีการฝังลายน้ำบนเอ็สวีดี

Chandra (2002) นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนเอ็สวีดีไว้ 2 เทคนิคคือ เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนเอ็สวีดีแบบไม่แบ่งบริเวณ และเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนเอ็สวีดีแบบแบ่งบริเวณ (Block-based SVD watermarking) กระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนเอ็สวีดีแบบไม่แบ่งบริเวณจะเริ่มจากนำภาพต้นฉบับ  $A$  และลายน้ำดิจิทัล  $W$  มาแปลงด้วยเอ็สวีดี ผลจากการแปลงดังกล่าวจะได้เมทริกซ์  $U$ ,  $S_a$ ,  $V^T$  และเมทริกซ์  $U_w$ ,  $S_w$ ,  $V_w^T$  ตามลำดับ สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมของ  $S_a$  และ  $S_w$  แสดงด้วย  $\sigma_{a1} = [\sigma_{a1}, \sigma_{a2}, \dots, \sigma_{aN}]$  และ  $\sigma_w = [\sigma_{w1}, \sigma_{w2}, \dots, \sigma_{wN}]$  จากนั้นทำการฝังลายน้ำดิจิทัล

ลงบนค่าเอกฐานของ  $A$  โดยใช้สูตร  $\sigma_{bi} = \sigma_{ai} + \alpha\sigma_{wi}$  เสร็จแล้วแปลงกลับเอสวีตี จะทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ในกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลของวิธีนี้จำเป็นต้องใช้  $S_a$  ของภาพต้นฉบับและต้องใช้  $U_w$  และ  $V_w$  ของลายน้ำดิจิทัล ขั้นแรกนำภาพที่ต้องการทดสอบมาทำการแปลงเอสวีตี แล้วทำการถอดลายน้ำดิจิทัลโดยใช้  $S'_w = (S'_b - S_a)/\alpha$  จากนั้นนำ  $S'_w$  ที่ได้มาแปลงกลับเอสวีตี  $W' = U_w S'_w V_w^T$  ซึ่งจะได้ลายน้ำดิจิทัลกลับคืนมาในวิธีนี้ได้ทำการทดลองภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลกับการกรองความถี่ต่ำขนาด  $3 \times 3$  และการบีบภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 25 และ 10 เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลบนเอสวีตีแบบแบ่งบริเวณ ลายน้ำดิจิทัลจะถูกทำการสลับตำแหน่งจุดภาพแบบสุ่มเทียมด้วยรหัสลับก่อนฝังเพื่อเป็นการเพิ่มความปลอดภัย ขั้นตอนแรกของการฝังลายน้ำดิจิทัลเริ่มจากนำภาพต้นฉบับ  $A_x$  มาแบ่งออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน แล้วนำแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับที่แบ่งไว้มาแปลงเอสวีตี โดยให้  $S_x$  แทนสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมของ  $A_x$  จากนั้นทำการฝังบิตของลายน้ำดิจิทัล  $W_x$  ลงบนค่าเอกฐานมากที่สุดในเมทริกซ์เอส  $\sigma_{a1}^x$  ของแต่ละบริเวณด้วยสูตร  $\sigma_{b1}^x = \sigma_{a1}^x + \alpha W_x$  ขั้นตอนสุดท้ายทำการประกอบแต่ละบริเวณกลับคืนจะทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ สำหรับกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลของวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ภาพต้นฉบับ เริ่มจากนำภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่มาแบ่งออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน  $B'_x$  ต่อจากนั้นทำการแปลงเอสวีตีแต่ละบริเวณของภาพ ภาพที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่  $\sigma_{w_{b1}}^x$  บิตของลายน้ำดิจิทัลสามารถถอดได้ด้วยสูตร  $(\sigma_{w_{b1}}^x - \sigma_{a1}^x)/\alpha$  ซึ่งบิตของลายน้ำดิจิทัลที่ถอดได้ยังคงสลับตำแหน่งอยู่ หลังจากนั้นทำการสลับตำแหน่งจุดภาพของลายน้ำดิจิทัลแบบสุ่มเทียมกลับโดยใช้รหัสลับตัวเดิม ซึ่งจะทำให้ได้ภาพลายน้ำดิจิทัลกลับคืนมา ในวิธีนี้ได้ทำการทดลองภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลกับการกรองความถี่ต่ำขนาด  $3 \times 3$  และการบีบภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 25 และ 10 ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการแบ่งบริเวณมาใช้ในงานวิจัยนี้

Chang, Hu และ Lin (2007) ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลบนเอสวีตีแบบแบ่งบริเวณที่ไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับในการถอดลายน้ำดิจิทัล เริ่มด้วยการแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน จากนั้นนำแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับที่แบ่งไว้มาแปลงเอสวีตี ขั้นต่อมาเป็นการเลือกตำแหน่งบริเวณที่ต้องการจะฝังลายน้ำดิจิทัล โดยใช้วิธีราบินส์ (Rabin's scheme) เมื่อได้ตำแหน่งที่ฝังแล้วจะทำการฝังแต่ละบิตของลายน้ำดิจิทัลลงบนตำแหน่งบริเวณที่แตกต่างกันถึง 3 ครั้ง เพื่อเป็นการเพิ่มความคงทนของลายน้ำดิจิทัลให้สูงขึ้น เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลของวิธีนี้จะใช้การปรับแต่งค่าเอกฐานในตำแหน่งแถวที่สองและแถวที่สามของเมทริกซ์เอสเท่านั้น ด้วยสมการ  $\sigma_2 = \sigma_2 + \delta \times W_i$  ส่วนกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลสามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ ขั้นแรกทำการแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน จากนั้นนำแต่ละบริเวณที่แบ่งไว้มาแปลงเอสวีตี ต่อมานำตำแหน่งบริเวณเดียวกันที่ถูกเลือกไว้ในตอนฝังลายน้ำมาทำการถอดลายน้ำดิจิทัล ซึ่งหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างค่าเอกฐานในตำแหน่งแถวที่สองและแถวที่สามของเมทริกซ์เอส

โดยใช้สมการ  $\sigma w_2 - \sigma w_3 > \delta/2$  ถ้าผลลัพธ์ที่ได้ตรงตามเงื่อนไขจะถอดได้ค่า "1" ออกมา ถ้าไม่ตรงเงื่อนไขจะมีค่าเท่ากับ "0" สุดท้ายนำแต่ละค่าที่ได้มาประกอบกันเป็นภาพลายน้ำดิจิทัลกลับคืนมา ซึ่งภาพผลลัพธ์ที่ได้สามารถทนต่อการบีบอัดภาพแบบ JPEG การเจือปนภาพ การปรับภาพ การตัดภาพเป็นบางส่วน และการใส่สัญญาณรบกวนได้ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถถอดลายน้ำดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงเนื่องจากการจัดเก็บ และช่วยลดเวลาที่ใช้จำเป็นต้องใช้ในการค้นหาภาพต้นฉบับลง ข้อเสียอยู่ที่ความคงทนต่อการถูกโจมตียังมีน้อย

ถัดมาในปีเดียวกัน Chang, Lin และ Hu (2007) ได้นำเสนองานวิจัยซึ่งขยายต่อจากงานวิจัยเดิม โดยทำการปรับปรุงเฉพาะกระบวนการฝังลายน้ำดิจิทัลใหม่จากวิธีการเดิม ที่ฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้การปรับแต่งค่าเอกฐานในตำแหน่งแถวที่สองและแถวที่สามของเมทริกซ์เอส วิธีการใหม่นี้จะฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้การปรับแต่งค่าเอกฐานในตำแหน่งแถวที่สองและแถวที่สี่ของเมทริกซ์เอส ซึ่งได้เพิ่มผลการทดลองการบีบอัดภาพแบบ JPEG โดยกำหนดระดับคุณภาพที่ 90, 80 และ 70 ปรากฏว่าลายน้ำดิจิทัลที่ถอดได้ยังคงมีค่า BCR (Bit correction ratio) เฉลี่ยสูงถึง 90 ข้อดีของวิธีนี้คือลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาได้มีความคงทนต่อการการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG มากขึ้น ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือความคงทนต่อการถูกโจมตียังคงน้อยถ้าเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ได้แนะนำการฝังลายน้ำลงในตำแหน่งแถวอื่นของเมทริกซ์เอส ซึ่งแตกต่างจากวิธีอื่นๆทั่วไปที่แนะนำฝังลายน้ำลงในตำแหน่งแถวที่หนึ่งของเมทริกซ์เอสเท่านั้น ทำให้ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการเลือกตำแหน่งในการฝังลายน้ำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยของ Xiaohu และ Xiaofeng (2008) ได้นำเสนอเทคนิค การฝังลายน้ำดิจิทัลบนเอสวีดีแบบแบ่งบริเวณ ลายน้ำดิจิทัลที่ใช้เป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale watermark) เริ่มจากการนำลายน้ำมาทำการเข้ารหัสลับด้วยวิธีการอาร์โนดชาออสต์ (Arnold chaos) จากนั้นทำการแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน นำแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับที่แบ่งไว้มาแปลงเอสวีดี จากนั้นทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนค่าเอกฐานในตำแหน่งแถวที่หนึ่งของเมทริกซ์เอสโดยใช้การควอนไทซ์เซชัน เสร็จแล้วแปลงกลับ เอสวีดีจะทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ ผลการทดลองของวิธีการนี้พบว่าลายน้ำสามารถทนต่อการบีบอัดภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 70 การย่อขนาดภาพ การหมุนภาพ การตัดภาพเป็นบางส่วน และการใส่สัญญาณรบกวน ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถถอดลายน้ำดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับและใช้ลายน้ำดิจิทัลเป็นภาพระดับสีเทา ซึ่งใส่ข้อมูลได้มากกว่าภาพโบราณิเดิม ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยการควอนไทซ์เซชันมาใช้ในงานวิจัยนี้

## 2) อัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัลบนค่าเอกฐานเวกเตอร์ซ้ายหรือขวา

Chang และคณะ (2007) ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลบนค่าเอกฐานเวกเตอร์ซ้ายหรือขวาที่ได้จากการแปลงเอสวีดี (สัจพจน์ของเมทริกซ์  $U$  และ  $V$ ) ขั้นตอนการฝังลายน้ำเริ่มจากการแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลของวิธีนี้จะใช้การปรับแต่งค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าในตำแหน่งแถวที่สองและแถวที่สามของเมทริกซ์ยู อัลกอริทึมของวิธีการนี้ทนทานต่อการโจมตีแบบต่างๆ ในกระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลจะไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ

## 3) อัลกอริทึมการฝังลายน้ำดิจิทัลบนค่าเอกฐานเวกเตอร์ซ้ายหรือขวาและค่าเอกฐาน

Chandra และ Srinivas (2008) ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลบนเอสวีดีแบบแบ่งบริเวณที่ไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับในการถอดลายน้ำดิจิทัล เริ่มด้วยการแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็น 4 ส่วน จากนั้นเลือกส่วนซ้าย-บน และขวา-ล่างมาทำการแบ่งบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นนำแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับที่แบ่งไว้มาแปลงเอสวีดี การฝังลายน้ำของวิธีการนี้จะทำการฝังลายน้ำดิจิทัล 2 ครั้ง โดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกัน เทคนิคแรกจะฝังลายน้ำลงบนค่าเฉลี่ยของเมทริกซ์เอสในบริเวณที่ได้จากแปลงเอสวีดีในตำแหน่งซ้าย-บน โดยใช้ตารางควอนไทซ์เซชัน เทคนิคที่สองจะฝังลายน้ำลงบนค่าเฉลี่ยของเมทริกซ์เอส ในบริเวณที่ได้จากแปลงเอสวีดีในตำแหน่งขวา-ล่าง โดยใช้การปรับแต่งค่าในตำแหน่งแถวที่หนึ่งและแถวที่สองของเมทริกซ์ยู ในขั้นตอนการถอดลายน้ำดิจิทัลจำเป็นต้องใช้ตารางควอนไทซ์เซชัน ซึ่งลายน้ำที่ถอดได้สามารถทนต่อการบีบอัดภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 70 การหมุนภาพไป 20 องศา การย่อขนาดภาพ 50% การกรองสัญญาณขนาด  $3 \times 3$  การตัดภาพเป็นบางส่วน และการใส่สัญญาณรบกวนที่ระดับ 0.01 ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถถอดลายน้ำดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงเนื่องจากการจัดเก็บและช่วยลดเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหาภาพต้นฉบับลง ข้อเสียอยู่ที่การไม่ได้ฝังลายน้ำดิจิทัลทั่วทั้งภาพ เพราะในงานวิจัยนี้เลือกฝังเพียงบนบริเวณซ้าย-บน และขวา-ล่างของภาพเท่านั้น ทำให้เสี่ยงต่อการโดนโจมตีแบบเจาะจงในบริเวณที่ฝังอยู่ได้โดยง่าย

### ข. จำแนกตามวัตถุประสงค์การใช้ลายน้ำดิจิทัล

ในงานวิจัยของ Kang และคณะ (2003) ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลบนทรานฟอร์มผสมระหว่างเวฟเล็ตกับฟูเรียร์ (Discrete wavelet transform-discrete Fourier transform) ซึ่งไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับในการถอดลายน้ำดิจิทัล การฝังลายน้ำของวิธีนี้จะทำการ

ฝังลายน้ำดิจิทัล 2 ครั้ง ครั้งแรกจะทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนค่าสัมประสิทธิ์กลางของฟูเรียร์โดเมนเพื่อสร้างแกนอ้างอิง (Template) ในการคำนวณตำแหน่งที่ถูกเคลื่อนย้ายไปให้กลับมาสู่ตำแหน่งเดิม ครั้งที่สองจะทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบนค่าสัมประสิทธิ์ความถี่ต่ำระดับชั้นการแปลงที่ 4 (LL subband) ของเวฟเล็ตโดเมน ในขั้นตอนการถอดลายน้ำจะเริ่มจากการตรวจสอบภาพผลลัพธ์ที่มีลายน้ำฝังอยู่ว่ามีตำแหน่งตรงกับแกนอ้างอิงหรือไม่ ถ้าไม่ตรงจะถูกเคลื่อนย้ายกลับมาสู่ตำแหน่งเดิมก่อน จากนั้นจะทำการถอดลายน้ำที่ถูกฝังอยู่ในเวฟเล็ตออกมา ผลการทดลองพบว่าลายน้ำสามารถทนต่อการบีบอัดภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 10 ถึง 100 การย่อขนาดภาพ การหมุนภาพ การเคลื่อนย้ายภาพ การตัดภาพเป็นบางส่วน 25% การกรองสัญญาณ ขนาด 3x3 การตัดภาพเป็นบางส่วน และการใส่สัญญาณรบกวน ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถถอดลายน้ำดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับและมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆสูง ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยการควอนไทซ์เซชันมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้

ในงานวิจัยของ Lu และคณะ (2006) ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลบนรูปภาพโดยใช้มัลติเวกเตอร์ควอนไทซ์เซชัน (Multistage vector quantization) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องและคุ้มครองลิขสิทธิ์ได้ วิธีการที่นำเสนอนี้จะฝังลายน้ำแบบคงทนและแบบเปราะบางบนขั้นตอนของเวกเตอร์ควอนไทซ์เซชันที่ต่างกัน ในขั้นตอนแรกลายน้ำแบบคงทนจะถูกฝังลงไปบนเวกเตอร์ควอนไทซ์เซชันก่อนด้วยเทคนิคอินเด็กซ์พรอพเพอร์ตี้ (Index properties) จากนั้นในขั้นตอนที่สองลายน้ำแบบเปราะบางจะฝังลงบนเวกเตอร์ควอนไทซ์เซชันอีกครั้งโดยใช้เทคนิคซิมเปิ้ลอินเด็กซ์คอนสเตรินด์ (Simple index constrained) ในการถอดลายน้ำดิจิทัลของวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ภาพต้นฉบับ ลายน้ำแบบคงทนที่ถอดได้สามารถทนต่อการบีบอัดภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 30 ถึง 100 การตัดภาพเป็นบางส่วน 25% การกรองสัญญาณขนาด 3x3 การปรับความสว่าง และการหมุนภาพ ส่วนลายน้ำแบบเปราะบางที่ถอดได้สามารถทนต่อการบีบอัดภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพ 50 ถึง 100 และการตัดภาพเป็นบางส่วน 25% ได้ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถถอดลายน้ำดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับและมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆสูง ข้อด้อยตรงที่วัดได้จากวิธีการฝังนี้ค่า PSNR ต่ำ ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลนี้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้