บทที่ 2

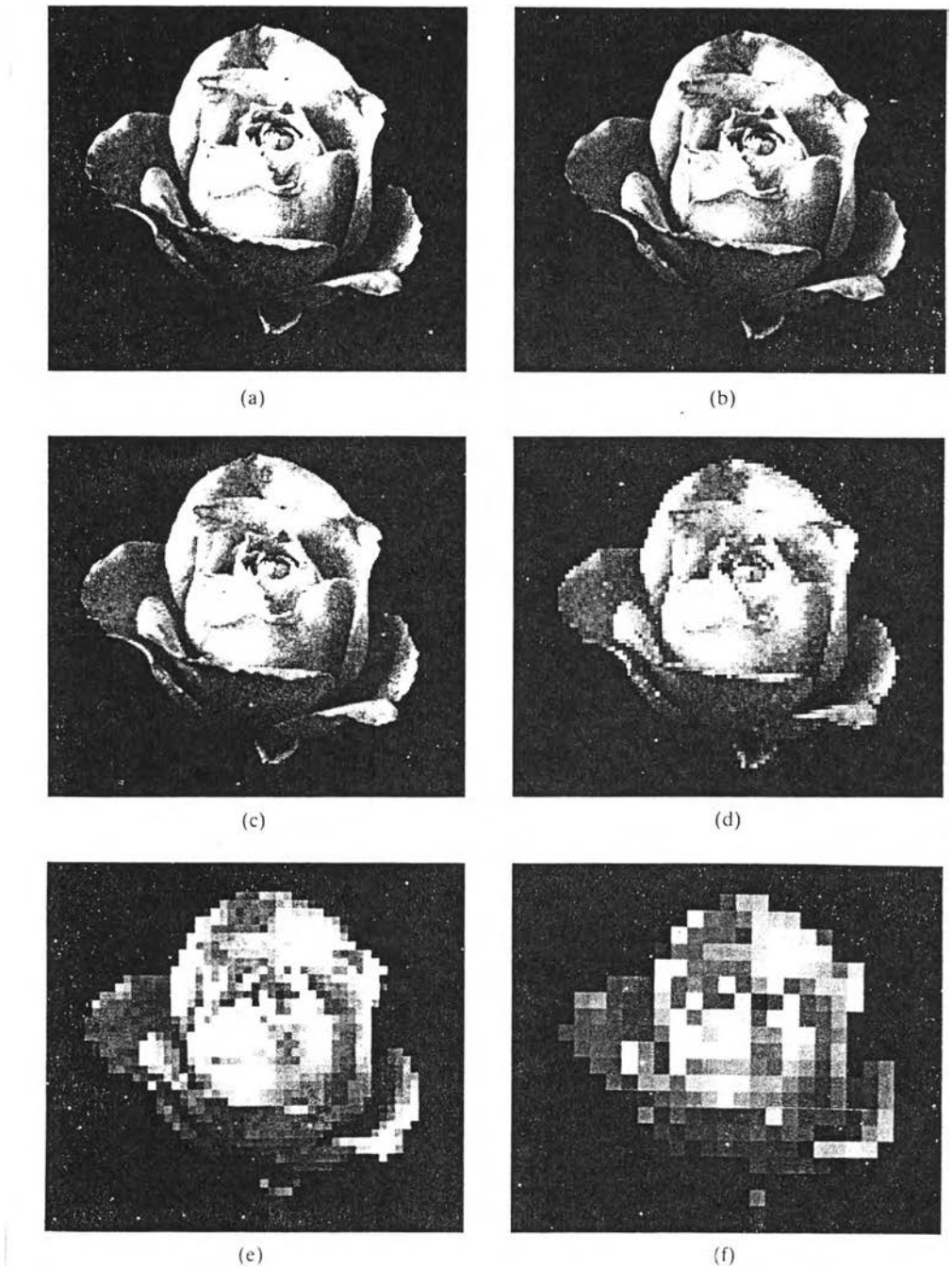
เทคนิคในการปรับปรุงภาพดิจิตอล

ภาพดิจิตอล (Digital Image)

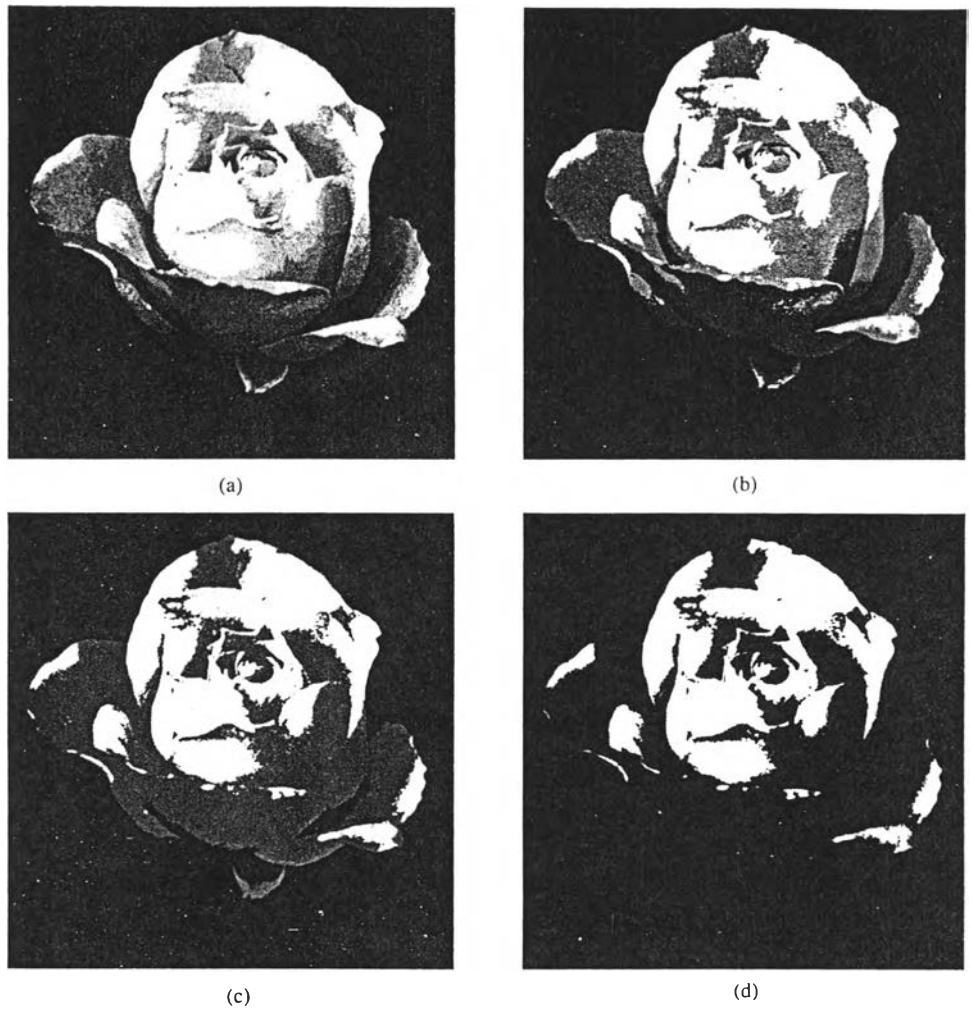
ก่อนที่จะใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยจัดการภาพ จะต้องมีการเปลี่ยนข้อมูลภาพที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความเข้มแสงที่ต่อเนื่อง (image function f(x,y)) ให้เป็นข้อมูลภาพที่เป็นตัวเลขจำนวนนับที่ไม่มีความต่อเนื่องกันชุดหนึ่งเสียก่อน โดยใช้แนวความคิดในการจัดตัวเลขชุดนี้ให้อยู่ในรูปแบบของค่าตัวเลขที่เป็นตัวแทนกลุ่ม ซึ่งจัดเป็นแถวลำดับ (array) หรือแมทริกซ์ (matrix) ที่มีระยะห่างเท่าๆกัน โดยมีแถว (row) และคอลัมน์ (column) เป็นตัวบ่งชี้ตำแหน่งของจุดที่อยู่ในภาพ ส่วนสมาชิก (element) ของแมทริกซ์จะถูกเรียกว่า สมาชิกของภาพ (image element หรือ picture element) หรือใช้ตัวย่อว่า พิกเซล (pixel) หรือ เพล (pel) โดยที่ค่าของพิกเซลจะเป็นตัวเลขจำนวนนับซึ่งเป็นค่าระดับความเทา (gray level) ของจุดที่อยู่ตรงตำแหน่งนั้น ภาพที่ได้นี้จะถูกเรียกว่า ภาพดิจิตอล (Digital Image) และพิกเซลก็คือจุดแต่ละจุดในภาพดิจิตอลนั้น

การดิจิไทซ์ข้อมูล (digitization) หรือการเก็บค่าของสัญญาณ โดยกำหนดระยะพิกัดของจุดในภาพนี้จะเรียกว่า การสุ่มตัวอย่างข้อมูลภาพ (image sampling) ซึ่งจะเป็นการแทนค่าความเข้มแสงของภาพต่อเนื่อง f(x,y) โดยประมาณด้วยแถวลำดับขนาด M x N (M และ N เป็นตัวเลขจำนวนเต็มใดๆ ที่มีค่ามากกว่า 0) และค่าความเข้มที่ใช้ในการแทนค่าโดยประมาณนั้นจะเป็นค่าระดับความเทาที่ได้มาจากการแบ่งค่าความเข้มแสงของรูปภาพ f(x,y) ออกเป็นช่วงๆ ซึ่งเรียกว่า การแบ่งช่วงของระดับความเทา (gray level quantization) (Gonzalez and Woods, 1992) โดยที่ค่าระดับความเทาที่ใช้ในการแทนค่านั้นอาจใช้ตัวเลขที่เป็นจำนวนนับของช่วงระยะที่ถูกแบ่ง ดังนั้นค่าระดับความเทาของตัวอย่างข้อมูล (sample) จึงถูกกำหนดด้วยตัวเลขที่แทนระดับใดระดับหนึ่งซึ่งเป็นตัวเลขจำนวนนับของช่วงระยะที่ถูกแบ่งออกไป ช่วงระยะของค่าระดับความเทาทั้งหมดที่ได้นี้จะเรียกว่า เกรย์สเกล (gray scale)

ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลภาพและการแบ่งช่วงระดับความเทานั้น จะต้องกำหนดระยะพิกัดระหว่างตัวอย่างข้อมูลและช่วงระยะที่ถูกแบ่งออกเป็นช่วงๆของค่าความเข้มแสงของตัวอย่างข้อมูลให้พอเหมาะจึงจะได้ภาพที่ดีและเหมาะสม แต่การที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ให้เหมาะสมทำได้ยาก เนื่องจากคุณภาพของภาพดิจิตอลที่ต้องการจะมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของการใช้งาน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลก็อาจมีข้อจำกัด



ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของการสุ่มตัวอย่างข้อมูลภาพที่ทำให้เกิดลักษณะของตารางหมากรุก
(a)-(f) จำนวนพิกเซลของข้อมูลภาพเป็น 1024x1024, 512x512, 256x256, 128x128, 64x64, 32x32 ตามลำดับ
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 35)



ภาพที่ 2 แสดงลักษณะของการแบ่งช่วงระดับความเทาในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลภาพที่ทำให้เกิดเส้นเงาที่ไม่ถูกต้อง (a)-(d) จำนวนช่วงระดับความเทาของข้อมูลภาพเป็น 16, 8, 4, 2 ตามลำดับ (ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 37)

นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงความเหมาะสมระหว่างมูลค่าของการจัดการข้อมูลและการบิดเบือนข้อมูลด้วย เพราะถ้าเราสุ่มตัวอย่างข้อมูลภาพโดยกำหนดให้มีความละเอียด (resolution) ในการสุ่มตัวอย่างและการแบ่งช่วงระดับความเทาสูงมาก ก็จะต้องมีการเก็บข้อมูลจำนวนมากทำให้ต้องใช้หน่วยความจำและใช้เวลาในการทำงานมาก แต่ถ้ากำหนดให้ความละเอียดในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลและการแบ่งช่วงระดับความเทาน้อยเกินไปก็อาจจะทำให้ภาพดิจิตอลที่ได้มีลักษณะไม่ตรงตามความต้องการ ดังภาพที่ 1 และ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้ากำหนดให้ความละเอียด

ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลภาพน้อยเกินไป จะทำให้เกิดลักษณะของตารางหมากรุกขึ้นในภาพดิจิตอล และถ้ากำหนดให้การแบ่งช่วงระดับความเทามีจำนวนน้อยเกินไปคือ แต่ละช่วงของค่าระดับความเทามีระยะกว้างมากเกินไป ก็อาจจะทำให้เกิดเส้นเงาที่ไม่ถูกต้อง (false contour) ขึ้นในภาพดิจิตอลนั้น และนอกจากนั้น ในการกราดตรวจภาพก็อาจมีสัญญาณรบกวนปะปนมาด้วย ดังนั้นภาพดิจิตอลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างจึงมักจะต้องถูกนำมาปรับปรุงก่อนที่จะนำไปใช้งานเสมอ

การปรับปรุงภาพดิจิตอล (Digital Image Enhancement)
(Gonzalez and Wintz, 1977; Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990)

การปรับปรุงภาพดิจิตอล เป็นการปรับปรุงคุณภาพของภาพดิจิตอล ให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับความต้องการหรือวัตถุประสงค์ของการใช้งานโดยเฉพาะ โดยการเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสม ซึ่งทำให้เกิดภาพดิจิตอลในลักษณะที่ต้องการเพื่อให้ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะการปรับปรุงภาพในลักษณะหนึ่งอาจจะเหมาะสมสำหรับงานประเภทหนึ่ง แต่อาจใช้งานได้ไม่ดีนักสำหรับงานอีกประเภทหนึ่ง (Lim, 1990)

เทคนิคในการปรับปรุงภาพดิจิตอล มีวิธีการต่างๆมากมาย ซึ่งอาจจะเป็นเทคนิคที่ใช้ในโดเมนของเวลา (time domain methods หรือ spatial domain methods) หรืออาจจะเป็นเทคนิคที่ใช้ในโดเมนของความถี่ของสัญญาณ (frequency domain methods) ก็ได้

เทคนิคที่ใช้ในโดเมนของเวลา จะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาของพิกเซลในภาพดิจิตอลโดยตรง ซึ่งอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปของ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$g(x,y) = T[f(x,y)] \qquad (1)$$

โดยที่ $f(x,y)$ เป็นภาพเดิม

$g(x,y)$ เป็นภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว

และ $T[\ ]$ เป็นโอเปอเรเตอร์(operator) ที่กระทำต่อภาพดิจิตอล โดยถูกกำหนดให้กระทำบนบริเวณใกล้เคียง (neighborhood) ของพิกเซล (x,y) บริเวณหนึ่ง

วิธีที่ใช้ในการกำหนดบริเวณใกล้เคียงของพิกเซล (x,y) ก็ใช้บริเวณที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีพิกเซล (x,y) อยู่ตรงกลาง เราสามารถกำหนดบริเวณใกล้เคียงนี้ให้เป็นลักษณะอื่นๆ เช่น วงกลมหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้เช่นกัน แต่มักจะนิยมใช้สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเป็นเลขคี่หรือมีจำนวนพิกเซลเป็นจำนวนเลขคี่มากกว่า เพื่อจะได้ง่ายต่อการคำนวณและทำให้พิกเซล (x,y) อยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของบริเวณใกล้เคียงพอดี

ถ้าเรากำหนดให้บริเวณใกล้เคียงมีขนาดเป็น 1 x 1 แล้ว จะทำให้ค่าของ g(x,y) มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของ f(x,y) เท่านั้น ทำให้โอเปอเรเตอร์ T มีลักษณะเป็นฟังก์ชันในการแปลงค่าระดับความเทา (gray-level transformation function) หรือฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงค่า (mapping function) เทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงภาพแบบนี้ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การประมวลผลภาพด้วยจุดในภาพ (point processing) เพราะการปรับปรุงค่าระดับความเทาของพิกเซลใดๆในภาพขึ้นอยู่กับค่าระดับความเทาเดิมที่พิกเซลนั้นเท่านั้น แต่ถ้ามีการกำหนดบริเวณใกล้เคียงของพิกเซลให้มีขนาดใหญ่กว่า 1 x 1 เราจะเรียกการปรับปรุงภาพแบบนี้ว่า การประมวลผลภาพด้วยแมสก์ (mask processing) หรือ การกรองสัญญาณ (filtering) เพราะเป็นเทคนิคที่ต้องมีการใช้ตัวกรองสัญญาณ (filter) หรือวินโดว์ (window) หรือแมสก์ (mask หรือ template) ในการคำนวณหาค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล โดยตัวกรองสัญญาณนี้จะเป็นตัวกรองสัญญาณแบบเชิงเส้น (linear filter) ที่มีลักษณะเป็นแถวลำดับที่มีขนาดเท่ากับบริเวณใกล้เคียงที่กำหนด ซึ่งจะถูกเลื่อนไปตามพิกเซลต่างๆของภาพจนครบทั้งภาพ และทำให้เกิดค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล (x,y) ที่อยู่ตรงกับตำแหน่งศูนย์กลางของตัวกรองสัญญาณที่เลื่อนไปถึง โดยที่ค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล (x,y) หาได้จากผลรวมของผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณกับค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงของพิกเซล (x,y) ในตำแหน่งที่ตรงกัน (Gonzalez and Woods, 1992) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณนี้จะเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างพิกเซล (x,y) กับพิกเซลอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง หรือเราอาจจะเขียนการคำนวณหาค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซลในภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว g(x,y) ให้อยู่ในรูปของการคอนโวลูชั่น (convolution) ของภาพเดิม f(x,y) กับตัวกรองสัญญาณ h(x,y) ได้ดังนี้ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \qquad (2)$$

โดยที่ * หมายถึงการคอนโวลูชั่น ซึ่งเป็นการหาค่าผลรวมของผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณกับค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงในตำแหน่งที่ตรงกันกับที่ตัวกรองสัญญาณนั้นเลื่อนไปถึง และทำให้เกิดค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซลที่อยู่ในรูปของ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$R = w_1 r_1 + w_2 r_2 + \ldots + w_n r_n$$

$$= \sum_{i=1}^{n} w_i r_i \qquad (3)$$

โดยที่ R เป็นค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล

n เป็นขนาดของตัวกรองสัญญาณ หรือ จำนวนพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงรวมทั้งพิกเซล (x,y)

w_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ i ของตัวกรองสัญญาณ

r_i เป็นค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในตำแหน่งตรงกันกับสัมประสิทธิ์ตัวที่ i ของตัวกรองสัญญาณ

การปรับปรุงภาพโดยใช้เทคนิคต่างๆในโดเมนของเวลานี้ นอกจากจะใช้ตัวกรองสัญญาณที่เป็นแบบเชิงเส้นแล้ว ยังสามารถใช้ตัวกรองสัญญาณที่ไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้น (nonlinear filter) ในการปรับปรุงภาพโดยกำหนดให้กระทำบนบริเวณใกล้เคียงในลักษณะเช่นเดียวกันได้ ซึ่งการปรับปรุงภาพแบบนี้จะไม่มีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณในการคำนวณหาค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล แต่จะใช้ค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงในการพิจารณา เพื่อหาค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซลเท่านั้น

ส่วนเทคนิคที่ใช้ในโดเมนของความถี่จะต้องคำนวณหาค่าของการทรานสฟอร์มแบบฟูเรียร์ (Fourier transform) ของภาพดิจิตอลนั้นเสียก่อน แล้วทำการปรับปรุงภาพโดยเปลี่ยนแปลงค่าของฟูเรียร์ทรานสฟอร์มเหล่านั้น แล้วจึงทำการทรานสฟอร์มแบบผันกลับ (inverse Fourier transform) เพื่อให้ได้ภาพดิจิตอลที่ถูกปรับปรุงแล้ว การคำนวณหาฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพนี้จะเป็นการหาความถี่ของการเกิดสัญญาณข้อมูลภาพที่มีค่าระดับความเทาต่างๆที่เกิดขึ้นในภาพ ซึ่งการปรับปรุงภาพในลักษณะเช่นนี้มาจากแนวความคิดที่ว่า ภาพที่มีขอบและรายละเอียดที่คม (sharp) มักจะทำให้เกิดค่าในส่วนประกอบที่มีความถี่สูงในฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพ และภาพที่มีลักษณะพร่ามัว (blur) ก็มักจะทำให้เกิดค่าในส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำในฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพ ดังนั้น ถ้าตัดเอาส่วนประกอบที่มีความถี่สูงออกไปให้เหลือแต่ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำไว้ก็จะทำให้ภาพนั้นมีลักษณะที่พร่ามัวลงได้ และเช่นเดียวกัน ถ้าตัดเอาส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำในฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพที่พร่ามัวออกไปให้เหลือแต่ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงไว้ก็จะทำให้ภาพนั้นมีลักษณะที่คมมากขึ้น หรือได้ภาพที่เห็นขอบของวัตถุชัดมากขึ้น (Gonzalez and Woods , 1992) ซึ่งสามารถเขียนฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว G(u,v) ให้อยู่ในรูปของการคูณกันระหว่างฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพเดิม F(u,v) กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function) H(u,v) ซึ่งถูกใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าของส่วนประกอบที่มีความถี่ต่างๆได้ดังนี้ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) \qquad (4)$$

เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคทั้งสองแบบได้ โดยใช้หลักการจากทฤษฎีของการคอนโวลูชั่น โดยกำหนดให้ภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว g(x,y) เป็นผลลัพธ์ที่ได้มาจากการคอนโวลูท (convolute) ภาพเดิม f(x,y) กับโอเปอเรเตอร์ h(x,y) (จากสมการ (2))

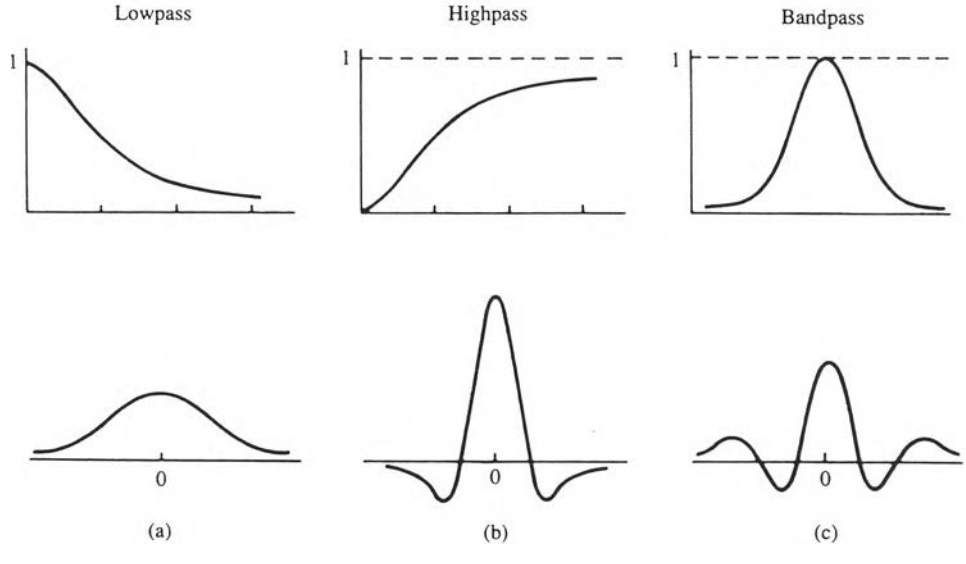
$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \qquad (5)$$

ถ้า h(x,y) เป็นโอเปอเรเตอร์ที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นแล้ว จะได้ว่า ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพที่ถูกปรับปรุงแล้วจะมีค่าเท่ากับผลคูณของฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพเดิมกับฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของโอเปอเรเตอร์ตัวนั้น ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ (จากสมการ (4))

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) \qquad (6)$$

โดยที่ H(u,v) ซึ่งเป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ จะเป็นฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของโอเปอเรเตอร์ h(x,y) และโอเปอเรเตอร์ h(x,y) ซึ่งเป็นฟูเรียร์ทรานสฟอร์มแบบผันกลับของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ H(u,v) จะถูกเรียกว่า อิมพัลส์เรสพอนส์ (impulse response) ของระบบ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$h(x,y) = F^{-1}[H(u,v)] \qquad (7)$$



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของตัวกรองสัญญาณทั้งในโดเมนของความถี่ และในโดเมนของเวลา

(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 190)

จากทฤษฎีของการคอนโวลูชั่นภาพดิจิตอลขนาด 2 มิติด้วยตัวกรองสัญญาณ เราสามารถเขียนโอเปอเรเตอร์นี้ให้อยู่ในรูปของตัวกรองสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าของพิกเซลในโดเมนของเวลาได้ (ภาพที่ 3) ดังนั้น จึงเรียกโอเปอเรเตอร์นี้ได้อีกอย่างหนึ่งว่า ตัวกรองสัญญาณในโดเมนของเวลา (spatial convolution mask หรือ spatial filter) (Gonzalez and Woods, 1992)

นอกจากจะใช้การปรับปรุงภาพด้วยเทคนิคแต่ละแบบแล้ว ยังอาจใช้การผสมผสานกันระหว่างเทคนิคทั้ง 2 แบบได้เช่นกัน ซึ่งเทคนิคหรือวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงภาพดิจิตอล อาจแบ่งออกตามลักษณะของการปรับปรุงได้ 3 ลักษณะดังนี้ คือ

1. <u>การดัดแปลงแก้ไขเกรย์สเกล</u> (Gray Scale Modification)
(Rosenfeld and Kak, 1982)

การปรับปรุงภาพดิจิตอลในลักษณะนี้ จะเป็นการปรับปรุงภาพที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเกรย์สเกล (gray scale หรือ ช่วงระยะของระดับความเทาทั้งหมด) ของภาพ ซึ่งมักจะเป็นการปรับปรุงภาพที่ง่าย และมีประสิทธิภาพ การปรับปรุงในลักษณะนี้จะมีด้วยกัน 2 แบบ คือ

1.1 <u>การแก้ไขระดับความเทา</u> (Gray Level Correction)
(Rosenfeld and Kak, 1982)

ในการบันทึกภาพ แสงที่ตกกระทบกับฉากหรือวัตถุแล้วสะท้อนกลับไปยังหน้ากล้องอาจมีค่าไม่คงที่เนื่องจากระ To print correctly with the current printer, either change the ข้มผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง เราสามารถทำการปรับปรุงภาพได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาของแต่ละพิกเซลในภาพดิจิตอล เพื่อเป็นการชดเชยให้กับค่าระดับความเข้มที่ผิดเพี้ยนไปของภาพ

ถ้าสมมติให้ภาพที่บันทึกได้อยู่ในรูปของสมการ (Rosenfeld and Kak, 1982)

$$g(x,y) = e(x,y)\, f(x,y) \qquad (8)$$

โดยที่ f(x,y) เป็นค่าระดับความเทาในอุดมคติที่ควรจะเกิดขึ้นที่พิกเซล (x,y) ของภาพดิจิตอล
g(x,y) เป็นค่าระดับความเทาที่เกิดขึ้นจริงที่พิกเซลนั้น
e(x,y) เป็นฟังก์ชันที่ทำให้ค่าระดับความเทาของภาพผิดเพี้ยนไป

ดังนั้น ถ้าสามารถหาฟังก์ชัน e(x,y) ได้ก็สามารถจะแก้ไขภาพให้มีค่าระดับความเทาที่ถูกต้องได้ การหาฟังก์ชัน e(x,y) นั้นอาจหาได้จากการบันทึกภาพของพื้นผิวที่มีค่าความเข้มคงที่ค่าหนึ่ง (แทนด้วย c) ทำให้ได้ภาพ g_c (x,y) ที่เกิดจากการบันทึกภาพของพื้นผิวที่มีค่าความเข้มคงที่นั้น ดังสมการ (Rosenfeld and Kak, 1982)

$$\begin{aligned} g_c &= c\left[e(x,y)\right] \\ e(x,y) &= \frac{g_c(x,y)}{c} \end{aligned} \tag{9}$$

ดังนั้น จะสามารถแก้ไขภาพได้โดยการแทนค่าลงในสมการ (8) ดังนี้

$$f(x,y) = \frac{g(x,y)}{e(x,y)} = c\frac{g(x,y)}{g_c(x,y)} \tag{10}$$

แต่ค่าระดับความเทาค่าใหม่ที่ได้นี้ อาจจะกลายเป็นค่าที่อยู่ภายนอกช่วงระยะเกรย์สเกลที่สามารถใช้งานได้ซึ่งถูกจำกัดด้วยช่วงระยะเกรย์สเกลของอุปกรณ์แสดงภาพ จึงต้องเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลให้อยู่ในขอบเขตที่ใช้ได้ โดยเปลี่ยนค่าระดับความเทาที่เกินออกไปจากค่าขีดจำกัดให้กลายเป็นค่าระดับความเทาที่น้อยที่สุดหรือมากที่สุดของขอบเขตที่ใช้งานได้ หรืออาจจะใช้วิธีลดค่าหรือเลื่อนค่าระดับความเทาที่ได้ จนกระทั่งค่านั้นอยู่ในขอบเขตที่ใช้งานได้

1.2 <u>การแปลงค่าเกรย์สเกล</u> (Gray Scale Transformation)
(Rosenfeld and Kak, 1982)

การปรับปรุงภาพแบบนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลของภาพด้วยวิธีอย่างเดียวกันตลอดทั้งภาพ หรือ เฉพาะบางส่วนของภาพ เพื่อเพิ่มความแตกต่างของค่าระดับความเทา (contrast หรือลักษณะที่แตกต่างกันของค่าความเข้มแสงในภาพ เช่น ขาวกับดำ) ให้มากขึ้น ซึ่งสามารถทำให้มองเห็นรายละเอียดต่างๆในภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น มีวิธีทำได้หลายวิธี คือ

1.2.1 การปรับความแตกต่างของค่าระดับความเทา (Contrast Manipulation)
(Gonzalez and Woods, 1992; Lindley, 1991; Pratt, 1978; Rosenfeld and Kak, 1982)

ความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพจะมีลักษณะเป็นเช่นไรขึ้นอยู่กับการกระจายของค่าความเข้มในภาพนั้น ความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพอาจแบ่งเป็น

3 ลักษณะด้วยกัน คือ แบบแรกเป็นภาพที่มีความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพต่ำ (low-contrast image) มักจะมีค่าระดับความเทาอยู่ในช่วงแคบๆช่วงใดช่วงหนึ่งของเกรย์สเกล ซึ่งจะทำให้ภาพนั้นมืดเกินไปหรือสว่างเกินไป แบบที่สองเป็นภาพที่มีความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพเหมาะสม (good-contrast image) จะมีค่าระดับความเทาอยู่ในช่วงเกรย์สเกลตลอดทั้งช่วง และจำนวนจุดที่มีค่าระดับความเทาแต่ละค่าจะมีจำนวนที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้เกิดภาพที่สามารถมองเห็นรายละเอียดต่างๆในภาพได้ชัดเจน และแบบสุดท้ายเป็นภาพที่มีความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพสูง (high-contrast image) ซึ่งจะมีค่าระดับความเทาอยู่ในช่วงเกรย์สเกลตลอดทั้งช่วงเช่นเดียวกันกับแบบที่สอง แต่จุดในภาพส่วนใหญ่มักจะอยู่ในช่วงเกรย์สเกลที่มีค่าระดับความเทาต่ำหรือค่าระดับความเทาสูงเท่านั้น จึงทำให้เกิดเป็นบริเวณของจุดที่มีค่าระดับความเทาช่วงระยะสั้นๆ เช่นบริเวณของจุดที่มีค่าระดับความเทาต่ำ และบริเวณของจุดที่มีค่าระดับความเทาสูงเป็นกลุ่ม ตัวอย่างของภาพในลักษณะเช่นนี้ ได้แก่ ภาพของวัตถุที่มืดบนฉากหลัง (background) ที่มีความสว่างมากๆ เป็นต้น

การปรับปรุงภาพแบบนี้จะเป็นการปรับค่าความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพ ซึ่งมักจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลที่ใช้กับภาพที่มีความแตกต่างของค่าระดับความเทาต่ำ โดยการใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ที่เป็นการแปลงค่า (mapping) จากค่าระดับความเทาค่าหนึ่งไปเป็นค่าระดับความเทาอีกค่าหนึ่ง ซึ่งสมมติให้อยู่ในรูปของ (Rosenfeld and Kak, 1982)

$$s = T(r) \tag{11}$$

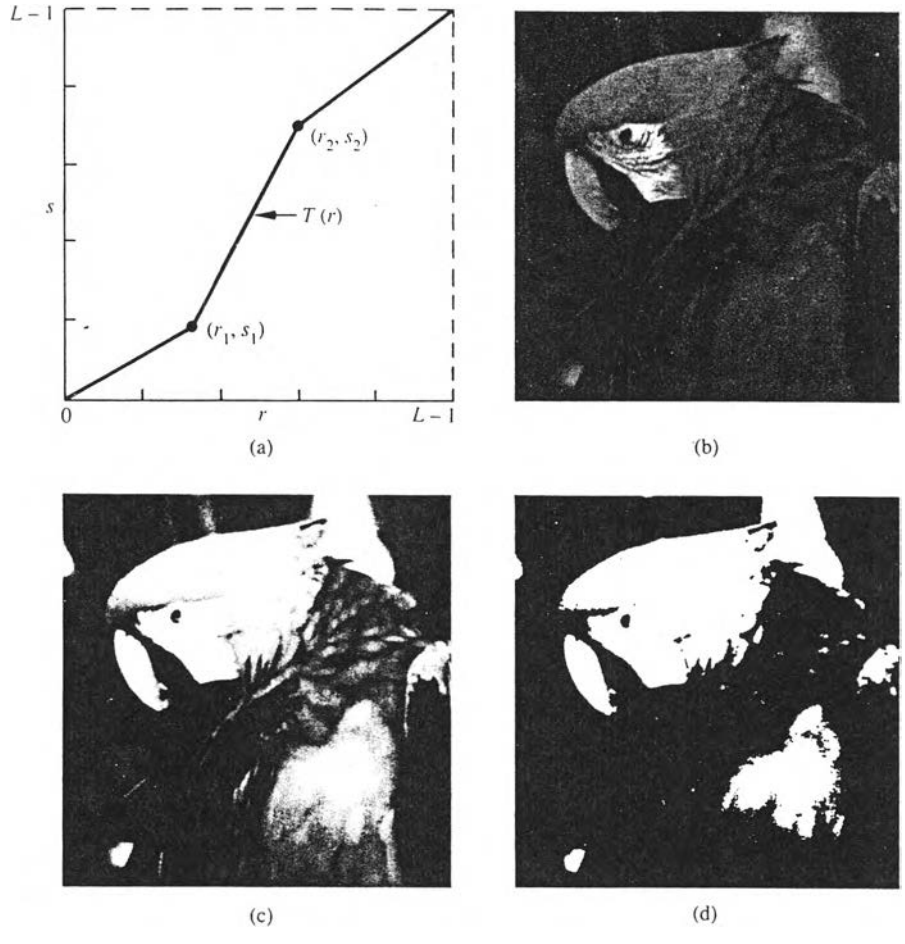
โดยที่ r แทนค่าระดับความเทาเดิมของพิกเซล

s แทนค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล

และ T( ) เป็นโอเปอเรเตอร์ หรือทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ทำให้พิกเซลที่มีค่าระดับความเทาเป็น r มีค่าระดับความเทาค่าใหม่เป็น T(r) ทุกๆพิกเซล และกำหนดให้ค่าระดับความเทาค่าใหม่ต้องอยู่ในช่วงระยะเกรย์สเกลเดียวกันกับค่าเดิม คือ $[r_1 , r_K]$

ถ้าค่าระดับความเทาของพิกเซลทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมดในภาพที่กำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วงย่อยๆช่วงใดช่วงหนึ่งของระยะเกรย์สเกลเท่านั้น จะทำให้มองเห็นรายละเอียดของภาพได้ไม่ชัดเจน เราสามารถที่จะปรับปรุงภาพได้โดยการใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันทำการขยายและเลื่อนช่วงระยะเกรย์สเกลย่อยๆนี้ออกไปจนเต็มช่วงระยะเกรย์สเกล ค่าระดับความเทาในช่วงระยะเกรย์สเกลอื่นๆ ก็จะถูกยุบกลายเป็นค่าระดับความเทาเพียงค่าเดียว ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้ข้อมูลเสียหายไป

เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และนอกจากนั้น ถ้าเราต้องการดึงรายละเอียดเฉพาะในขอบเขตของเกรย์สเกลช่วงใด ก็สามารถขยายขอบเขตของเกรย์สเกลในช่วงที่ต้องการนั้นออกไปได้



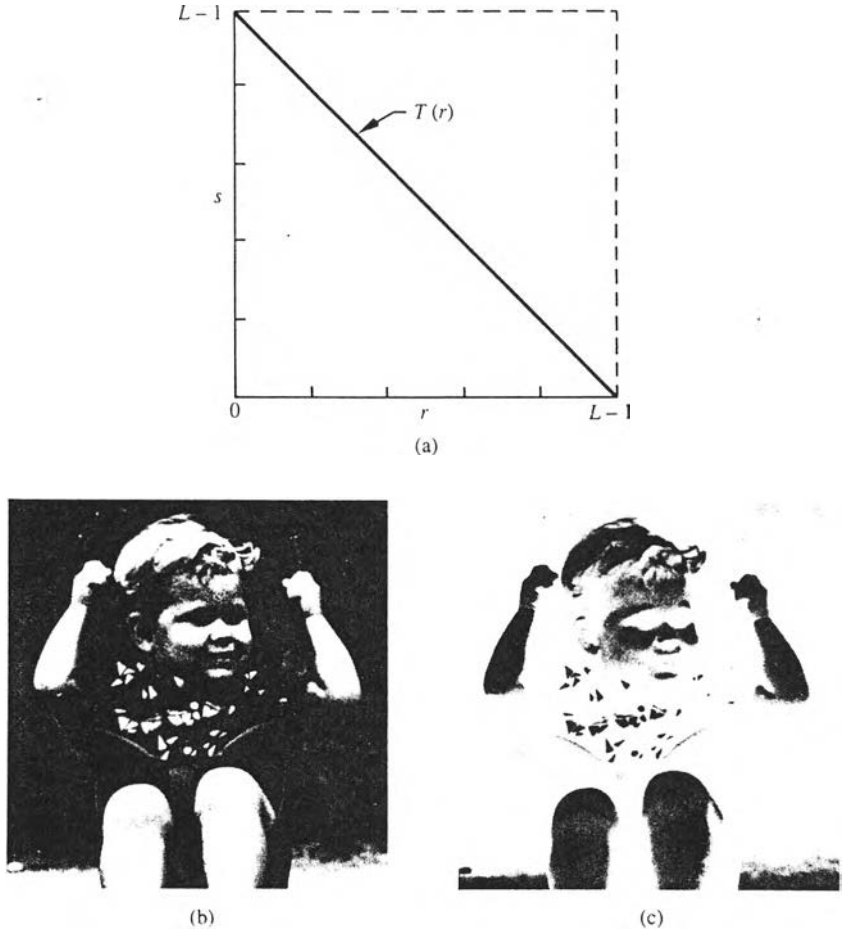
ภาพที่ 4 แสดงการปรับความแตกต่างของค่าระดับความเทา
และการกำหนดค่าขีดจำกัด
(a) ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน
(b) ภาพเดิม
(c) ภาพที่ได้จากการปรับความแตกต่างของค่าระดับความเทา
(d) ภาพที่ได้จากการกำหนดค่าขีดจำกัด
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 168)

ในการเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลโดยใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันตามที่ได้กล่าวมานั้น อาจจะทำให้ได้ค่าระดับความเทาค่าใหม่ที่อยู่นอกช่วงระยะเกรย์สเกลที่ใช้งานได้ หรือ อาจจะมีค่าระดับความเทาบางค่าที่ไม่ได้ถูกใช้งาน คือ มีการกระโดดข้ามในช่วงระยะเกรย์สเกลบางช่วงซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาอย่างทันทีทันใด ทำให้เกิดเป็นลักษณะของเส้นเงาขึ้นบนภาพ จึงต้องมีการใช้เทคนิคเพื่อทำให้ค่าระดับความเทาที่ได้อยู่ในขอบเขตของระยะเกรย์สเกลที่สามารถใช้งานได้ หรืออาจทำการแก้ไขลักษณะเส้นเงาที่เกิดขึ้นบนภาพโดยการแบ่งช่วงของค่าระดับความเทาเสียใหม่ (requantization) ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับความเทาที่ได้จากการแปลงค่ามากที่สุด (Rosenfeld and Kak, 1982)

การปรับค่าความแตกต่างของค่าระดับความเทานั้น นอกจากจะใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียวแล้ว ยังอาจใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีลักษณะลดลงเพียงอย่างเดียวก็ได้ เช่น ใช้การสเกลแบบผันกลับ (reverse scaling) กับภาพที่มีค่าระดับความเทาอยู่ในช่วงระยะเกรย์สเกลที่ปลายสุดด้านมืด (หรือมีค่าความเข้มต่ำ) เป็นจำนวนมากกว่า เพื่อทำให้บริเวณที่มีความสว่างน้อยกลายเป็นบริเวณที่มีความสว่างมากขึ้นและทำให้เห็นรายละเอียดต่างๆในภาพได้ชัดเจนขึ้น หรืออาจใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีทั้งลักษณะของการเพิ่มขึ้นและลดลง เช่น การสเกลแบบฟันเลื่อย (sawtooth scaling) เพื่อช่วยในการปรับความแตกต่างของค่าระดับความเทาในแต่ละช่วงของระยะเกรย์สเกล ซึ่งทำให้เห็นรายละเอียดในภาพบางส่วนได้ดีขึ้น

เทคนิคอย่างหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับการปรับค่าความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพ ก็คือการกำหนดค่าขีดจำกัด (Thresholding) การปรับปรุงภาพแบบนี้จะมีการเปลี่ยนค่าระดับความเทาเดิมที่มีค่าต่ำกว่าค่าขีดจำกัดให้เป็นค่าระดับความเทาค่าหนึ่ง และเปลี่ยนค่าระดับความเทาเดิมที่มีค่าสูงกว่าค่าขีดจำกัดให้เป็นค่าระดับความเทาอีกค่าหนึ่ง ซึ่งโดยส่วนมากมักกำหนดให้เปลี่ยนเป็นค่าระดับความเทาต่ำสุดและสูงสุดในระยะเกรย์สเกลนั้น จึงทำให้เกิดภาพที่มีค่าระดับความเทาเพียง 2 ค่า (binary image) (ภาพที่ 4) และนอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาเทคนิคแบบนี้ให้มีการกำหนดค่าขีดจำกัดได้มากกว่าหนึ่งค่า ซึ่งจะทำให้ภาพถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆตามค่าระดับความเทาที่อยู่ในแต่ละช่วงได้เช่นกัน เทคนิคที่ใช้การกำหนดค่าขีดจำกัดนี้ มักจะถูกใช้ในการแบ่งค่าระดับความเทาของภาพดิจิตอลออกเป็นส่วนๆเพื่อจุดประสงค์บางอย่าง เช่น ใช้ในการจับภาพของวัตถุหรือใช้กับภาพที่เป็นตัวอักษรเพียงอย่างเดียว สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ จะต้องกำหนดค่าขีดจำกัดให้เหมาะสมจึงจะทำให้ภาพถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆได้ตรงตามความต้องการ วิธีหนึ่งที่อาจช่วยในการกำหนดค่าขีดจำกัดได้คือการใช้ข้อมูลฮีสโตแกรมของภาพช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งจะได้อธิบายฮีสโตแกรมของภาพอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

เทคนิคอีกอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์กับงานหลายๆอย่างได้ คือ การกลับค่าระดับความเทาของภาพ (Image negatives) เทคนิคแบบนี้จะใช้การสเกลแบบผันกลับหรือใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีลักษณะลดลงด้วยอัตราคงที่เพียงอย่างเดียว ในการแปลงค่าระดับความเทาเพื่อให้ค่าระดับความเทาของภาพที่ปรับปรุงแล้วมีค่าลดลงในขณะที่ค่าระดับความเทาของภาพเดิมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าระดับความเทาสูงสุดกลายเป็นค่าระดับความเทาต่ำสุด และค่าระดับความเทาต่ำสุด กลายเป็นค่าระดับความเทาสูงสุด นอกจากนี้ยังอาจกำหนดค่าขีดจำกัดเพื่อบอกให้รู้ว่าต้องการให้มีการแปลงค่าตั้งแต่ค่าระดับความเทาค่าใดก็ได้



ภาพที่ 5 แสดงการกลับค่าระดับความเทา

(a) ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

(b) ภาพเดิม

(c) ภาพที่ได้จากการกลับค่าระดับความเทา

(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 167)

1.2.2 การดัดแปลงแก้ไขฮีสโตแกรม (Histogram Modification)
(Embree, 1991; Gonzalez and Wintz, 1977; Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990; Rosenfeld and Kak, 1982)

วิธีนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลโดยใช้ฮีสโตแกรม (histogram) ของภาพเข้ามาช่วย โดยที่ฮีสโตแกรมของภาพจะเป็นกราฟของฟังก์ชัน p(f) ที่แทนจำนวนพิกเซลที่มีค่าความเข้ม f โดยเทียบกับค่าความเข้ม f แต่ละค่า (Lim, 1990) สำหรับภาพดิจิตอลเราอาจจะมองฮีสโตแกรมนี้ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของภาพดิจิตอล (discrete probability density function) $p(r_k)$ โดยที่ r_k เป็นค่าระดับความเทาในช่วงระยะของเกรย์สเกลที่สามารถใช้งานได้ ค่าของ $p(r_k)$ นี้สามารถหาได้จากการหารจำนวนของพิกเซลที่มีค่าระดับความเทา r_k ด้วยจำนวนพิกเซลทั้งหมดในภาพดิจิตอลนั้น (Gonzalez and Woods, 1992)

$$p(r_k) = n_k / n \qquad (12)$$

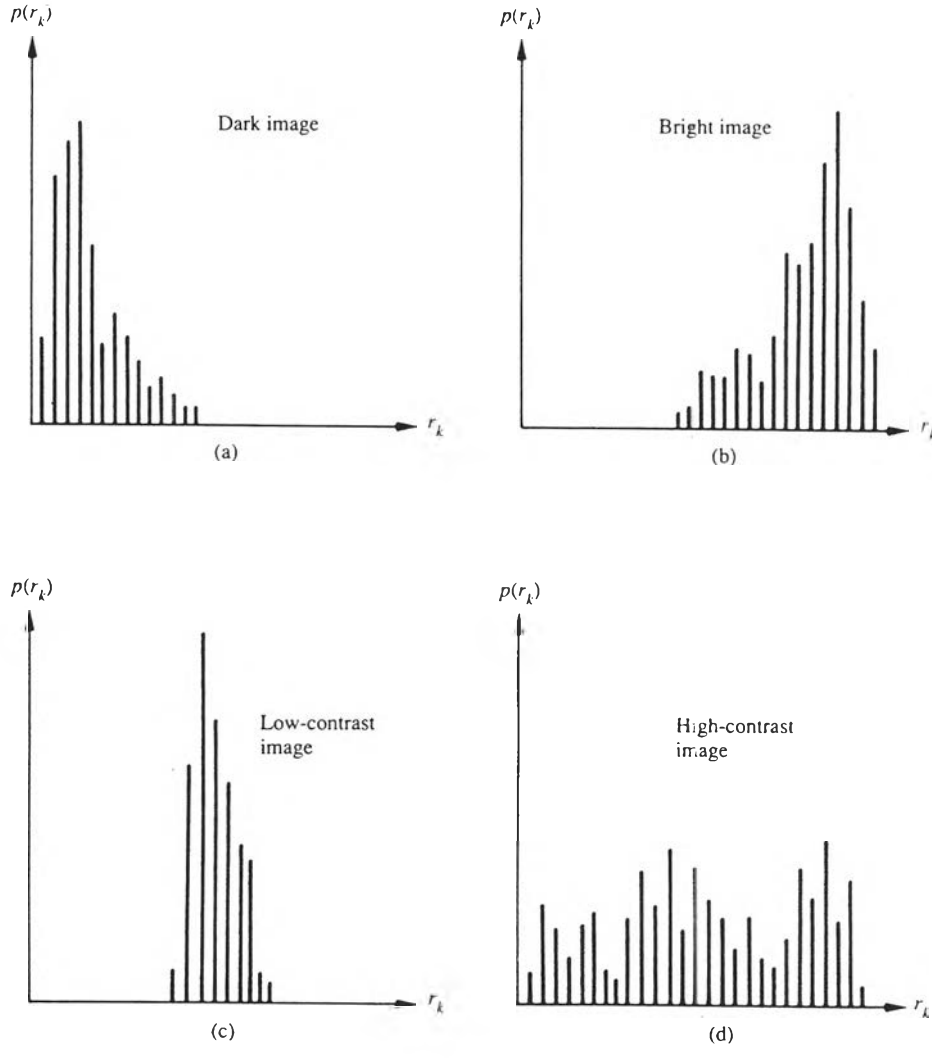
โดยที่ r_k เป็นค่าระดับความเทาที่ k ในระยะเกรย์สเกล
n_k เป็นจำนวนพิกเซลที่มีค่าระดับความเทา r_k
และ n เป็นจำนวนพิกเซลทั้งหมดในภาพดิจิตอล

ค่าผลรวมทั้งหมดของ $p(r_k)$ จะมีค่าเป็น 1 ซึ่งหมายถึงพิกเซลทั้งหมดที่อยู่ในภาพดิจิตอลนั้น

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $p(r_k)$ และค่าระดับความเทา r_k นี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะโดยรวมของภาพว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร สำหรับภาพดิจิตอลมักจะแสดงลักษณะของกราฟ โดยแทนฮีสโตแกรมของภาพด้วยกราฟแท่ง (bar graph) ที่มีค่าระดับความเทาในช่วงระยะเกรย์สเกลของภาพเป็นข้อมูลแกน x ลักษณะของฮีสโตแกรมของภาพนี้จะสามารถบอกถึงลักษณะทั้งหมดที่เกี่ยวกับภาพได้ โดยใช้เป็นพื้นฐานในการตรวจสอบถึงความละเอียดของภาพ เช่น บอกให้รู้ว่ามีจำนวนพิกเซลที่มีค่าระดับความเทาอยู่ในช่วงระยะเกรย์สเกลช่วงหนึ่งในจำนวนสัดส่วนเท่าใด หรือถ้าภาพนั้นมีฮีสโตแกรมอยู่ในช่วงแคบๆเพียงช่วงหนึ่งก็สามารถชี้ให้เห็นว่าภาพนั้นเป็นภาพที่มีความแตกต่างของค่าระดับความเทาต่ำ (low-contrast image) ได้

นอกจากนั้น ฮีสโตแกรมของภาพก็ยังถูกใช้ให้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการแบ่งภาพออกเป็นส่วนๆ แต่จะเห็นได้ว่าฮีสโตแกรมของภาพไม่ได้บอกถึงตำแหน่งของพิกเซลว่าอยู่ตำแหน่งใดหรืออยู่ใกล้กับพิกเซลใด การปรับปรุงภาพดิจิตอลที่ใช้ฮีสโตแกรมนี้จึงมักเป็นการ

ปรับปรุงเพื่อให้ภาพมีความแตกต่างของค่าระดับความเทาที่เหมาะสมโดยใช้การเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลของภาพ



ภาพที่ 6 แสดงลักษณะฮีสโตแกรมของภาพแบบต่างๆ
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 174)

การเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลในลักษณะนี้ จะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาในภาพเพื่อให้ได้ฮีสโตแกรมของภาพตามต้องการ ซึ่งมีจุดประสงค์ที่จะปรับปรุงความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพนั่นเอง จึงต้องมีการคำนวณหาฮีสโตแกรมของภาพก่อน แล้วกำหนดลักษณะของฮีสโตแกรมที่ต้องการของภาพขึ้นมาโดยที่ผลรวมทั้งหมดของค่าความถี่ในฮีสโตแกรมจะต้องเท่าเดิม แล้วจึงทำการเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลของภาพ เพื่อทำให้ภาพดิจิตอลที่ถูกปรับปรุง

แล้วมีลักษณะของฮีสโตแกรมตรงตามที่กำหนดไว้ ซึ่งจะต้องหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน s = T(r) ที่ทำให้ฮีสโตแกรมของภาพที่ถูกปรับปรุงแล้วมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับฮีสโตแกรมของภาพที่ต้องการมากที่สุด โดยมีข้อกำหนดว่า ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน T( ) นี้จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ให้ค่าผลลัพธ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือเท่าเดิมเพียงค่าเดียวเท่านั้น (single-valued and monotonically nondecreasing function) เพื่อทำให้พิกเซลในภาพมีค่าระดับความเทาค่าใหม่สูงกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความเทาเดิมเท่านั้น และค่าของ T(r) หรือค่าระดับความเทาค่าใหม่จะต้องอยู่ในช่วงระยะเกรย์สเกลเท่าเดิมด้วย

การกำหนดลักษณะของฮีสโตแกรมที่ต้องการ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงเกรย์สเกลแบบนี้ สามารถกำหนดได้ในหลายลักษณะด้วยกัน คือ

1.2.2.1 การกำหนดฮีสโตแกรมโดยตรงแบบทั่วๆไป

(Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990)

วิธีนี้เป็นการกำหนดฮีสโตแกรมของภาพตามที่ต้องการ ลักษณะของฮีสโตแกรมแบบหนึ่งที่น่าจะมีประโยชน์สำหรับภาพดิจิตอลใดๆก็คือ ฮีสโตแกรมที่กำหนดให้ค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $p(r_k)$ มีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงกลางของระยะเกรย์สเกล และมีค่าลดลงมาอย่างช้าๆในขณะที่ค่าระดับความเทา r_k เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งจะทำให้พิกเซลส่วนใหญ่ในภาพดิจิตอลมีค่าระดับความเทาอยู่ในช่วงกลางๆที่ไม่สูงหรือต่ำเกินไป

ในการปรับปรุงภาพแบบนี้ เราจะต้องหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงค่าระดับความเทาเป็นค่าใหม่ และทำให้ภาพที่ถูกปรับปรุงแล้วมีลักษณะของฮีสโตแกรมที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกันกับฮีสโตแกรมที่ต้องการให้มากที่สุด

สมมติให้ $p_r(r)$ เป็นฮีสโตแกรมของภาพเดิม (หรือเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของภาพเดิม) และ $p_s(s)$ เป็นฮีสโตแกรมที่ต้องการ จะต้องหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน T( ) ที่ใช้ในการแปลงค่าระดับความเทา เพื่อทำให้ฮีสโตแกรมของภาพเดิม $p_r(r)$ มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับฮีสโตแกรมที่ต้องการ $p_s(s)$ และทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน T( ) จะต้องให้ค่าผลลัพธ์ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าเดิมเท่านั้น ซึ่งจะมีลักษณะดังสมการ (Lim, 1990)

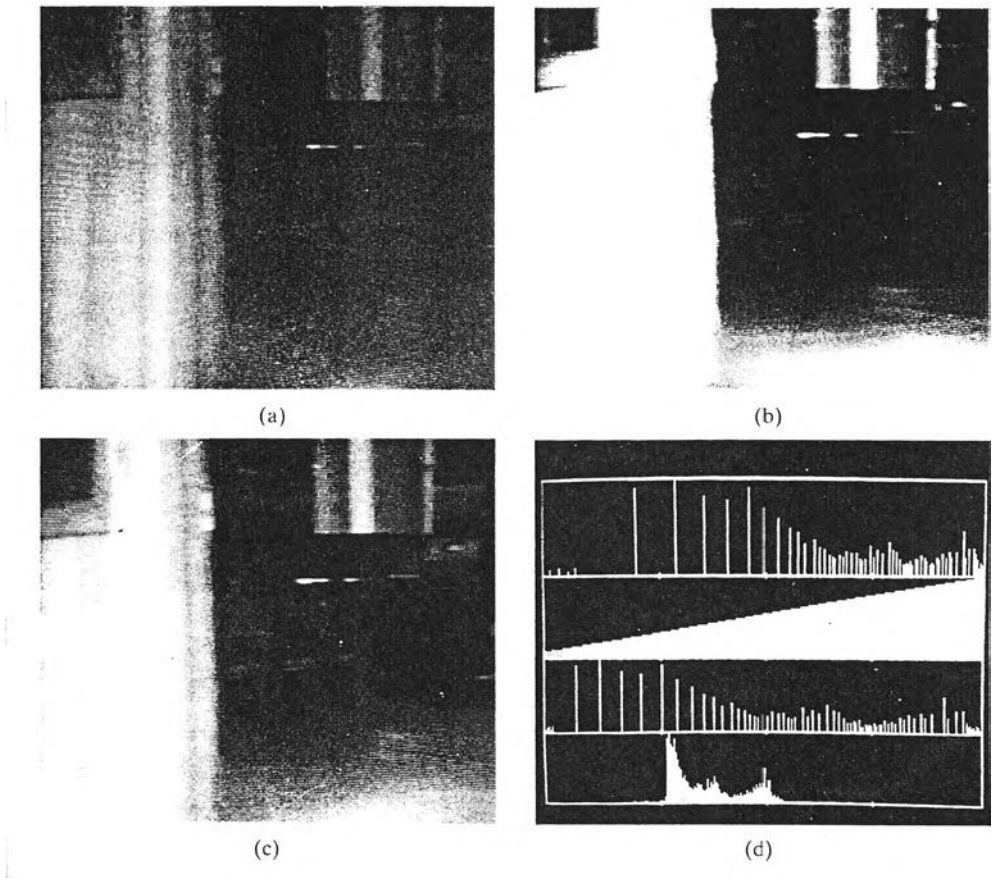
$$s = T(r) \tag{13}$$

โดยที่ s เป็น ค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล

r เป็นค่าระดับความเทาเดิมของพิกเซล

และ T( ) เป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงค่าระดับความเทา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 7 แสดงการดัดแปลงแก้ไขฮีสโตแกรมโดยการกำหนดฮีสโตแกรม
(a) ภาพเดิม
(b) ภาพที่ได้จากการปรับปรุงโดยกำหนดฮีสโตแกรมเท่ากัน
(c) ภาพที่ได้จากการปรับปรุงโดยกำหนดฮีสโตแกรมแบบทั่วๆไป
(d) ฮีสโตแกรมของภาพ
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 182)

วิธีหนึ่งที่ใช้ในคำนวณ ก็โดยการหาค่าสะสมของฟังก์ชั่นการกระจาย (cumulative distribution function หรือ CDF) หรือค่าฮีสโตแกรมสะสมของ $p_r(r)$ และ $p_s(s)$ ทีแทนด้วย $P_r(r)$ และ $P_s(s)$ ตามลำดับ แล้วเลือกฟังก์ชันในการแปลงค่า (transformation function) ที่ทำให้ $P_r(r)$ มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ $P_s(s)$ มากที่สุด ซึ่ง $P_r(r)$ และ $P_s(s)$ สามารถจะเขียนให้อยู่ในรูปของ (Lim, 1990)

$$P_r(r) = \sum_{k=0}^{r} p_r(k) = P_r(r-1) + p(r)$$
$$P_s(s) = \sum_{k=0}^{s} p_s(k) = P_s(s-1) + p(s) \qquad (14)$$

1.2.2.2 การกำหนดฮีสโตแกรมเท่ากัน (Histogram Equalization) (Embree, 1991; Gonzalez and Wintz, 1977; Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990; Pratt, 1978; Rosenfeld and Kak , 1982)

เนื่องจากภาพที่มีความแตกต่างของค่าระดับความเทาต่ำนั้นมักจะมีฮีสโตแกรมของภาพที่มีลักษณะเป็นยอดแหลมอยู่ในช่วงแคบๆของระยะเกรย์สเกล หรืออาจกล่าวได้ว่ามักจะมีพิกเซลที่มีค่าของระดับความเทาอยู่ในช่วงระยะเกรย์สเกลช่วงหนึ่งเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงได้เกิดเป็นแนวความคิดที่จะกำหนดให้ฮีสโตแกรมของภาพที่ต้องการมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือมีค่าเท่ากันหมด (uniform histogram) ซึ่งเป็นการกำหนดให้ค่าระดับความเทาทุกๆค่ามีโอกาสเกิดขึ้นเท่ากันหมด เรียกว่าการทำให้ฮีสโตแกรมแบนราบ (histogram flattening) หรือการทำให้ฮีสโตแกรมเท่ากัน (histogram equalization)

การกำหนดฮีสโตแกรมในลักษณะเช่นนี้ นอกจากจะเป็นการทำให้ภาพมีลักษณะตามที่ควรจะเป็นแล้วยังเป็นการช่วยปรับปรุงภาพอีกด้วย เพราะเมื่อกำหนดให้ค่าความถี่ในฮีสโตแกรมเท่ากัน พิกเซลที่อยู่ในบริเวณที่มีความถี่หนาแน่นในช่วงระยะเกรย์สเกลหนึ่งจะถูกบังคับให้มีการใช้ค่าระดับความเทาอื่นในจำนวนที่มากขึ้น เพื่อทำให้ฮีสโตแกรมในบริเวณเหล่านี้ถูกกระจายออกไป ในขณะเดียวกันพิกเซลที่อยู่ในบริเวณที่มีความถี่เบาบางในช่วงระยะเกรย์สเกลอีกช่วงหนึ่งก็จะถูกบังคับให้มีค่าระดับความเทาอื่นในจำนวนที่น้อยลงซึ่งจะทำให้ฮีสโตแกรมในบริเวณเหล่านี้ถูกอัดเข้ามา และเนื่องจากบริเวณที่ถูกกระจายฮีสโตแกรมออกไปนั้นเป็นบริเวณที่มีจำนวนพิกเซลของภาพอยู่เป็นจำนวนมากกว่าบริเวณที่ถูกอัดเข้ามา จึงทำให้เกิดการปรับปรุงความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพในอีกลักษณะหนึ่ง

สมมติให้ r แทนค่าระดับความเทาของพิกเซลในภาพดิจิตอล โดยให้ค่าของพิกเซลเป็นค่าๆหนึ่งที่อยู่ในช่วง [0,1] โดย r = 0 แทนค่าระดับความเทาต่ำสุดและ r = 1 แทนค่าระดับความเทาสูงสุดสำหรับค่า r ที่อยู่ในช่วง [0,1] และให้ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$s = T(r) \qquad (15)$$

โดยที่ T(r) เป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ทำให้พิกเซลมีค่าใหม่เป็น s สำหรับทุกๆพิกเซล ที่มีค่าเดิมเป็น r และ

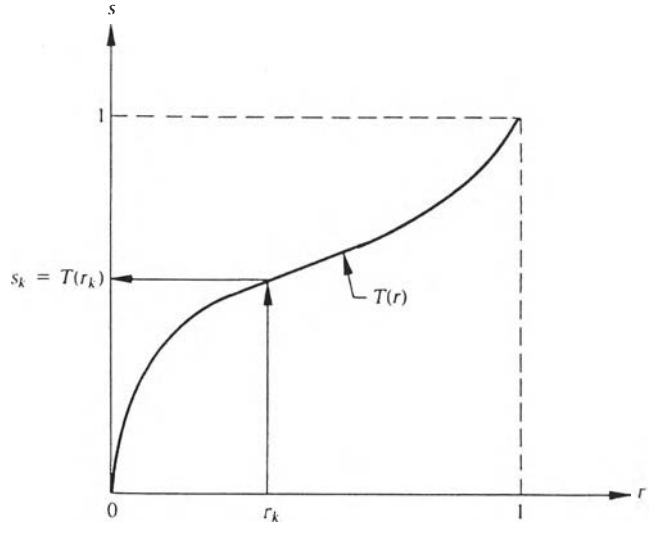
$$r = T^{-1}(s) \tag{16}$$

โดยที่ $T^{-1}(s)$ เป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแบบผันกลับจาก s ไป r สำหรับ $0 \leq s \leq 1$

สมมติให้ T(r) และ T^{-1} (s) เป็นฟังก์ชันทางเดียวที่ไม่ลดลงที่ให้ค่าเพียงค่าเดียว และกำหนด ให้ $0 \leq T(r) \leq 1$ สำหรับทุกๆค่า r ที่ $0 \leq r \leq 1$ และ $0 \leq T^{-1}(s) \leq 1$ สำหรับทุกๆค่าของ s ที่ $0 \leq s \leq 1$ และให้ $p_r(r)$ และ $p_s(s)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าระดับความเทาเดิมและค่าระดับความเทาที่ถูกปรับปรุงแล้วตามลำดับ

จากทฤษฎีความน่าจะเป็นเบื้องต้น (elementary probability theory) จะได้ว่า ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าระดับความเทาที่ถูกปรับปรุงแล้วจะมีค่าเป็น

$$p_s(s) = p_r(r) \frac{dr}{ds} \tag{17}$$



ภาพที่ 8 แสดงทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ใช้ในการดัดแปลงแก้ไขฮีสโตรแกรม
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 175)

จากรูป พิจารณาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวแปร w ใดๆ เราจะได้ว่า

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(w)\, dw \qquad 0 \le r \le 1 \qquad (18)$$

สำหรับภาพดิจิตอล จะได้ว่า (Gonzalez and Woods, 1992)

$$s = T(r) = \sum_{w=0}^{r} p_r(w) \qquad (19)$$

ถ้าให้ $P_r(r)$ เป็นค่าสะสมของการกระจาย หรือ CDF ของ r จะได้ว่า

$$P_r(r) = \sum_{w=0}^{r} p_r(w) \qquad (20)$$

เนื่องจาก CDF เป็นฟังก์ชันที่ให้ค่าผลลัพธ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือเท่าเดิมเท่านั้น (monotonically nondecreasing function) ที่ให้ค่าระหว่าง $0 \le P_r(r) \le 1$ ทุกๆค่าของ r ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าสมมติฐานที่กำหนดให้ T(r) ในตอนแรกนั้นเป็นความจริง (Gonzalez and Woods, 1992)

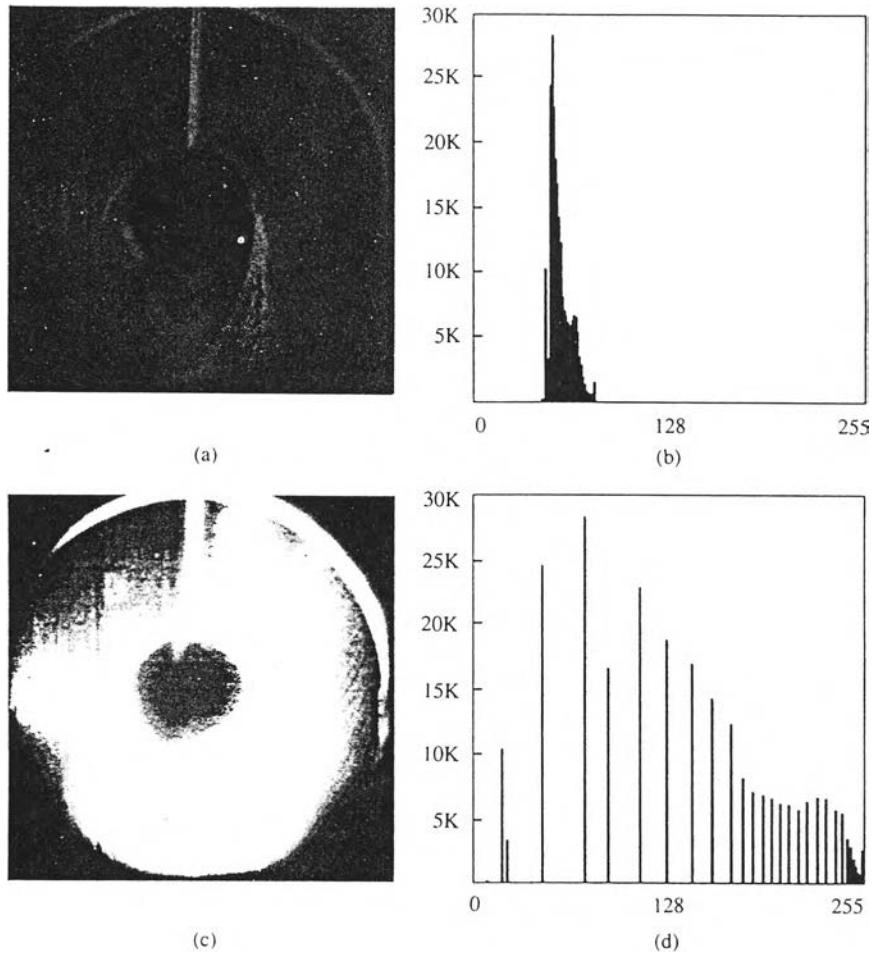
จากสมการของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (สมการ (19)) หาค่าอนุพันธ์ของ s เมื่อเทียบกับ r ได้ว่า

$$\frac{ds}{dr} = p_r(r) \qquad (21)$$

แทนค่าลงในสมการของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าระดับความเทาที่ถูกปรับปรุงแล้ว (สมการ (17)) จะได้ว่า

$$p_S(s) = \frac{p_r(r)}{p_S(s)} = 1 \qquad 0 \le s \le 1 \qquad (22)$$

ซึ่งเป็นค่าความถี่หรือความหนาแน่นที่คงที่ (uniform density) ตรงตามลักษณะของฮีสโตแกรมที่ต้องการ ดังนั้น เราจึงสามารถใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนี้ช่วยในการแปลงค่าระดับความเทาของพิกเซลในภาพดิจิตอล เพื่อทำให้ฮีสโตแกรมของภาพที่ถูกปรับปรุงแล้วมีลักษณะแบนราบตามต้องการได้



ภาพที่ 9 แสดงการดัดแปลงแก้ไขฮีสโตแกรมโดยการกำหนดฮีสโตแกรมเท่ากัน

(a) ภาพเดิม

(b) ฮีสโตแกรมของภาพเดิม

(c) ภาพที่ได้จากการปรับปรุงโดยกำหนดฮีสโตแกรมเท่ากัน

(d) ฮีสโตแกรมของภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว

(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 179)

การกำหนดฮีสโตแกรมที่ต้องการให้มีลักษณะเรียบเป็นเส้นตรงนั้น แม้ว่าจะทำให้ความแตกต่างของค่าระดับความเทาเพิ่มมากขึ้นกว่าภาพเดิมก็ตาม แต่ก็มักจะเป็นภาพที่มองดูไม่เป็นธรรมชาติ และบางครั้งก็เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาที่หยาบเกินไป เพราะมันอาจจะแปลงบริเวณของค่าระดับความเทาจำนวนมากๆที่ปลายสุดของระยะเกรย์สเกลเข้าไปอยู่ในค่าระดับความเทาเดียวกัน โดยที่ผู้ใช้อาจต้องการที่จะกำหนดฮีสโตแกรมให้มีค่าอยู่ในช่วงบางช่วงที่ปลายสุดของระยะเกรย์สเกล มากกว่าที่จะกำหนดฮีสโตแกรมในลักษณะเรียบเหมือนเส้นตรง ในขณะที่การกำหนดฮีสโตแกรมให้มีค่าความถี่สูงสุดอยู่ในช่วงกลางของระยะเกรย์สเกล มักจะทำให้เกิดภาพที่มีลักษณะสมดุลย์มากกว่า เนื่องจากการกำหนดฮีสโตแกรมในลักษณะนั้นมีความยืดหยุ่นในการกำหนดลักษณะได้มากกว่า จึงสามารถทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีกว่าในการปรับปรุงภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่จำเป็นต้องทำให้พิกเซลในภาพมีการกระจายที่ดีเพื่อทำให้เกิดการปรับปรุงภาพที่ดี

2. <u>การทำให้ภาพคม และการหาขอบของวัตถุในภาพ</u>

(Sharpening และ Edge Detection)

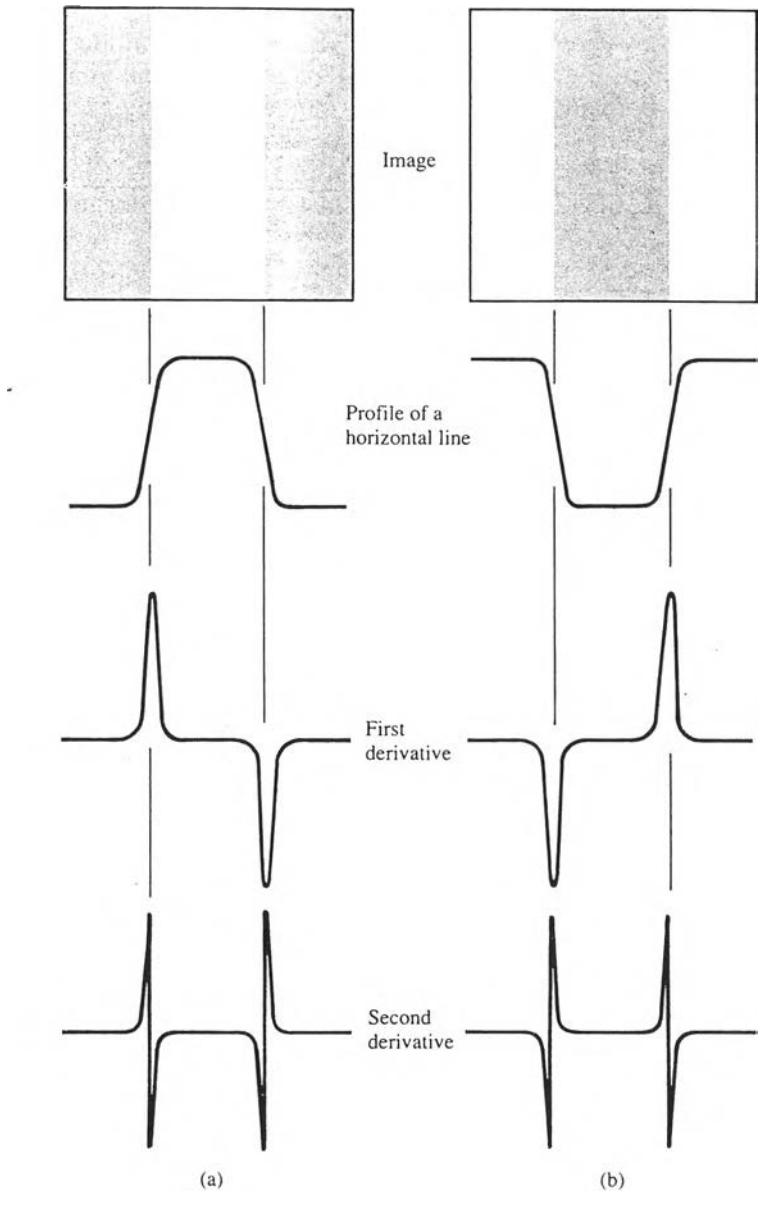
(Gonzalez and Wintz, 1977; Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990; Rosenfeld and Kak, 1982)

ขอบ (edge) ของวัตถุในภาพ จะเป็นบริเวณหรือขอบเขต (boundary) หรือเส้นที่แสดงระดับ (contour) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพบางอย่างของภาพอย่างเห็นได้ชัด (Lim, 1990) โดยที่แสดงออกมาได้หลายๆลักษณะ ซึ่งรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของจุดในภาพ การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพนี้จะมีความสำคัญมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของจุดที่ถูกกำหนดให้เป็นขอบของวัตถุในงานบางอย่าง อาจจะไม่ถูกพิจารณาให้เป็นขอบของวัตถุในงานอื่นๆก็ได้

การทำให้ภาพคมขึ้น (sharpening) มีจุดประสงค์เพื่อที่จะทำให้รายละเอียดต่างๆหรือขอบของวัตถุในภาพนั้นเด่นชัดขึ้นมา หรือเพื่อที่จะปรับปรุงรายละเอียดที่พร่ามัวให้ชัดเจนขึ้นกว่าเดิม (Gonzalez and Woods, 1992) จึงสามารถใช้ประโยชน์จากการหาขอบของวัตถุในภาพ ซึ่งนอกจากจะถูกนำไปใช้ในการทำให้ภาพคมขึ้นแล้ว ยังถูกนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์กับงานในลักษณะอื่นๆ เช่น การค้นหาวัตถุ (object identification) โดยที่การค้นหาวัตถุในภาพนี้จะมีขั้นตอนที่สำคัญอันหนึ่งคือการแบ่งภาพออกเป็นส่วนต่างๆตามลักษณะของวัตถุในภาพ และการหาขอบของวัตถุก็มักจะถูกใช้เป็นขั้นตอนแรกในการแบ่งภาพนั้นออกเป็นส่วนๆ

ลักษณะที่พร่ามัวของภาพดิจิตอลมักเกิดจากการเฉลี่ย (averaging) ค่าระดับความเทาของพิกเซลในภาพ ซึ่งเปรียบได้กับการอินทิเกรท (integration) ดังนั้นการใช้เทคนิคของการ

ดิฟเฟอเรนชิเอท (differentiation) เข้ามาช่วยจึงสามารถทำให้ภาพคมขึ้น (Gonzalez and Woods, 1992)



ภาพที่ 10 แสดงการหาขอบโดยใช้อนุพันธ์

(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 417)

เนื่องจากบริเวณที่พร่ามัวของภาพนั้นมักจะทำให้เกิดส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำในฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพในขณะที่ขอบและส่วนอื่นๆที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาอย่างรวดเร็วมักทำให้เกิดส่วนประกอบที่มีความถี่สูง ดังนั้นภาพที่มีลักษณะพร่ามัวจึงอาจถูกทำให้

คมขึ้นได้โดยการทำให้ส่วนประกอบความถี่ต่ำเบาบางลงไปในขณะที่ยังคงรักษาส่วนประกอบที่มีความถี่สูงๆเอาไว้ (Gonzalez and Woods, 1992) แต่วิธีการปรับปรุงภาพแบบนี้ถ้านำไปใช้กับภาพที่มีสัญญาณรบกวนมากๆ อาจทำให้สัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในภาพ ถูกปรับปรุงให้เห็นชัดเจนมากยิ่งขึ้น เพราะโดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนมักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับความเทาที่มีค่าสูง ดังนั้น ภาพที่นำมาปรับปรุงจึงควรเป็นภาพที่มีสัญญาณภาพหนาแน่นกว่าสัญญาณรบกวน หรืออาจจะต้องกำจัดหรือลดสัญญาณรบกวนก่อนที่จะนำมาปรับปรุงให้คมขึ้น (Rosenfeld and Kak, 1982)

เทคนิคที่ใช้ในการทำให้ภาพคมขึ้นสามารถทำได้ทั้งในโดเมนของเวลา (time domain) และโดเมนของความถี่ (frequency domain) ซึ่งมักจะเป็นการเพิ่มหรือเสริม (boost) ขอบของวัตถุในภาพให้เด่นชัดขึ้นมา โดยสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้ คือ

2.1 <u>วิธีที่ใช้หลักการของแกรเดียนท์</u> (Gradient-Based Methods)
(Gonzalez and Wintz, 1977; Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990; Niblack, 1986; Rosenfeld and Kak, 1982)

การหาขอบของวัตถุในภาพ เป็นวิธีที่ใช้อนุพันธ์ (derivative) ของฟังก์ชันเข้ามาช่วยในการหาบริเวณที่เป็นขอบของวัตถุในภาพในโดเมนของเวลา โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของฟังก์ชันซึ่งจะให้ค่าของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) เป็นค่าบวกหรือค่าลบเมื่อฟังก์ชันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าและให้ค่าอนุพันธ์เป็นศูนย์เมื่อค่าของฟังก์ชันไม่เปลี่ยนแปลง การหาขอบของวัตถุสามารถพิจารณาได้จากค่าของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด ซึ่งถ้าค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันมีค่าเป็นบวกแสดงว่าฟังก์ชันนั้นกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าค่าของอนุพันธ์เป็นลบแสดงว่าฟังก์ชันกำลังมีค่าลดลง และนอกจากนั้นขนาด (magnitude) ของอนุพันธ์ยังบอกให้รู้ถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าของฟังก์ชันได้คือ ถ้าอนุพันธ์ของฟังก์ชันมีค่ามากแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มอย่างรวดเร็วของบริเวณของภาพในส่วนนั้นด้วย (Lim, 1990)

แกรเดียนท์ที่จุดใดๆของฟังก์ชันถูกกำหนดให้เป็นเวคเตอร์ที่ชี้ไปในทิศทางที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชันที่มากที่สุด และขนาดของแกรเดียนท์จะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชันที่มากที่สุดต่อหน่วยระยะทาง ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$G[f(x,y)] = mag[G] = \left[\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2\right]^{1/2} \qquad (23)$$

ซึ่งจะอยู่ในรูปของการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันนั่นเอง สำหรับภาพดิจิตอลแล้ว ค่าของฟังก์ชันจะหมายถึงค่าระดับความเทาของพิกเซลในภาพ และเราสามารถจะประมาณค่าของอนุพันธ์อันดับหนึ่งใน G[f(x,y)] ด้วยค่าความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซลได้ดังนี้ (Gonzalez and Wintz, 1977)

$$G[f(x,y)] = \left[\{f(x,y) - f(x+1,y)\}^2 + \{f(x,y) - f(x,y+1)\}^2\right]^{1/2} \qquad (24)$$

หรืออาจจะใช้ค่าสมบูรณ์ (absolute) ซึ่งเหมาะสมและเร็วกว่าในการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ แต่ให้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกัน ได้ดังนี้

$$G[f(x,y)] = |f(x,y) - f(x+1,y)| + |f(x,y) - f(x,y+1)| \qquad (25)$$

จะเห็นได้ว่าจากการประมาณค่าของแกรเดียนท์นั้น ขนาดของแกรเดียนท์จะเป็นสัดส่วนกับค่าของความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ติดกัน ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาของพิกเซลอย่างรวดเร็วด้วยค่ามากๆหรือเป็นบริเวณที่เป็นขอบเด่นชัดในภาพ ขนาดของแกรเดียนท์จะมีค่ามาก แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาของพิกเซลด้วยค่าน้อยๆหรือเป็นบริเวณที่มีลักษณะเรียบกว่าหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างช้าๆในภาพแล้ว ขนาดของแกรเดียนท์ก็จะมีค่าน้อย และมีค่าเป็นศูนย์ในบริเวณที่มีค่าระดับความเทาของพิกเซลคงที่

จากการประมาณค่าของอนุพันธ์ด้วยค่าความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซล ทำให้เราสามารถเขียนการคำนวณหาค่าของอนุพันธ์ทั้ง 2 ทิศทางของฟังก์ชัน ซึ่งใช้ในการหาขนาดของแกรเดียนท์ในรูปของการคอนโวลูชั่นภาพ f(x,y) ด้วยอิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณ h(x,y) ได้ดังนี้คือ (Lim, 1990)

$$\begin{aligned} \frac{df(x,y)}{dx} &= f(x,y) * h_x(x,y) \\ \frac{df(x,y)}{dy} &= f(x,y) * h_y(x,y) \end{aligned} \qquad (26)$$

โดยที่ * เป็นการหาผลรวมของผลคูณระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณ กับค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงในตำแหน่งที่ตรงกันกับที่ตัวกรองสัญญาณนั้นเลื่อนไปถึง โดยมีพิกเซลที่ต้องการจะปรับปรุงอยู่ในตำแหน่งตรงกลาง

$h_x(x,y)$ เป็นอิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณ $h(x,y)$ ในทิศทางแกน x

$h_y(x,y)$ เป็นอิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณ $h(x,y)$ ในทิศทางแกน y

ซึ่งจะมีลักษณะเป็น

$$h_x(x,y) = \begin{array}{|c|c|}\hline 1 & -1 \\ \hline \end{array} \qquad \text{และ} \qquad h_y(x,y) = \begin{array}{|c|}\hline -1 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}$$

ดังนั้น การหาขนาดของแกรเดียนท์จึงอยู่ในรูปของ (Lim, 1990)

$$G[f(x,y)] = \left[\left\{f(x,y) * h_x(x,y)\right\}^2 + \left\{f(x,y) * h_y(x,y)\right\}^2\right]^{1/2} \qquad (27)$$

หรือ $$G[f(x,y)] = \left|f(x,y) * h_x(x,y)\right| + \left|f(x,y) * h_y(x,y)\right| \qquad (28)$$

r_1	r_2	r_3
r_4	r_5	r_6
r_7	r_8	r_9

ภาพที่ 11 แสดงค่าระดับความเทาของพิกเซลในบริเวณใกล้เคียง
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 200)

จากภาพ เราจะสมมติให้ r_5 เป็นค่าระดับความเทาของพิกเซลที่เราต้องการปรับปรุงการประมาณค่าของอนุพันธ์ที่ใช้ในการหาขนาดของแกรเดียนท์ นอกจากจะใช้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ติดกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$G[r_5] = \left|r_5 - r_8\right| + \left|r_5 - r_6\right| \qquad (29)$$

แล้ว ยังสามารถใช้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซลอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงนั้น ซึ่งยังคงเป็นการประมาณค่าของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันที่จุดที่ต้องการได้เช่นเดียวกัน เช่น เราอาจประมาณค่าของแกรเดียนท์ให้เท่ากับ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$G[r_5] = \left|(r_7+2r_8+r_9)-(r_1+2r_2+r_3)\right|+\left|(r_3+2r_6+r_9)-(r_1+2r_4+r_7)\right| \quad (30)$$

ซึ่งจะมีลักษณะของอิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณดังรูป

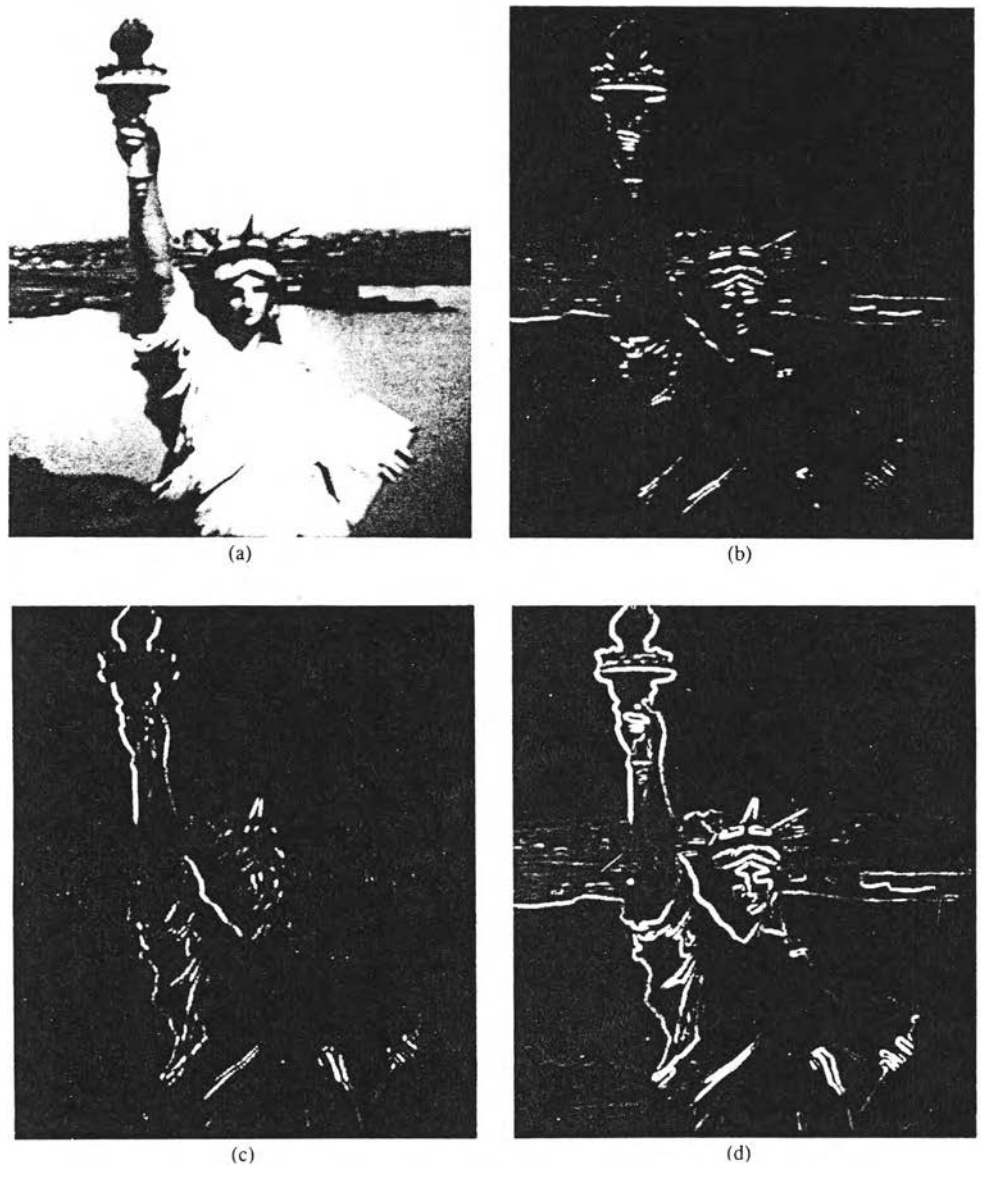
−1	−2	−1
0	0	0
1	2	1

−1	0	1
−2	0	2
−1	0	1

ภาพที่ 12 แสดงอิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณ
ซึ่งเป็นโซเบลโอเปอเรเตอร์
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 200)

เมื่อได้ขนาดของแกรเดียนท์ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาของแต่ละพิกเซลในภาพดิจิตอลแล้ว ก็สามารถนำขนาดของแกรเดียนท์ที่ได้นั้นมาใช้เพื่อทำให้เกิดการปรับปรุงภาพในลักษณะต่างๆ โดยอาจแทนค่าระดับความเทาที่พิกเซลแต่ละพิกเซลในภาพด้วยขนาดของแกรเดียนท์ของพิกเซลนั้น หรืออาจกำหนดค่าขีดจำกัดที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพื่อใช้ในการพิจารณาหาขอบของวัตถุในภาพ โดยกำหนดให้พิกเซลที่มีขนาดของแกรเดียนท์เกินกว่าค่าขีดจำกัดนี้เป็นขอบ แล้วแทนค่าระดับความเทาของพิกเซลที่เป็นขอบเหล่านี้ด้วยขนาดของแกรเดียนท์หรือค่าระดับความเทาใดๆระดับหนึ่ง ในขณะที่ให้พิกเซลอื่นๆมีค่าระดับความเทาคงเดิมหรือมีค่าเป็นค่าระดับความเทาใดๆระดับหนึ่งก็ได้ ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป และสามารถนำไปใช้กับงานที่มีจุดมุ่งหมายที่แตกต่างกันไปได้

ในการพิจารณาหาขอบของวัตถุในภาพ ซึ่งกำหนดให้ส่วนของภาพที่ถูกจัดเป็นขอบของวัตถุต้องมีขนาดของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันมากกว่าค่าขีดจำกัดค่าหนึ่งที่กำหนดให้นั้น จะเห็นได้ว่าถ้ากำหนดค่าขีดจำกัดที่มีค่าน้อยเกินไป ขอบของวัตถุที่ได้จะปรากฏเป็นแถบแทนที่จะเป็นเส้น ดังนั้นจึงควรกำหนดค่าขีดจำกัดที่ทำให้ขนาดของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันมีค่ามากที่สุดในบริเวณนั้นด้วย แต่เนื่องจากการกำหนดค่าขีดจำกัดให้เหมาะสมเป็นสิ่งที่ยาก จึงต้องมีการทดลองหลายๆครั้งเพื่อหาข้อผิดพลาดแล้วนำมาแก้ไขจนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 13 แสดงการหาขอบโดยใช้หลักการของแกรเดียนท์

(a) ภาพเดิม

(b) ภาพที่ได้จากการหาขอบโดยใช้โซเบลโอเปอเรเตอร์ทางแนวนอน

(c) ภาพที่ได้จากการหาขอบโดยใช้โซเบลโอเปอเรเตอร์ทางแนวตั้ง

(d) ภาพที่ได้จากการหาขอบโดยใช้โซเบลโอเปอเรเตอร์ในสมการ (30)

(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 421)

2.2 วิธีที่ใช้หลักการของลาปลาเซียน (Laplacian-Based Methods)

(Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990; Rosenfeld and Kak, 1982)

วิธีนี้เป็นการหาขอบของวัตถุในภาพที่ใช้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเข้ามาช่วยในการพิจารณาในโดเมนของเวลาเช่นเดียวกับวิธีที่ใช้หลักการของแกรเดียนท์ แต่จะพิจารณาจากค่าของอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันแทน (Lim, 1990) โดยจะเห็นได้จากภาพที่ 10 ว่าอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันจะมีค่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชันเท่านั้น โดยที่เมื่อค่าของฟังก์ชันมีการเปลี่ยนแปลงจากน้อยไปหามาก อนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งด้านที่มีค่าน้อยของฟังก์ชัน (หรือด้านมืดของขอบ) และมีค่าน้อยที่สุดที่ตำแหน่งด้านที่มีค่ามากของฟังก์ชัน (หรือด้านสว่างของขอบ) และเช่นเดียวกันเมื่อค่าของฟังก์ชันมีการเปลี่ยนแปลงจากค่ามากไปหาค่าน้อย ก็จะทำให้เกิดค่าอนุพันธ์อันดับสองที่มีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งด้านมืดและค่าน้อยที่สุดที่ตำแหน่งด้านสว่างของขอบด้วย จุดที่เป็นตำแหน่งที่แท้จริงของขอบจะเป็นจุดที่อนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันมีการเปลี่ยนเครื่องหมาย (หรือเป็นจุดที่เป็น zero-crossing) ซึ่งเป็นจุดที่อนุพันธ์อันดับหนึ่งมีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุดด้วย ถ้ากำหนดให้จุดที่อนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันมีการเปลี่ยนเครื่องหมายเป็นขอบของวัตถุในภาพทั้งหมดโดยไม่ได้คำนึงว่าขนาดของอนุพันธ์จะต้องมีค่ามากเท่าใดแล้ว จะทำให้เกิดขอบของวัตถุจำนวนมากมาย ดังนั้นจึงควรมีการกำหนดค่าขีดจำกัดของขนาดของอนุพันธ์เอาไว้ และเนื่องจากการปรับปรุงภาพโดยวิธีนี้มักมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนได้เร็วมาก จึงควรลดสัญญาณรบกวนในภาพเสียก่อนที่จะนำมาหาขอบของวัตถุในภาพ

รูปแบบทั่วๆไปของอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชัน $f''(x,y)$ ซึ่งใช้ในการหาขอบของวัตถุในภาพก็คือ ลาปลาเซียน (Laplacian) $\nabla^2 f(x,y)$ ซึ่งถูกกำหนดโดย (Lim, 1990)

$$\nabla^2 f(x,y) = \nabla\left(\nabla f(x,y)\right) = \frac{d^2 f(x,y)}{dx^2} + \frac{d^2 f(x,y)}{dy^2} \qquad (31)$$

สำหรับภาพดิจิตอล ค่าของฟังก์ชันจะหมายถึงค่าระดับความเทาของพิกเซลในภาพ ดังนั้น จึงสามารถหาค่าโดยประมาณของอนุพันธ์ใน $L[f(x,y)]$ ได้ด้วยค่าความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซลดังนี้ (Rosenfeld and Kak, 1982)

$$
\begin{aligned}
L[f(x,y)] &= \nabla^2 f(x,y) = \Delta_x^2 f(x,y) + \Delta_y^2 f(x,y) \\
&= \nabla^2 f(x,y) = f_{xx}(x,y) + f_{yy}(x,y) \\
&= \left[f_x(x+1,y) - f_x(x,y)\right] + \left[f_y(x,y+1) - f_y(x,y)\right] \\
&= \left[\left\{f(x+1,y) - f(x,y)\right\} - \left\{f(x,y) - f(x-1,y)\right\}\right] \\
&\quad + \left[\left\{f(x,y+1) - f(x,y)\right\} - \left\{f(x,y) - f(x,y-1)\right\}\right] \\
&= \left[f(x+1,y) - 2f(x,y) + f(x-1,y)\right] + \left[f(x,y+1) - 2f(x,y + f(x,y-1)\right] \\
&= \left[f(x+1,y) + (x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1)\right] - 4f(x,y) \qquad (32)
\end{aligned}
$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของการคอนโวลูชั่นภาพ f(x,y) ด้วยอิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณ h(x,y) ได้ดังนี้ (Lim, 1990)

$$L[f(x,y)] = f(x,y) * h(x,y) \qquad (33)$$

โดยที่ * แทนการคอนโวลูชั่น

h(x,y) เป็นตัวกรองสัญญาณที่มีอิมพัลส์เรสพอนส์เป็น

0	1	0
1	−4	1
0	1	0

การทำให้ภาพคมขึ้นอาจทำได้อีกลักษณะหนึ่ง โดยการหาความแตกต่างระหว่างภาพเดิมกับภาพที่ถูกทำให้พร่ามัว เนื่องจากภาพที่ถูกทำให้พร่ามัวลงนั้น จะมีการตัดส่วนประกอบที่มีความถี่สูงๆในภาพออกไปมากทำให้เหลือส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อเราลบภาพเดิมด้วยภาพที่พร่ามัวจึงเป็นการตัดเอาส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำทิ้งไปมากกว่าและคงเหลือส่วนประกอบที่มีความถี่สูงเอาไว้เป็นจำนวนมาก จึงมีผลทำให้ภาพนั้นคมขึ้น เราสามารถเขียนลักษณะของการทำให้ภาพคมขึ้นได้ด้วยสมการ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$f_H = f - f_L \qquad (34)$$

โดยที่ f_H เป็นภาพที่ถูกทำให้คมขึ้น (highpass filtered image)

f เป็นภาพเดิม (original image)

และ f_L เป็นภาพที่ถูกทำให้พร่ามัว (lowpass filtered image) หรือภาพที่ไม่คม (unsharp image)

หลักการที่ใช้การลบภาพเดิมด้วยภาพที่พร่ามัวนี้เรียกว่าการกรองสัญญาณที่ไม่คมของภาพ (unsharp masking) (Lim, 1990) ซึ่งมักใช้ในการถ่ายภาพและอุตสาหกรรมการพิมพ์ จากหลักการอันนี้สามารถขยายออกไปได้ดังสมการ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$\begin{aligned} f_{HE} &= (A)(f) - f_L \\ &= (A-1)(f) + f - f_L \\ &= (A-1)(f) + f_H \end{aligned} \tag{35}$$

โดยที่ f_{HE} เป็นภาพที่มีการเน้นส่วนประกอบที่มีความถี่สูง หรือขอบของวัตถุให้เด่นชัดมากขึ้น (high-frequency-emphasis image)

f เป็นภาพเดิม

f_L เป็นภาพที่ถูกทำให้พร่ามัว

f_H เป็นภาพที่ถูกทำให้คม

A เป็นค่าแฟคเตอร์ใดๆ

ถ้า A เป็น 1 สมการจะอยู่ในรูปของการกรองสัญญาณที่ไม่คมของภาพ

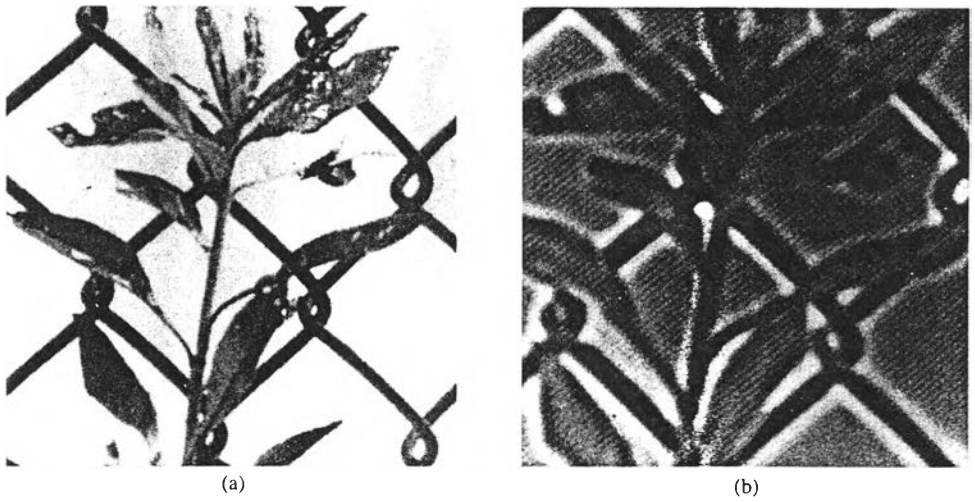
ถ้า $A > 1$ จะเห็นได้ว่า ส่วนของภาพที่ถูกทำให้คมขึ้นจะถูกบวกด้วยภาพเดิม ซึ่งจะเป็นการเน้นขอบของวัตถุในภาพเดิมให้ชัดมากขึ้น ขอบของวัตถุในภาพนี้จะถูกเน้นให้ชัดขึ้นมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าของแฟคเตอร์ A

ถ้าเราพิจารณาการประมาณค่าของลาปลาเซียนด้วยค่าความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซล แล้วจัดให้อยู่ในรูปของ

$$\begin{aligned} L[f(x,y)] &= \left[f(x+1,y)+f(x-1,y)+f(x,y-1)+f(x,y+1)\right] \\ &\quad +\left[-4f(x,y)+5f(x,y)\right]-5f(x,y) \\ &= \left[f(x+1,y)+f(x-1,y)+f(x,y)+f(x,y-1)+f(x,y+1)\right] \\ &\quad -5f(x,y) \\ &= -5\left[f(x,y)-\frac{1}{5}\left\{f(x+1,y)+f(x-1,y)+f(x,y)\right.\right. \\ &\quad \left.\left.+f(x,y-1)+f(x,y+1)\right\}\right] \end{aligned} \tag{36}$$

I17126286

จะเห็นได้ว่า ค่าที่อยู่ในวงเล็บเป็นผลต่างระหว่างค่าระดับความเทาของพิกเซล กับค่าระดับความเทาเฉลี่ยของพิกเซลและพิกเซลในบริเวณใกล้เคียงซึ่งเป็นภาพที่ทำให้ถูกพร่ามัวไป ค่าที่อยู่ในวงเล็บจึงอยู่ในรูปของสมการที่ใช้ในการทำให้ภาพคมขึ้น โดยมีค่าแฟคเตอร์ A เป็น 1 ซึ่งส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำจะถูกดัดทอนออกไปเป็นจำนวนมาก เมื่อเราคูณด้วยค่าแฟคเตอร์ที่เป็นลบจึงได้ภาพที่แสดงเฉพาะบริเวณที่เป็นขอบของวัตถุในภาพเท่านั้น ส่วนบริเวณที่มีค่าระดับความเทาคงที่จะปรากฏเป็นสีดำหรือมีค่าเป็น 0



(a) (b)

ภาพที่ 14 แสดงการหาขอบของวัตถุโดยใช้หลักการของลาปลาเซียน
(a) ภาพเดิม
(b) ภาพที่ได้จากการปรับปรุงโดยใช้ลาปลาเซียน
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 425)

และเช่นเดียวกันเมื่อเราพิจารณาจากการลบภาพเดิมด้วยลาปลาเซียนของภาพที่อยู่ในรูปของสมการ (Rosenfeld and Kak, 1982)

$$f(x,y) - L[f(x,y)] = f(x,y) + 5\left[f(x,y) - \frac{1}{5}\left\{ f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) \right\} \right] \quad (37)$$

ก็จะอยู่ในรูปของสมการที่ใช้ในการทำให้ภาพคมชัดขึ้นเช่นเดียวกันซึ่งจากการพิจารณาค่าที่อยู่ในวงเล็บซึ่งเป็นผลต่างระหว่างภาพเดิมกับภาพที่ถูกทำให้พร่ามัวไปนั้นทำให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงยังคงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก ในขณะที่ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำถูกทำให้เบาบางลงไป ดังนั้น เมื่อเราบวกค่าระดับความเทาของภาพเดิมกับค่าผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งคูณด้วยแฟคเตอร์ตัวหนึ่ง

ที่เป็นบวกแล้ว จึงเป็นการเสริมค่าของส่วนประกอบที่มีความถี่สูงในภาพในขณะที่ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำมีค่าเท่าเดิม ทำให้ขอบของวัตถุในภาพที่ได้นั้นมีลักษณะที่คมมากขึ้น

ดังนั้นในการคำนวณสำหรับภาพดิจิตอล จึงสามารถเขียนสมการ (37) ให้อยู่ในรูปของ

$$\begin{aligned} f(x,y) - L[f(x,y)] &= f(x,y) + 5\left[f(x,y) - \frac{1}{5}\left\{ f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y) \right.\right. \\ &\quad \left.\left. + f(x,y+1) + f(x,y-1) \right\}\right] \\ &= f(x,y) + 5f(x,y) - [f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y) \\ &\quad \left.\left. + f(x,y+1) + f(x,y-1) \right\}\right] \\ &= 5f(x,y) - f(x+1,y) - f(x-1,y) - f(x,y+1) - f(x,y-1) \end{aligned} \tag{38}$$

หรืออยู่ในรูปของการคอนโวลูชั่น ดังนี้ (Rosenfeld and Kak, 1982)

$$f(x,y) - L[f(x,y)] = f(x,y) * h(x,y) \tag{39}$$

โดยที่

$$h(x,y) = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & -1 & 0 \\ \hline -1 & 5 & -1 \\ \hline 0 & -1 & 0 \\ \hline \end{array}$$

ลักษณะของตัวกรองสัญญาณ h(x,y) ที่ใช้ในการหาลาปลาเซียนนี้จะมีลักษณะเช่นไรจะขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณค่าของอนุพันธ์อันดับสองว่าเป็นอย่างไร ซึ่งอาจจะเป็นอิมพัลซ์เรสพอนซ์ของตัวกรองสัญญาณ h(x,y) ในลักษณะอื่นๆได้อีกหลายแบบ (Rosenfeld and Kak, 1982)

2.3 <u>การกรองสัญญาณที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงผ่านได้</u>
(Highpass Filtering)
(Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990; Lindley, 1991; Myler and Weeks, 1993)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าขอบของวัตถุและรายละเอียดที่คมในภาพมีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบที่มีความถี่สูงในฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพ ในขณะที่ภาพที่มีลักษณะพร่ามัวก็มักจะมีส่วนประกอบที่มีความถี่สูงเบาบางกว่าส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำ ดังนั้นจึง

สามารถทำให้ภาพคมขึ้น โดยการกรองสัญญาณที่ทำให้ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำเบาบางลงไปในขณะที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงผ่านไปได้โดยไม่ถูกรบกวน (highpass filtering) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแตกต่างของค่าระดับความเทาในภาพ (Gonzalez and Woods, 1992) แต่จำเป็นต้องระมัดระวังในการใช้เทคนิคเช่นนี้กับภาพที่มีสัญญาณรบกวน (noise) เนื่องจากสัญญาณรบกวนมักจะอยู่ในช่วงของส่วนประกอบที่มีความถี่สูงในฟูเรียร์ทรานสฟอร์มเช่นเดียวกับขอบ ดังนั้นการปรับปรุงภาพวิธีนี้จึงควรถูกจำกัดให้อยู่ในช่วงของส่วนประกอบที่มีความถี่สูงกว่าสัญญาณรบกวน หรือใช้วิธีการกำจัดหรือลดสัญญาณรบกวนในภาพก่อนที่จะนำมาปรับปรุงให้คมขึ้นโดยวิธีนี้

ตัวกรองสัญญาณที่ใช้ในการปรับปรุงภาพในโดเมนของความถี่ จะใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันในการกรองสัญญาณ (filter transfer function) ซึ่งเป็นตัวกรองสัญญาณที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงผ่านไปได้หรือเรียกว่า ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาส (highpass filter) ซึ่งจะช่วยกรองเอาสัญญาณที่อยู่ในช่วงของส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำออกไป การปรับปรุงภาพแบบนี้สามารถทำได้ 2 ลักษณะด้วยกันคือปรับปรุงภาพในโดเมนของความถี่ และปรับปรุงภาพในโดเมนของเวลา

สมมติให้ f(x,y) เป็นภาพเดิม วิธีการปรับปรุงภาพในโดเมนของความถี่จะต้องคำนวณหาฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพเดิมได้เป็น F(u,v) แล้วคูณด้วยตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาส H(u,v) ดังนี้ (จากสมการ (4))

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) \tag{40}$$

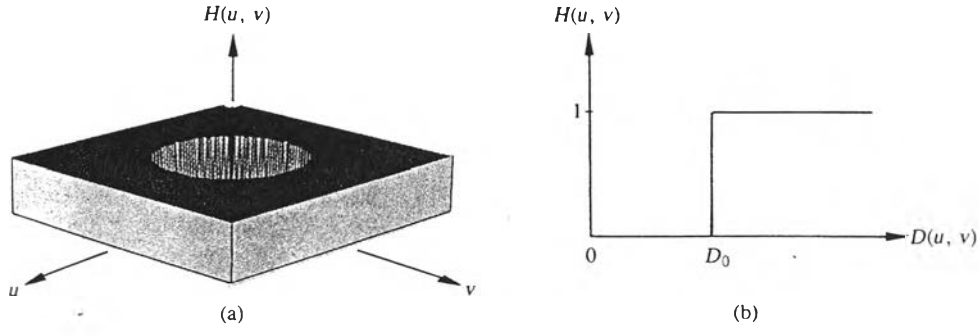
เมื่อได้ผลลัพธ์แล้วจึงคำนวณหาฟูเรียร์ทรานสฟอร์มที่ถูกแปลงกลับ (inverse Fourier transform) ของ G(u,v) เพื่อให้ได้ภาพที่ปรับปรุงแล้ว ซึ่งในการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสนั้น จะมีการกำหนดระยะของความถี่ที่ถูกกรอง (cutoff frequency) D_0 โดยให้สัญญาณที่มีความถี่อยู่ในช่วงระยะที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ D_0 ถูกกรองเอาไว้และสัญญาณที่อยู่ในช่วงระยะที่มากกว่า D_0 ถูกปล่อยให้ผ่านไปจนหมด ดังสมการ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$\begin{aligned} H(u,v) &= 0 \quad \text{ถ้า } D(u,v) \le D_0 \\ &= 1 \quad \text{ถ้า } D(u,v) > D_0 \end{aligned} \tag{41}$$

โดยที่ D_0 เป็นจำนวนที่ไม่เป็นลบ ซึ่งจะเป็นระยะของความถี่ที่ถูกกรอง

$D(u,v)$ เป็นระยะจากจุด (u,v) ไปยังจุดกำเนิด (origin) ของระนาบความถี่ (frequency plane) ซึ่งจะมีระยะเท่ากับ $(u^2+v^2)^{1/2}$

ตัวกรองสัญญาณแบบนี้จะถูกเรียกว่า ตัวกรองสัญญาณที่เท่ากันเป็นวงกลม (circularly symmetric filter) (Myler and Weeks, 1993) เนื่องจากส่วนประกอบของความถี่ทุกๆค่าที่มีระยะห่างจากจุดกำเนิดอยู่ภายในวงกลมที่มีรัศมีเป็นระยะ D_0 จะถูกกรองออกไปในลักษณะเดียวกันและตัวกรองสัญญาณแบบนี้เป็นตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสที่เป็นอุดมคติ (ideal highpass filter)

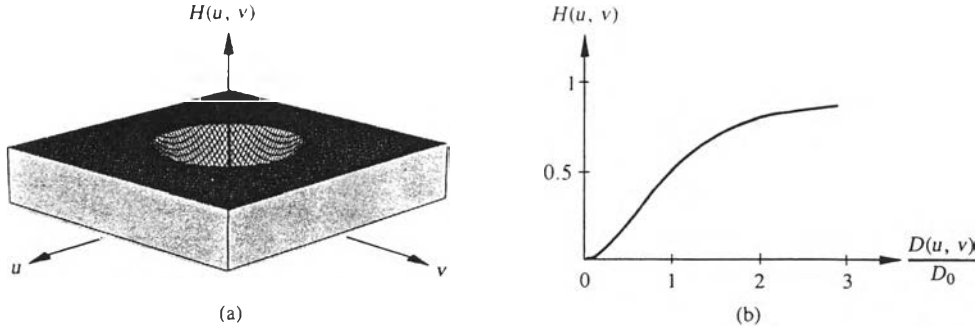


ภาพที่ 15 แสดงตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสที่เป็นอุดมคติ
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 212)

นอกจากจะใช้ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสที่เป็นอุดมคติแล้ว เรายังสามารถใช้ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสที่มีการกำหนดค่าในลักษณะอื่นๆได้ โดยอาจใช้ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสที่มีการกรองสัญญาณไว้เพียงบางส่วนและปล่อยผ่านไปบางส่วน ในช่วงระยะที่ใกล้กับ D_0 ก็ได้ เช่น ตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth filter) ซึ่งจะไม่มีการกำหนดความแตกต่างของค่าที่จุดตัดทิ้ง (cutoff) ระหว่างค่าความถี่ที่ถูกปล่อยผ่านไปและที่ถูกกรองเอาไว้อย่างชัดเจน แต่จะเป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีลักษณะกลมกลืน (smooth) มากกว่า ซึ่งมักจะกำหนดให้ค่าของ H(u,v) ที่ตำแหน่งระยะความถี่ที่ถูกกรอง (cutoff frequency) หรือที่ตำแหน่ง $D(u,v) = D_0$ มีค่าเป็นเศษส่วนค่าหนึ่งของค่าสูงสุดของ H(u,v) ค่าเศษส่วนที่มักจะถูกใช้อยู่เสมอคือ $1/\sqrt{2}$ ของค่าสูงสุดของ H(u,v) (Gonzalez and Woods, 1992) ทำให้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ใช้ในการกรองสัญญาณมีลักษณะเป็น

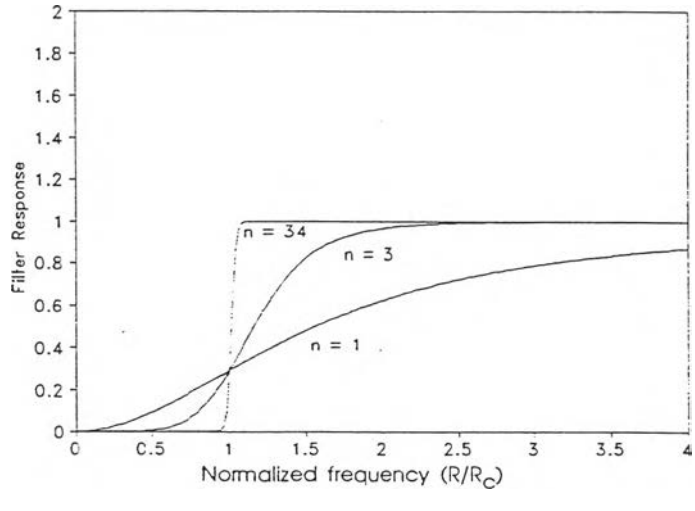
$$H(u,v) = \frac{1}{\left[1 + 0.414\left[\frac{D_0}{D(u,v)}\right]^{2n}\right]} \qquad (42)$$

ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่อ $D(u,v) = D_0$ แล้วค่าของ H(u,v) จะมีค่าลดลงมาเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ ของค่าสูงสุด



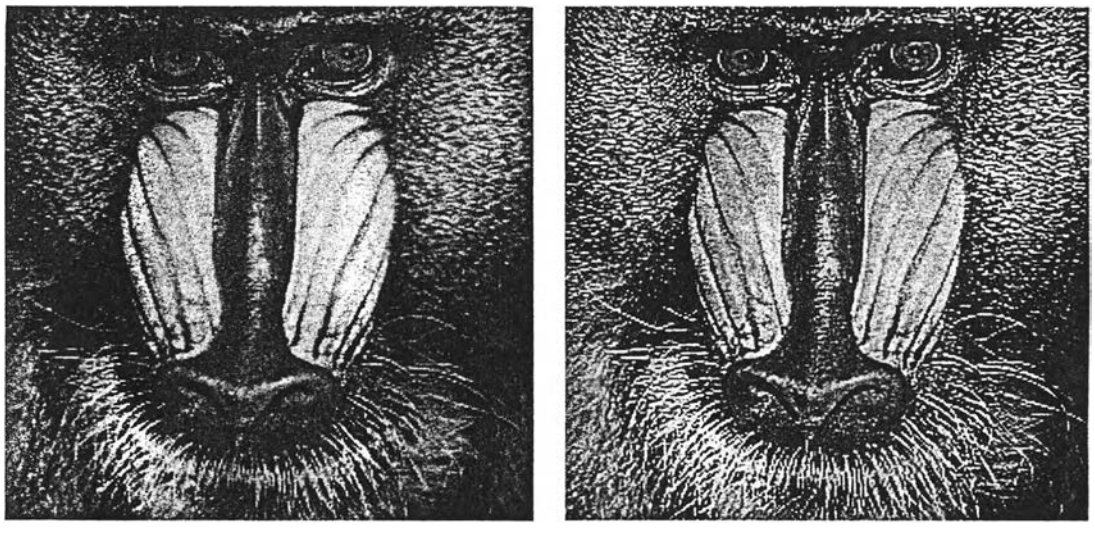
ภาพที่ 16 แสดงตัวกรองสัญญาณไฮพาสแบบบัตเตอร์เวิร์ท
โดยกำหนดค่า n เป็น 1
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 213)

สำหรับเทอม n ในตัวกรองสัญญาณไฮพาสแบบบัตเตอร์เวิร์ทจะเป็นกำลัง (order) ของตัวกรองสัญญาณ ซึ่งบอกให้รู้ถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่างค่าของส่วนประกอบที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่ถูกปล่อยผ่านไปและค่าของส่วนประกอบที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่ถูกกรองเอาไว้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็วเพียงใด ดังที่เราจะสังเกตเห็นว่า เมื่อ n มีค่ามากยิ่งขึ้นเท่าใด ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันก็จะมีลักษณะใกล้เคียงกับตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสที่เป็นอุดมคติมากยิ่งขึ้นเท่านั้น (Myler and Weeks, 1993)



ภาพที่ 17 แสดงลักษณะของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน
ของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ท
ซึ่งกำหนดค่า n เป็นค่าต่างๆ
(ภาพตัวอย่างจาก Myler and Weeks, 1993 หน้า 160)

ภาพที่ได้หลังจากการปรับปรุงด้วยการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสนั้น บางครั้งจะเหลือเพียงส่วนที่เป็นขอบเด่นชัดขึ้นมาในภาพ เนื่องจากส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำถูกทำให้เบาบางลงไปอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้บริเวณที่มีค่าระดับความเทาแตกต่างกันแต่ค่อนข้างจะเรียบปรากฏอยู่ในภาพที่ถูกปรับปรุงแล้วในลักษณะที่เกือบจะเหมือนกัน เทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาในลักษณะเช่นนี้ จะเรียกว่า การเน้นข้อมูลในช่วงส่วนประกอบที่มีความถี่สูง (high-frequency emphasis) (Gonzalez and Woods, 1992) ซึ่งจะเพิ่มค่าคงที่ (เช่นค่า 1) ให้กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาส เพื่อช่วยรักษาส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำเอาไว้ให้มีค่าคงเดิมหรือใกล้เคียงกับค่าเดิม ซึ่งจะทำให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงมีค่ามากขึ้นกว่าการแปลงค่าแบบเดิม การลบภาพเดิมด้วยค่าลาปลาเซียนของภาพ จะเป็นตัวอย่างอันหนึ่งของการเน้นข้อมูลในช่วงส่วนประกอบที่มีความถี่สูงที่ทำในโดเมนของเวลา แม้ว่าการใช้เทคนิคแบบนี้จะช่วยทำให้ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำยังคงเดิมอยู่ แต่เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงมักจะมีจำนวนมากกว่าจึงปิดบังผลลัพธ์ที่ได้ ทำให้ภาพถูกปรับปรุงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น วิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งก็คือ ทำการปรับปรุงภาพที่ได้ซ้ำอีกครั้งเพื่อกระจายค่าระดับความเทาในภาพเสียใหม่โดยใช้เทคนิคที่เหมาะสม เช่น ใช้การดัดแปลงแก้ไขฮีสโตแกรมที่มีการกำหนดให้ฮีสโตแกรมเท่ากัน เป็นต้น



(a) (b)

ภาพที่ 18 แสดงการกรองสัญญาณโดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาส
(a) ภาพเดิม
(b) ภาพที่ได้จากการปรับปรุงโดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาส
(ภาพตัวอย่างจาก Lim, 1990 หน้า 463)

วิธีการปรับปรุงภาพอีกลักษณะหนึ่งซึ่งสามารถทำได้ในโดเมนของเวลาจะใช้การคำนวณหาการคอนโวลูชั่น ระหว่างภาพเดิมกับฟูเรียร์ทรานสฟอร์มที่ถูกแปลงกลับ (inverse Fourier transform) ของตัวกรองสัญญาณ H(u,v) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ (จากสมการ (2))

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \qquad (43)$$

โดยที่ g(x,y) เป็นภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว

f(x,y) เป็นภาพเดิม

h(x,y) เป็นฟูเรียร์ทรานสฟอร์มที่ถูกแปลงกลับของตัวกรองสัญญาณ H(u,v)

จากภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าอิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสในโดเมนของเวลา (spatial highpass filter) จะมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวกในบริเวณที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางและมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบในบริเวณอื่นๆที่อยู่รอบๆ คุณสมบัติข้อหนึ่งที่สำคัญคือ ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณแบบไฮพาสจะเท่ากับหนึ่ง เพื่อที่จะทำให้เรสพอนส์ทางความถี่ (frequency response) ของตัวกรองสัญญาณที่ความถี่ (0,0) มีค่าเป็น 1 (Lim, 1990) ซึ่งจะช่วยรักษาค่าระดับความเทาโดยเฉลี่ยของภาพเอาไว้ โดยเมื่อตัวกรองสัญญาณถูกเลื่อนผ่านไปในบริเวณที่มีค่าระดับความเทาคงที่ ค่าระดับความเทาของพิกเซลจะยังคงเป็นค่าเดิม

3. <u>การทำให้ภาพดูเนียน และการกำจัดสัญญาณรบกวน</u>

(Smoothing และ Noise Clearing หรือ Noise Removing)

(Gonzalez and Woods, 1992; Rosenfeld and Kak, 1982)

การปรับปรุงภาพแบบนี้เป็นการกำจัด หรือลดสัญญาณรบกวนหลายๆชนิดที่เกิดขึ้นในภาพดิจิตอล รวมไปถึงเส้นเงาที่มีลักษณะไม่ถูกต้อง (false contour) ที่เกิดจากการแบ่งช่วงของค่าระดับความเทาที่หยาบเกินไปด้วย นอกจากนั้นยังช่วยลดรายละเอียดที่ไม่จำเป็นในภาพออกไป ทำให้ภาพนั้นมองดูเนียนขึ้น ซึ่งสามารถทำได้ง่ายแต่ถ้าขาดการพิจารณาที่ดีในการเลือกใช้เทคนิคก็อาจทำให้ลักษณะสำคัญที่น่าสนใจในภาพพร่ามัวไปได้ ดังนั้นจึงต้องหาวิธีที่ทำให้ภาพดูเนียนขึ้นโดยที่ยังรักษาความคมของขอบและเส้นที่ปรากฏอยู่ในภาพเอาไว้ (Rosenfeld and Kak, 1982) สำหรับเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการกำจัดหรือลดสัญญาณรบกวน หรือทำให้ภาพดูเนียนขึ้นนั้น มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังนี้ คือ

3.1 การเฉลี่ยค่าหรือการกรองสัญญาณโดยใช้ค่าเฉลี่ย

(Averaging หรือ Mean Filtering)

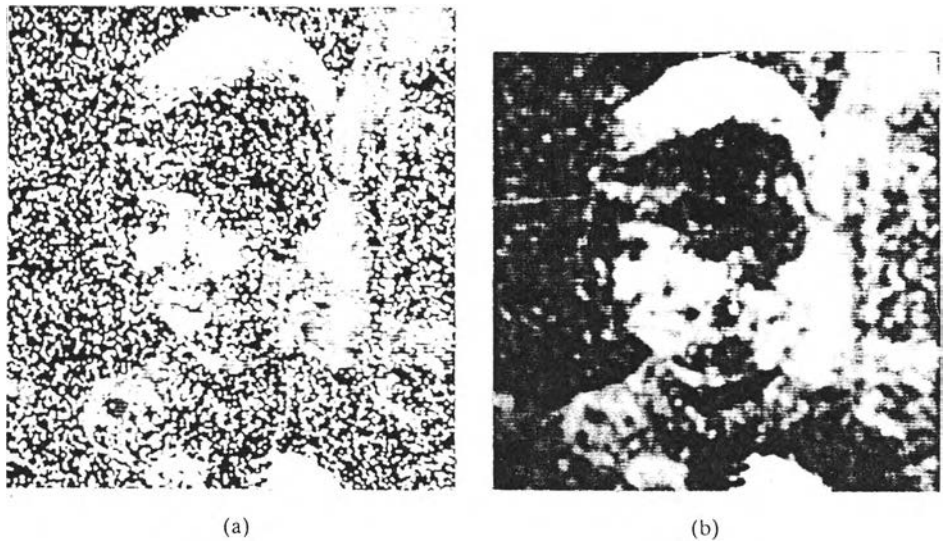
(Gonzalez and Wintz, 1977; Gonzalez and Woods, 1992; Rosenfeld and Kak, 1982)

การปรับปรุงภาพแบบนี้เป็นวิธีที่ทำให้ภาพดูเนียนขึ้นโดยใช้การเฉลี่ยค่าระดับความเทาของภาพ ซึ่งจะทำให้สัญญาณรบกวนเบาบางลง แต่เนื่องจากว่าการเฉลี่ยค่าทำให้ภาพพร่ามัวลง จึงต้องระมัดระวังในการใช้งานเพื่อจะได้ไม่ทำให้รายละเอียดที่คม เช่น เส้นหรือขอบของวัตถุมีลักษณะเลวลงไปได้ การเฉลี่ยค่าระดับความเทานี้เป็นเทคนิคในการทำให้ภาพดูเนียนที่เกิดขึ้นในโดเมนของเวลา โดยจะกำหนดให้ค่าระดับความเทาใหม่ของพิกเซล (x,y) ทุกๆพิกเซลมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง (neighborhood) กับพิกเซล (x,y) นั้น สำหรับขนาดของบริเวณใกล้เคียงของพิกเซล (x,y) ที่ใช้ในการเฉลี่ยค่านี้จะขึ้นอยู่กับระดับของการลดสัญญาณรบกวนที่ต้องการ ถ้าใช้ขนาดของบริเวณใกล้เคียงใหญ่ขึ้นจะทำให้ลดสัญญาณรบกวนได้มากแต่ก็ทำให้ภาพมีลักษณะที่พร่ามัวลงไป จึงต้องมีการทดลองกำหนดขนาดที่เหมาะสมในการกรองสัญญาณ และนอกจากนั้น ถ้าสัญญาณรบกวนมีลักษณะที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณภาพ อาจต้องมีการใช้ขนาดของบริเวณใกล้เคียงที่แตกต่างกันในการหาค่าของแต่ละพิกเซล โดยขนาดของบริเวณใกล้เคียงที่เลือกใช้จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของค่าระดับความเทาในบริเวณใกล้เคียงนั้นด้วย เพื่อจะได้ทำให้เกิดการลดสัญญาณรบกวนในลักษณะเท่าๆกันตลอดทั้งภาพ

นอกจากนั้น ยังสามารถลดการพร่ามัวที่เกิดขึ้นจากการเฉลี่ยค่าได้ โดยกำหนดค่าขีดจำกัดของความแตกต่างของพิกเซลจากพิกเซลข้างเคียง ซึ่งจะช่วยลดลักษณะของการพร่ามัวลงโดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเทาของพิกเซลก็ต่อเมื่อพิกเซลนั้นมีค่าแตกต่างจากพิกเซลข้างเคียงมากกว่าค่าขีดจำกัดที่ได้กำหนดไว้ (Gonzalez and Wintz, 1977)

จากเบื้องต้นที่ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงภาพทั้งในโดเมนของเวลาและในโดเมนของความถี่จะเห็นได้ว่าการเฉลี่ยค่านี้เป็นการกรองสัญญาณแบบโลว์พาสในโดเมนของเวลา (lowpass spatial filtering) แบบหนึ่งซึ่งเป็นการทรานสฟอร์มกลับของการกรองสัญญาณที่ปล่อยให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านไปได้(lowpass filtering) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณต้องมีค่าเป็นค่าบวกเท่านั้น ซึ่งลักษณะตัวกรองสัญญาณที่ง่ายที่สุด คือ กำหนดให้สัมประสิทธิ์ทุกค่าของตัวกรองสัญญาณมีขนาดเป็น 1 เท่ากัน แต่เนื่องจากการคอนโวลูชั่นของตัวกรองสัญญาณความถี่สูงจะให้ค่าที่เป็นผลรวมของค่าระดับความเทาทั้งหมดใน

บริเวณใกล้เคียงซึ่งอาจเป็นค่าที่เกินช่วงระยะเกรย์สเกลได้จึงหารค่านั้นด้วยจำนวนของพิกเซลทั้งหมดในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งก็คือค่าเฉลี่ยของค่าระดับความเทาของพิกเซลในบริเวณใกล้เคียงนั่นเอง



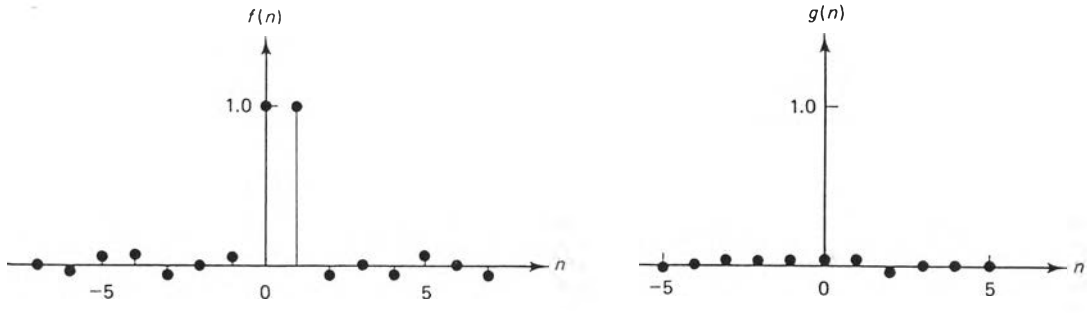
(a) (b)

ภาพที่ 19 แสดงการกรองสัญญาณโดยใช้ค่าเฉลี่ย
(a) ภาพเดิมที่มีสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์
(b) ภาพที่ได้จากการกรองสัญญาณโดยใช้ค่าเฉลี่ย
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 194)

3.2 <u>การกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐาน</u> (Median Filtering)
(Gonzalez and Woods, 1992; Lim, 1990; Rosenfeld and Kak, 1982)

การกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐานเป็นเทคนิคที่ใช้ในการทำให้ภาพดูเนียนขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ในการกำจัดหรือลดสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะเป็นอิมพัลส์ (impulse) หรือสัญญาณรบกวนแบบซอลท์แอนด์เพพเพอร์ (salt-and-pepper) ที่มีลักษณะเป็นพิกเซลที่มีค่าระดับความเทาแตกต่างจากพิกเซลข้างเคียง โดยไม่ทำให้ขอบของวัตถุในภาพพร่ามัวไป (Lim, 1990)

ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน เป็นตัวกรองสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการกำหนดขนาดบริเวณใกล้เคียงของพิกเซล การใช้เทคนิคแบบนี้จะต้องมีการจัดเรียงลำดับ (sort) ค่าระดับความเทาของพิกเซลที่ถูกกระทำและพิกเซลอื่นๆในบริเวณใกล้เคียงเสียก่อน แล้วจึงพิจารณากำหนดให้ค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซลเป็นค่าระดับความเทาที่เป็นค่ามัธยฐาน ซึ่งจะเป็นค่าที่อยู่ตรงกลางเมื่อค่าระดับความเทาถูกจัดเรียงลำดับแล้ว การใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน (median filter) นี้ไม่ทำให้ขอบของวัตถุในภาพพร่ามัวไป จึงสามารถใช้วิธีนี้ซ้ำๆกันได้หลายครั้ง (Rosenfeld and Kak, 1982)

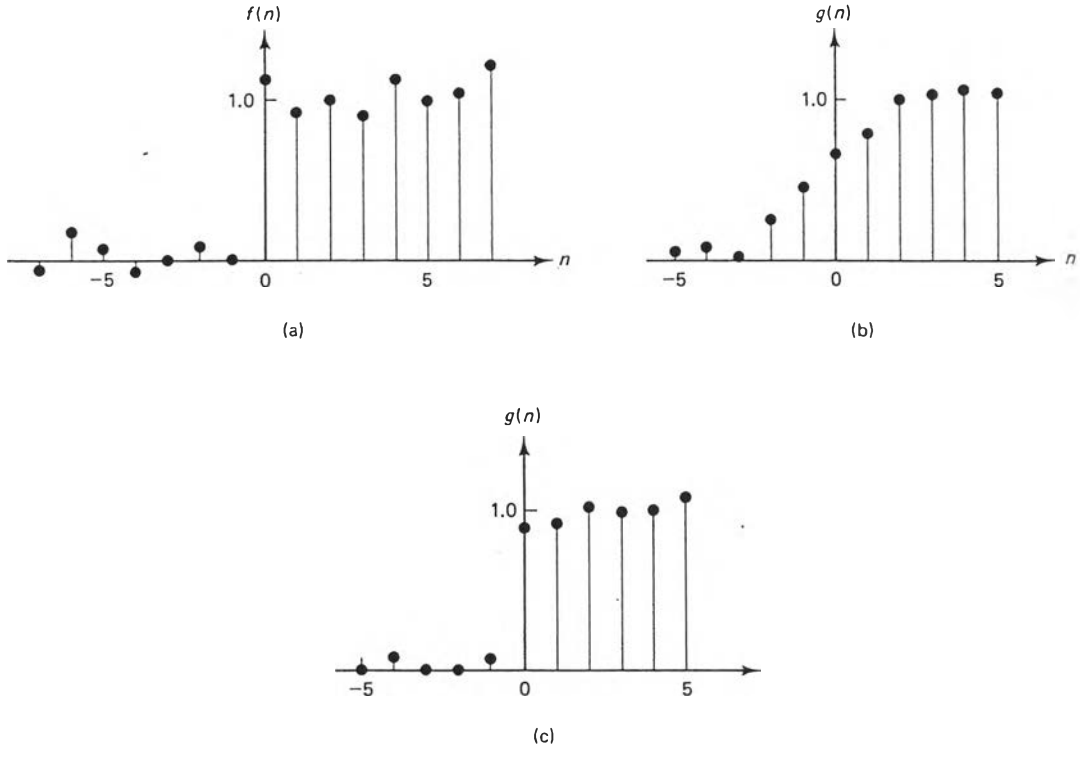


ภาพที่ 20 แสดงการกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐานซึ่ง
ช่วยลดสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะเป็นอิมพัลส์
หรือ ซอลท์แอนด์เพพเพอร์
(ภาพตัวอย่างจาก Lim, 1990 หน้า 473)

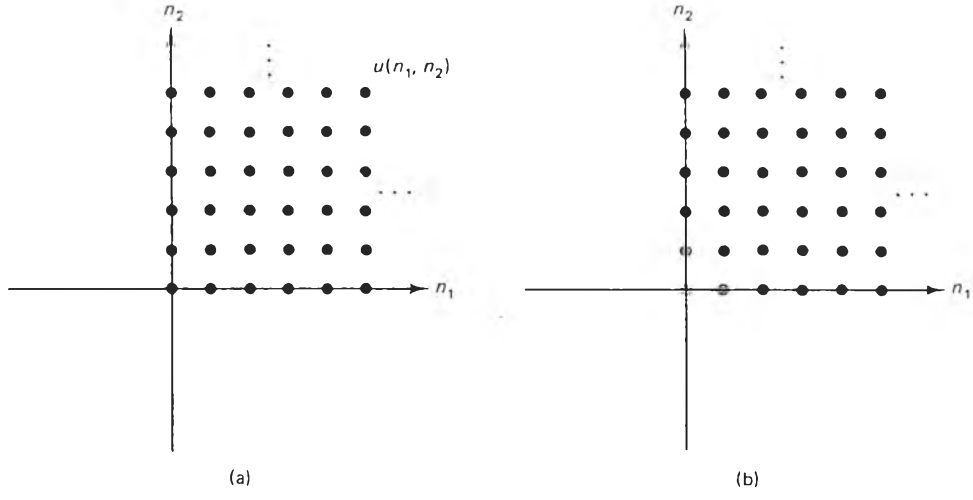
พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานเพื่อปรับภาพ ก็คือ ขนาดของตัวกรองสัญญาณ (หรือขนาดของบริเวณใกล้เคียงของพิกเซล) ที่ใช้ในการหาค่ามัธยฐาน ถ้าเราใช้ขนาดของตัวกรองสัญญาณที่เล็กเกินไปก็จะไม่มีผลกระทบต่อพิกเซลที่มีลักษณะเป็นอิมพัลซ์ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน จึงต้องใช้ขนาดของตัวกรองสัญญาณที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้น การเลือกขนาดของตัวกรองสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพ แต่เนื่องจากเป็นการยากที่จะเลือกขนาดของตัวกรองสัญญาณที่ให้ผลดีที่สุดได้ จึงจำเป็นต้องทดลองใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานหลายขนาดที่แตกต่างกันและเลือกขนาดที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด

ถ้าพิกเซลบางพิกเซลในภาพมีค่าระดับความเทาแตกต่างจากพิกเซลที่อยู่รอบข้าง โดยมีลักษณะเป็นอิมพัลซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณรบกวนแล้ว การใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานจะเป็นการช่วยลดสัญญาณรบกวน แต่ถ้าพิกเซลเหล่านั้นเป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณภาพ ก็จะเป็นการบิดเบือนสัญญาณภาพให้ผิดเพี้ยนไป ดังนั้นปัญหาอันหนึ่งของการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานกับภาพ ก็คือ จะทำให้เส้นที่มีลักษณะบาง หรือพิกเซลที่อยู่โดดเดี่ยวจากพิกเซลอื่นๆถูกทำลายไปและนอกจากนั้นยังตัดส่วนที่เป็นมุมที่คมในภาพทิ้งไปด้วย ดังนั้นจึงควรใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานกับภาพที่ไม่มีเส้นบางๆหรือมุมที่คม

วิธีหนึ่งที่อาจช่วยรักษาลักษณะที่เป็นมุมที่คมเช่นนี้เอาไว้ได้ คือการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน 1 มิติตามแนวนอน (horizontal direction) กับภาพก่อน แล้วใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน 1 มิติตามแนวตั้ง (vertical direction) กับภาพอีกครั้ง ซึ่งการกรองสัญญาณแบบนี้เรียกว่า การกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐานแบบแยกส่วน (seperable median filtering) หรืออาจใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานที่มีลักษณะเป็นรูปกากบาท (cross-shaped) กับภาพก็ได้



ภาพที่ 21 แสดงการกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐานแบบ 1-D ซึ่งช่วยรักษาขอบของภาพไว้
(a) ลักษณะสัญญาณเดิม
(b) สัญญาณที่ถูกกรองโดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาส
(c) สัญญาณที่ถูกกรองโดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน
(ภาพตัวอย่างจาก Lim, 1990 หน้า 472)

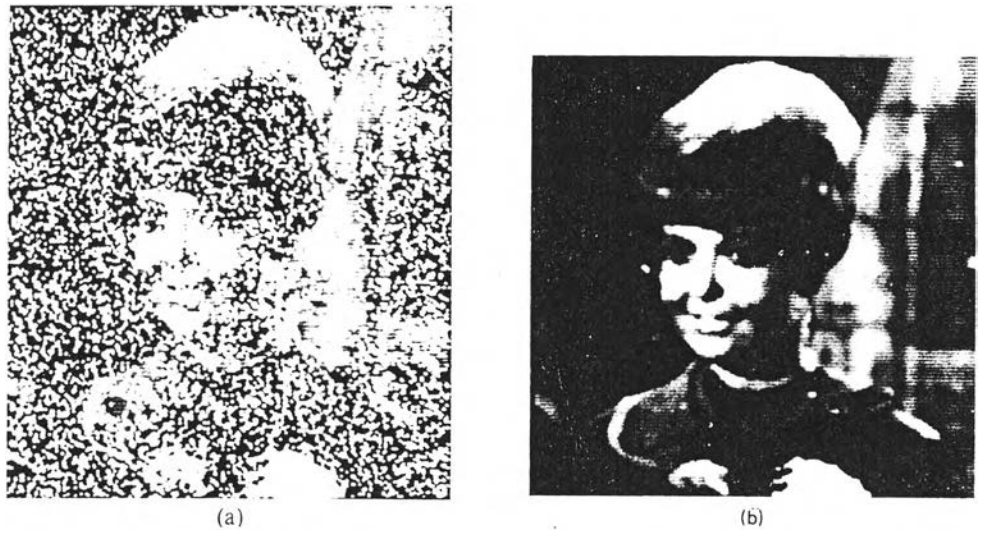


ภาพที่ 22 แสดงการกรองสัญญาณซึ่งทำให้มุมที่คมของภาพหายไป

(a) ลักษณะสัญญาณเดิม

(b) สัญญาณที่ถูกกรองโดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน

(ภาพตัวอย่างจาก Lim, 1990 หน้า 474)



ภาพที่ 23 แสดงการกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐาน

(a) ภาพเดิมที่มีสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์

(b) ภาพที่ได้จากการกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐาน

(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 194)

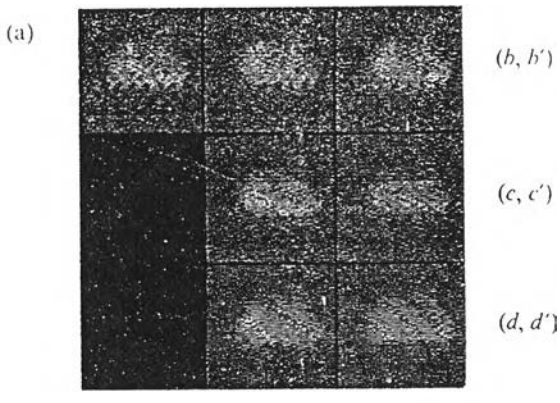
ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งในการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน คือ จะต้องมีการจัดเรียงลำดับข้อมูลก่อนแล้วจึงแทนค่าระดับความเทาด้วยค่าระดับความเทาที่เป็นค่ากึ่งกลางได้ ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณมากมายทำให้เสียเวลาในการใช้งาน ถ้าขนาดของตัวกรองสัญญาณยิ่งใหญ่ขึ้นก็ยิ่งใช้เวลาในการจัดเรียงลำดับข้อมูลมากขึ้น วิธีหนึ่งที่ช่วยลดการคำนวณสามารถทำได้โดยการแบ่งขนาดของตัวกรองสัญญาณหรือขนาดของบริเวณใกล้เคียงนี้ออกเป็นส่วนย่อยๆ แล้วทำการจัดเรียงลำดับหาค่ามัธยฐานภายในบริเวณย่อยๆเหล่านี้ แล้วจึงนำค่าที่ได้มาจัดเรียงลำดับหาค่ามัธยฐานของค่าเหล่านี้อีกทีหนึ่ง ค่ามัธยฐานที่ได้นี้แม้จะไม่ได้เป็นค่ากึ่งกลางที่ถูกต้อง แต่ก็เป็นการประมาณค่าอีกแบบหนึ่งที่สามารถนำไปใช้งานได้ (Rosenfeld and Kak, 1982) จะเห็นได้ว่าการกรองสัญญาณโดยใช้ค่ามัธยฐานนี้ แม้จะมีจุดบกพร่องในการใช้งานอยู่บ้างแต่ก็อาจสามารถแก้ไขได้และยังเป็นวิธีที่ดีในการกำจัดสัญญาณรบกวนในภาพโดยไม่ทำให้ขอบของวัตถุในภาพพร่ามัวไป

3.3 <u>การกรองสัญญาณโดยใช้ค่าต่ำสุด/สูงสุด</u> (Min/Max Filtering)
(Rosenfeld and Kak, 1982)

การกรองสัญญาณแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานในการแทนค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซล แต่ค่าที่ถูกนำมาใช้จะเป็นค่าระดับความเทาที่มีค่าต่ำสุดหรือสูงสุดของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งใช้หลักการของการลดหรือเพิ่มค่าระดับความเทาโดยขึ้นกับค่าระดับความเทาต่ำสุดหรือสูงสุดของพิกเซลบริเวณใกล้เคียงในขณะนั้นของภาพ

ถ้าสมมติให้ภาพดิจิตอลมีพิกเซลหรือบริเวณเล็กๆบริเวณหนึ่งที่มีค่าระดับความเทาสูง (สว่าง) กระจายอยู่บนส่วนฉากหลังของภาพ (background) ที่มีค่าระดับความเทาต่ำ (มืด) แล้ว เราสามารถที่จะกำจัดบริเวณที่มีระดับความเทาสูงเหล่านี้ออกไป โดยการแทนค่าระดับความเทาของพิกเซลด้วยค่าระดับความเทาที่ต่ำที่สุดของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงนั้นซ้ำๆกันหลายครั้ง ซึ่งมีผลทำให้พิกเซล หรือบริเวณเล็กๆที่มีค่าระดับความเทาสูงเหล่านี้หายไป แต่ก็อาจทำให้บริเวณที่มีค่าระดับความเทาสูงในบริเวณส่วนอื่นๆที่มีขนาดใหญ่ลดขนาดลงไปได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้น เพื่อเป็นการปรับให้บริเวณที่มีค่าระดับความเทาสูงเหล่านี้กลับคืนมาอยู่ในขนาดที่เหมาะสม จึงต้องทำการแทนค่าระดับความเทาของพิกเซลด้วยค่าระดับความเทาที่สูงที่สุดของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงนั้นซ้ำๆกันในจำนวนที่เท่ากัน เพื่อเป็นการขยายบริเวณเหล่านี้กลับคืนมา และเช่นเดียวกัน ถ้าภาพดิจิตอลมีลักษณะที่ตรงกันข้าม คือ มีบริเวณเล็กๆที่มีค่าระดับความเทาต่ำกระจายอยู่บนส่วนฉากหลังของภาพที่มีค่าระดับความเทาสูง ก็สามารถกำจัดบริเวณเล็กๆที่มีค่าระดับความเทาต่ำนี้

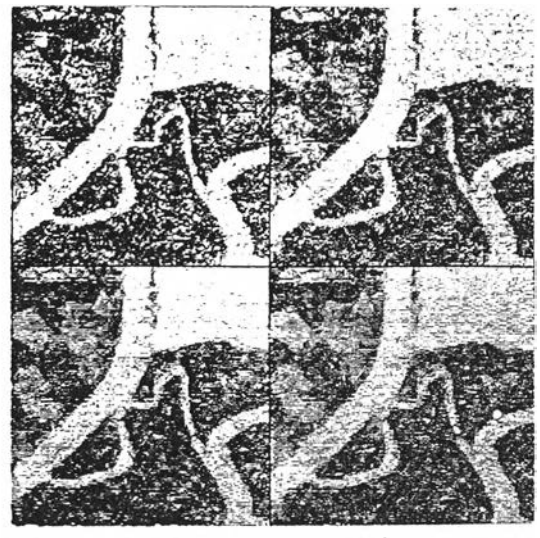
ออกไปได้โดยใช้ค่าระดับความเทาที่สูงที่สุดของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงก่อน แล้วจึงใช้ค่าระดับความเทาที่ต่ำที่สุดของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงในจำนวนที่เท่ากัน เพื่อให้บริเวณต่างๆ ในภาพกลับคืนมาอยู่ในขนาดที่เหมาะสมได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน (Rosenfeld and Kak, 1982)



ภาพที่ 24 แสดงการกรองสัญญาณโดยใช้ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด
(a) ภาพเดิม
(b,b') - (d,d') ภาพที่ได้จากการกรองสัญญาณโดยใช้ค่าต่ำสุด แล้วจึงใช้การกรองสัญญาณโดยใช้ค่าสูงสุดจำนวนทีละ 1 ครั้ง, 2 ครั้ง และ 3 ครั้ง ตามลำดับ
(ภาพตัวอย่างจาก Rosenfeld and Kak หน้า 264)

3.4 <u>การกรองสัญญาณโดยใช้ค่าฐานนิยม</u> (Mode Filtering)
(Rosenfeld and Kak, 1982)

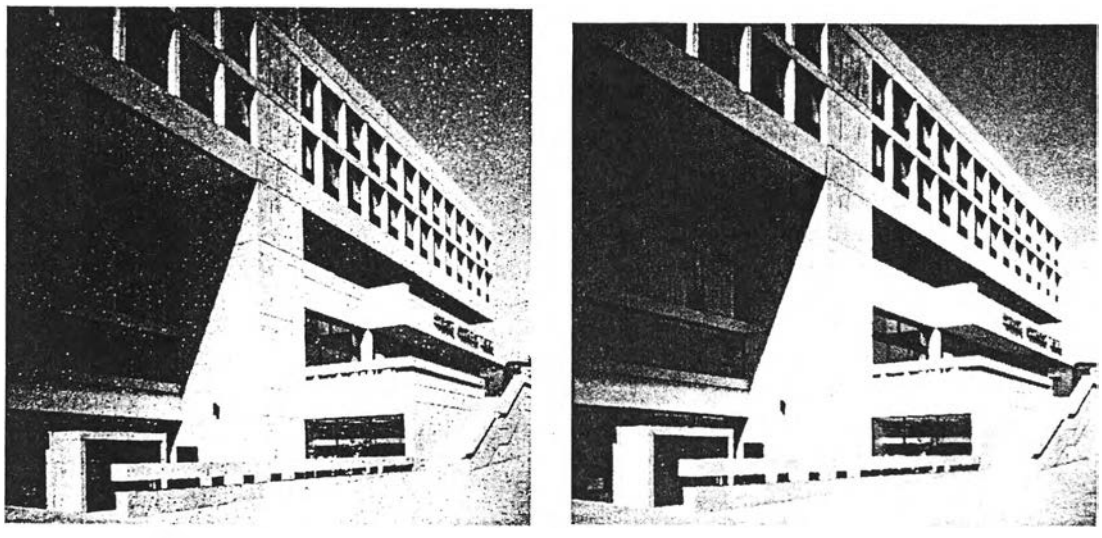
วิธีนี้มีลักษณะคล้ายกับการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐานในการแทนค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซลเช่นเดียวกัน แต่ค่าที่ถูกนำมาใช้จะเป็นค่าฐานนิยม (mode) ของค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งค่าฐานนิยมนี้จะเป็นค่าระดับความเทาที่เกิด ขึ้นบ่อยที่สุดในบริเวณใกล้เคียงนั้น หมายความว่า เป็นค่าระดับความเทาของพิกเซลส่วนใหญ่ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงนั้น ถ้าค่าฐานนิยมมีมากกว่า 1 ค่า ก็สามารถที่จะเลือกเอาค่าใดค่าหนึ่งมาใช้ในการแทนค่าก็ได้ เช่น อาจเลือกเอาค่าฐานนิยมที่มีค่าระดับความเทาต่ำสุดหรือสูงสุดเป็นต้น ภาพที่ได้จากการปรับปรุงโดยกำหนดให้ค่าฐานนิยมเป็นค่าระดับความเทาค่าใหม่ของพิกเซลในภาพนี้จะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนในภาพออกไป แต่ก็มักทำให้ภาพมีลักษณะที่เป็นลายพร้อยมากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 25 แสดงการกรองสัญญาณโดยใช้ค่าฐานนิยม
(ภาพตัวอย่างจาก Rosenfeld and Kak หน้า 262)

3.5 <u>การปรับค่าระดับความเทาของพิกเซลที่มีความแตกต่างเกินกว่าค่าขีดจำกัด</u>
(Out-range Pixel Smoothing)
(Gonzalez and Wintz, 1977; Lim, 1990)

การปรับปรุงภาพในลักษณะนี้เป็นการปรับปรุงที่ไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน การปรับค่าของพิกเซลที่มีความแตกต่างเกินกว่าค่าขีดจำกัดจะมีประโยชน์ในการลดสัญญาณรบกวนแบบซอลท์แอนด์เพพเพอร์ โดยการกำหนดค่าขีดจำกัด T และขนาดของบริเวณใกล้เคียงของพิกเซลในภาพ แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่าระดับความเทาของพิกเซลอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงนั้น โดยไม่รวมค่าระดับความเทาของพิกเซลที่ต้องการจะปรับปรุง ถ้าค่าระดับความเทาเดิมของพิกเซลมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยเกินกว่าขีดจำกัดที่กำหนดให้แล้ว ค่าระดับความเทาของพิกเซลจะถูกแทนด้วยค่าเฉลี่ยนั้น แต่ถ้าค่าระดับความเทาเดิมของพิกเซลแตกต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดให้ ค่าระดับความเทาของพิกเซลจะยังคงเป็นค่าเดิม (Lim, 1990) การหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการปรับปรุงภาพนั้นทำได้ยาก จึงควรที่จะทดลองปรับปรุงภาพโดยใช้ค่าขีดจำกัด และขนาดของบริเวณใกล้เคียงหลายๆค่าที่แตกต่างกันแล้วเลือกเอาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด



(a) (b)

ภาพที่ 26 แสดงการปรับค่าระดับความเทาของพิกเซล
ที่มีความแตกต่างเกินกว่าค่าขีดจำกัด
(a) ภาพเดิมที่มีสัญญาณรบกวนแบบซอลท์แอนด์เพพเพอร์
(b) ภาพที่ได้จากการปรับค่าระดับความเทาของพิกเซล
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 477)

3.6 <u>การกำจัดสัญญาณรบกวนที่แตกต่างจากพิกเซลใกล้เคียงกัน k พิกเซล</u>
(Rosenfeld and Kak, 1982)

การปรับปรุงภาพในลักษณะนี้เป็นการกำจัดสัญญาณรบกวนอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสำหรับภาพที่มีสัญญาณรบกวนที่เป็นลักษณะแบบอิมพัลส์ หรือ ซอลท์แอนด์เพพเพอร์ซึ่งมักจะเป็นพิกเซลที่อยู่โดดเดี่ยวโดยมีค่าระดับความเทาแตกต่างจากพิกเซลใกล้เคียง การกำจัดสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้จะต้องมีการตรวจสอบว่าพิกเซลใดที่เป็นสัญญาณรบกวนในภาพ โดยใช้การเปรียบเทียบค่าระดับความเทาของพิกเซลกับค่าระดับความเทาของพิกเซลอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ถ้าค่าระดับความเทาของพิกเซลนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าระดับความเทาของพิกเซลอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมดเป็นค่าจำนวนหนึ่งแล้ว ก็สามารถกำหนดให้พิกเซลนั้นเป็นสัญญาณรบกวนในภาพได้ ซึ่งเราสามารถกำจัดมันออกไปโดยการแทนค่าระดับความเทาของพิกเซลนั้นด้วยค่าระดับความเทาเฉลี่ยของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง (Rosenfeld and Kak, 1982)

วิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบนี้ จะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์หลายค่า ซึ่งสามารถปรับค่าให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนได้ พารามิเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วย ขนาดของบริเวณใกล้เคียง, ค่าขีดจำกัด T และจำนวน k โดยมีข้อกำหนดว่า พิกเซลที่ถูกกำหนดให้เป็นสัญญาณรบกวนจะต้องมีค่าระดับความเทาที่แตกต่างจากค่าระดับความเทาของพิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ด้วยขนาดที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าขีดจำกัด T และจะต้องมีค่าระดับความเทาแตกต่างจากพิกเซลอื่นๆในบริเวณใกล้เคียงด้วยค่าขีดจำกัดนี้เป็นจำนวนอย่างน้อย k พิกเซล ถ้าพิกเซลใดมีคุณสมบัติไม่ตรงตามข้อกำหนดก็จะไม่ถูกจัดเป็นสัญญาณรบกวนในภาพและค่าระดับความเทาของพิกเซลจะยังคงเป็นค่าเดิม แต่ถ้าพิกเซลใดมีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดก็จะถูกจัดเป็นสัญญาณรบกวนและค่าระดับความเทาของพิกเซลจะถูกแทนด้วยค่าเฉลี่ยของค่าระดับความเทาของพิกเซลอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงนั้น การกำจัดสัญญาณรบกวนแบบนี้จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับการปรับค่าระดับความเทาของพิกเซลที่มีความแตกต่างเกินกว่าค่าขีดจำกัดมาก แต่จะแตกต่างกันตรงค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบซึ่งใช้ค่าระดับความเทาของพิกเซลโดยตรงแทนที่จะใช้ค่าเฉลี่ย และยังกำหนดให้แตกต่างจากพิกเซลเป็นจำนวนหนึ่งด้วย

การเลือกค่าพารามิเตอร์ k อย่างเหมาะสม จะมีความสำคัญมากในการแยกความแตกต่างระหว่างพิกเซลที่เป็นสัญญาณรบกวนกับพิกเซลที่อยู่บนเส้นหรือขอบของวัตถุในภาพโดยที่พิกเซลที่อยู่บนเส้นหรือขอบของวัตถุในภาพจะมีค่าระดับความเทาที่แตกต่างจากพิกเซลอื่นๆจำนวนหนึ่ง แต่ไม่ควรที่จะแตกต่างจากพิกเซลอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงเกือบทั้งหมด ในขณะที่สัญญาณรบกวนมักจะมีค่าระดับความเทาแตกต่างจากพิกเซลอื่นๆในบริเวณใกล้เคียงเกือบทั้งหมด

3.7 <u>การกรองสัญญาณที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำผ่านได้</u>

(Lowpass Filtering)

(Gonzalez and Woods, 1992; Myler, 1993)

การปรับปรุงภาพในลักษณะนี้ใช้หลักการทำนองเดียวกับการกรองสัญญาณที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงผ่านได้ โดยพิจารณาจากการที่ขอบของวัตถุและรายละเอียดที่คมรวมไปถึงสัญญาณรบกวนที่อยู่ในภาพดิจิตอลมักจะทำให้เกิดค่าที่มีความถี่สูงเมื่อทำฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม ดังนั้นจึงสามารถทำให้สัญญาณภาพเหล่านั้นพร่ามัวลงไปได้ด้วยการทำให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงเหล่านี้เบาบางลงไป โดยใช้ตัวกรองสัญญาณที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำผ่านไปได้ หรือเรียกว่าตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาส (lowpass filter) ซึ่งจะมีลักษณะตรงข้ามกันกับการกรองสัญญาณที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงผ่านไปได้ คือ จะกรองเอาสัญญาณที่อยู่ในช่วงของส่วนประกอบที่มีความถี่สูงออกไป และปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่

ต่ำผ่านไปได้ซึ่งมีผลทำให้ส่วนที่เป็นขอบหรือรายละเอียดที่คมหรือสัญญาณรบกวนที่อยู่ในภาพถูกตัดทอนออกไป การปรับปรุงภาพแบบนี้สามารถทำได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกัน คือ การปรับปรุงภาพในโดเมนของความถี่และปรับปรุงภาพในโดเมนของเวลา

การกรองสัญญาณในโดเมนของความถี่นี้ จะต้องมีการคำนวณหาฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพเดิมเสียก่อน แล้วคูณด้วยทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาส ดังสมการ (จากสมการ (4))

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) \tag{44}$$

โดยที่ $G(u,v)$ เป็นฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว $g(x,y)$

$F(u,v)$ เป็นฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของภาพเดิม $f(x,y)$

$H(u,v)$ เป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาส

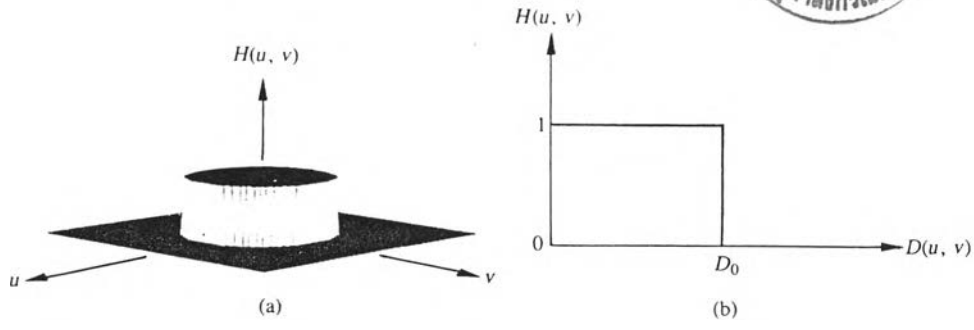
เมื่อได้ผลลัพธ์แล้วจึงคำนวณหาฟูเรียร์ทรานสฟอร์มที่ถูกแปลงกลับ (inverse Fourier transform) ของ $G(u,v)$ เพื่อให้ได้ภาพที่ปรับปรุงแล้ว ซึ่งตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาสที่ใช้ในการคำนวณนี้ จะมีลักษณะเป็นตัวกรองสัญญาณที่เท่ากันแบบวงกลม ซึ่งจะมีการกำหนดระยะของความถี่ที่ถูกกรอง (cutoff frequency) D_0 โดยที่สัญญาณที่มีความถี่อยู่ในช่วงระยะที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ D_0 จะถูกปล่อยผ่านไปหมด และสัญญาณที่อยู่ในช่วงระยะที่มากกว่า D_0 จะถูกกรองทิ้งไป ดังสมการ (Gonzalez and Woods, 1992)

$$\begin{aligned} H(u,v) &= 1 \quad \text{ถ้า } D(u,v) \le D_0 \\ &= 0 \quad \text{ถ้า } D(u,v) > D_0 \end{aligned} \tag{45}$$

โดยที่ D_0 เป็น จำนวนที่ไม่เป็นลบ ซึ่งจะเป็นระยะของความถี่ที่ถูกกรอง

$D(u,v)$ เป็น ระยะจากจุด (u,v) ไปยังจุดกำเนิดของระนาบความถี่ (frequency plane) ซึ่งจะมีระยะเท่ากับ $(u^2+v^2)^{1/2}$

ส่วนประกอบของความถี่ทุกๆค่าที่มีระยะห่างจากจุดกำเนิดภายนอกวงกลมที่มีรัศมีเป็นระยะ D_0 จะถูกกรองทิ้งไปในลักษณะเช่นเดียวกันหมด ตัวกรองสัญญาณแบบนี้จะเป็นตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาสที่เป็นอุดมคติ (ideal lowpass filter)

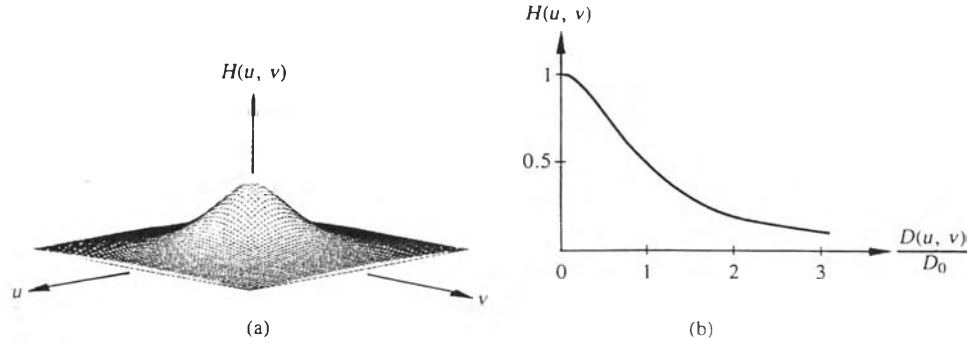


ภาพที่ 27 แสดงตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาสที่เป็นอุดมคติ
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 203)

นอกจากนี้ เรายังสามารถใช้ตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาสที่มีการกำหนดค่าในลักษณะอื่นๆ เช่น ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth filter) ซึ่งกำหนดค่าของ H(u,v) ที่ตำแหน่งระยะความถี่ที่ถูกกรอง (cutoff frequency) หรือที่ตำแหน่ง $D(u,v) = D_0$ ให้มีค่าเป็น $1/\sqrt{2}$ ของค่าสูงสุดของ H(u,v) ซึ่งทำให้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ใช้ในการกรองสัญญาณมีลักษณะเป็น (Gonzalez and Woods, 1992)

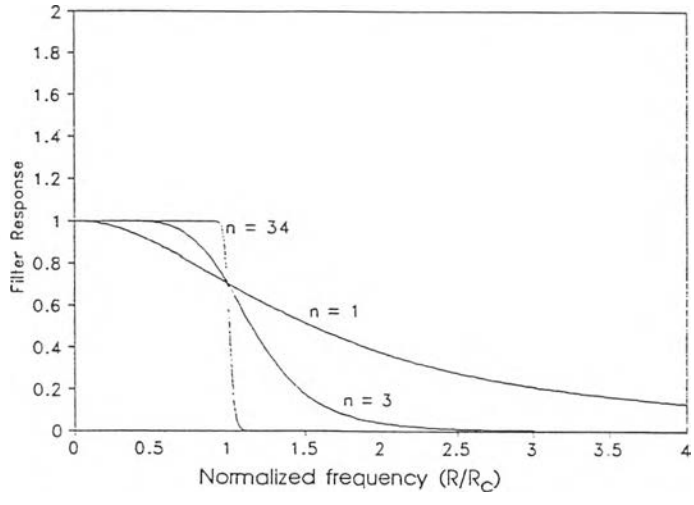
$$H(u,v) = \frac{1}{\left[1 + 0.414\left[\frac{D(u,v)}{D_0}\right]^{2n}\right]} \qquad (46)$$

ซึ่งค่าของ H(u,v) เมื่อ $D(u,v) = D_0$ จะเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ ของค่าสูงสุด



ภาพที่ 28 แสดงตัวกรองสัญญาณโลว์พาสแบบบัตเตอร์เวิร์ท
โดยกำหนดค่า n เป็น 1
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 208)

สำหรับเทอม n ในตัวกรองสัญญาณโลว์พาสแบบบัตเตอร์เวิร์ทจะเป็นกำลังของตัวกรองสัญญาณที่บอกให้รู้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่างค่าของส่วนประกอบที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่ถูกปล่อยผ่านไปและค่าของส่วนประกอบที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่ถูกกรองเอาไว้รวดเร็วเพียงใด และเมื่อ n มีค่ามากยิ่งขึ้น ลักษณะของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันก็จะยิ่งใกล้เคียงกับตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาสที่เป็นอุดมคติมากยิ่งขึ้นเท่านั้น (Myler and Weeks, 1993)



ภาพที่ 29 แสดงลักษณะของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทซึ่งกำหนดค่า n เป็นค่าต่างๆ (ภาพตัวอย่างจาก Myler and Weeks, 1993 หน้า 160)

การปรับปรุงภาพอีกวิธีหนึ่งที่ทำในโดเมนของเวลาจะคำนวณหาการคอนโวลูชั่นระหว่างภาพเดิมกับฟูเรียร์ทรานสฟอร์มที่ถูกแปลงกลับ (inverse Fourier transform) ของตัวกรองสัญญาณ H(u,v) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ (จากสมการ (2))

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \qquad (47)$$

โดยที่ g(x,y) เป็นภาพที่ถูกปรับปรุงแล้ว

f(x,y) เป็นภาพเดิม

h(x,y) เป็นฟูเรียร์ทรานสฟอร์มที่ถูกแปลงกลับของตัวกรองสัญญาณ H(u,v)

จากภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่า อิมพัลส์เรสพอนส์ของตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาสในโดเมนของเวลา (spatial lowpass filter) จะมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวกทั้งหมด แต่เนื่องจากการ

คอนโวลูชั่นเป็นการหาผลรวมระหว่างผลคูณของสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณกับค่าระดับความเทาของพิกเซลในบริเวณใกล้เคียง ค่าระดับความเทาที่ได้จึงอาจเป็นค่าที่อยู่นอกช่วงระยะเกรย์สเกล จึงแก้ไขโดยการหารค่าที่ได้ด้วยจำนวนของพิกเซลในบริเวณใกล้เคียงที่ใช้นั้น ซึ่งจะช่วยปรับให้ค่าที่ได้อยู่ในช่วงระยะของเกรย์สเกล สิ่งที่สำคัญสิ่งหนึ่งในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณคือ การกำหนดให้ค่าผลรวมของสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณมีค่าเป็น 1 เพื่อทำให้พิกเซลที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงที่มีค่าระดับความเทาคงที่นั้นมีค่าระดับความเทาเท่าเดิมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Lindley, 1991) การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณแบบโลว์พาสที่ง่าย ที่สุด ได้แก่ การกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ทุกๆค่าของตัวกรองสัญญาณมีค่าเป็น 1/n เมื่อ n เป็นจำนวนพิกเซลในบริเวณใกล้เคียงนั้น ซึ่งจะเป็นตัวกรองสัญญาณที่มีลักษณะเช่นเดียวกับตัวกรองสัญญาณที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของภาพนั่นเอง

(a) (b)

ภาพที่ 30 แสดงการกรองสัญญาณที่ปล่อยให้ส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำผ่านไปได้
(a) ภาพเดิมที่มีสัญญาณรบกวน
(b) ภาพที่ได้จากการปรับปรุงโดยใช้ตัวกรองสัญญาณโลว์พาส
(ภาพตัวอย่างจาก Gonzalez and Woods, 1992 หน้า 211)