บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการประมวลผลภาพที่นำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติเนื่องจากการกัดกร่อนบริเวณท็อปซิลด์ของโพลทิพ ผู้วิจัยได้มีการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจหาการกัดกร่อนของโพลทิพหลายหัวข้อ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ ได้มีการศึกษาทฤษฎีและวิธีการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่ การหาค่าสหสัมพันธ์ การหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยน การแปลงภาพระดับเทาเป็นภาพขาวดำ ทฤษฎีการหาขอบภาพ และการหาอัตราส่วนสัญญาณข้อมูลขาออกต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

การหาค่าสหสัมพันธ์

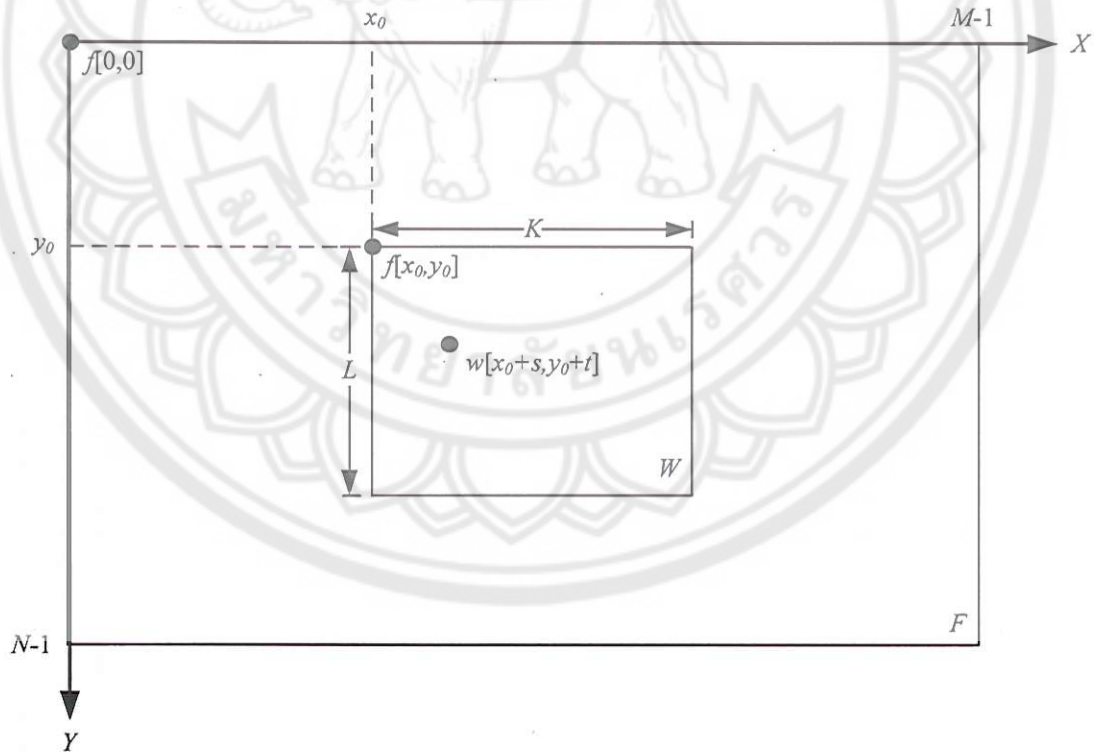
สหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นค่าสถิติที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัว ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ค่าสหสัมพันธ์ในการระบุตำแหน่งของบริเวณท็อปซิลด์ที่เราสนใจจากภาพโพลทิพเพื่อนำมาวิเคราะห์และตรวจสอบการสึกกร่อนบริเวณดังกล่าว สมมุติว่า W คือ สัญญลักษณ์ของภาพบริเวณท็อปซิลด์ที่มีขนาด $K \times L$ พิกเซล และ F ซึ่งเรียกว่าภาพทดสอบ คือ สัญญลักษณ์ของภาพโพลทิพที่มีขนาด $M \times N$ พิกเซล โดยปกติบริเวณท็อปซิลด์มีขนาดพื้นที่น้อยกว่าขนาดพื้นที่ของภาพโพลทิพ ดังนั้น เลขจำนวนเต็ม $K \le M$ และเลขจำนวนเต็ม $L \le N$ จากหลักการของสหสัมพันธ์ เราสามารถหาค่าสหสัมพันธ์ของค่าระดับเทาระหว่างภาพต้นฉบับและภาพทดสอบ ณ ตำแหน่งพิกเซล $[x, y]$ ได้ว่า (Rafael Gonzalez and Richard Woods, 2002, p.701-702)

$$c[x,y] = \sum_{s=0}^{L-1}\sum_{t=0}^{K-1} f[s,t]w[x+s, y+t] \qquad (1)$$

โดยที่ $x = 0,1,2,\ldots,M-1$ และ $y = 0,1,2,\ldots,N-1$ เป็นเลขดัชนีที่ระบุตำแหน่งตามแนวนอนและตำแหน่งตามแนวตั้งของค่าสหสัมพันธ์ $c[x, y]$ ตามลำดับ

กระบวนการหาค่าสหสัมพันธ์ $c[x, y]$ ในสมการ (1) ซึ่งเป็นผลรวมของผลคูณค่าระดับเทาแต่ละพิเซลในพื้นที่ที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพต้นฉบับ W และภาพทดสอบ F เริ่มต้นด้วยนำ

ตำแหน่งพิกเซลมุมบนซ้ายของภาพต้นฉบับ W วางทับตรงกับตำแหน่งพิกเซลมุมบนซ้ายของภาพทดสอบ F ต่อมาคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ $c[0,0]$ ตามสมการ (1) จากนั้นเลื่อนภาพต้นฉบับ W ไปทางแนวแกน X อีกหนึ่งพิกเซลเพื่อคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ $c[1,0]$ ทำการเลื่อนและคำนวณเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งครบหนึ่งแถว ซึ่งจะได้รับผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์ต่อมา ดังนี้ $c[2,0]$, $c[3,0]$, $c[4,0]$, ..., $c[M-1,0]$ จากนั้นคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์เหมือนกับแถวที่สองตามแนวทางที่กล่าวมาแล้ว จะได้ผลลัพธ์ของค่าสหสัมพันธ์สำหรับแถวที่สองจำนวนอีก $M-1$ ค่าคือ $c[0,1]$, $c[1,1]$, $c[2,1]$, ..., $c[M-1,1]$ สำหรับทุกตำแหน่งพิกเซลของขนาดภาพทดสอบ F ($x_0 = 0,1,2,\ldots,M-1$ และ $y_0 = 0,1,2,\ldots,N-1$) เมื่อทำการเลื่อนภาพต้นฉบับไปยังตำแหน่งพิกเซล $[x_0, y_0]$ ดังที่แสดงไว้ในภาพ 1 สามารถหาค่าสหสัมพันธ์ $c[x_0, y_0]$ ได้ทั้งหมดจำนวน MN ค่า หากตำแหน่งพิกเซลใดของภาพทดสอบ $[x_0, y_0]$ อยู่นอกกรอบภาพทดสอบขนาด $M \times N$ พิกเซล จะกำหนดให้ $f[x_0, y_0] = 0$

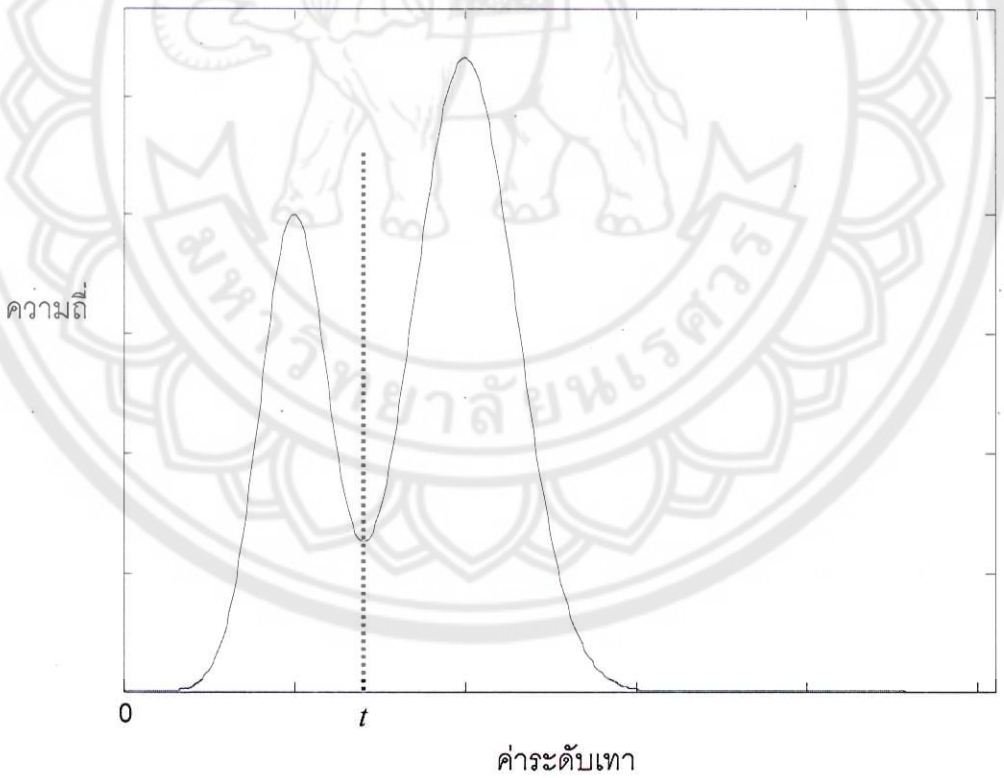


ภาพ 1 กระบวนการการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างภาพทดสอบ F กับภาพตันฉบับ W

การหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

การหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) โดยปกติจะทำการกำหนดค่าคงที่ขึ้นมาหนึ่งค่าเพื่อนำมาใช้เป็นตัวตัดสินเริ่มเปลี่ยนจากค่าระดับเทาใดๆ เป็นขาวหรือดำ ซึ่งโอกาสที่จะได้ค่าคงที่เหมาะสมเป็นไปได้น้อย ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนแบบอัตโนมัติที่เหมาะสม (Nobuyuki Otsu, 1979) จึงเป็นอีกวิธีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อแปลงภาพระดับเทาของท็อปซิลด์เป็นภาพขาวดำ

สมมุติว่า W คือ ภาพระดับเทาที่มีขนาด $K \times L$ พิกเซลและมีฮีสโตแกรมแบบสองยอด (Bimodal histogram) ดังที่แสดงไว้ในภาพ 2 ภาพระดับเทาที่มีคุณลักษณะสมบัติของฮิสโตแกรมที่มี 2 ยอดจะเป็นภาพวัตถุที่มีความแตกต่างกับฉากพื้นหลังอย่างเห็นเด่นชัด เมื่อเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยน t ที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกวัตถุออกจากพื้นหลังได้อย่างง่ายหลังจากใช้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนนี้จากภาพระดับเทาเป็นภาพไบนารี (ภาพขาวดำ) แต่โดยทั่วไปภาพระดับเทาส่วนใหญ่ไม่มีคุณลักษณะสมบัติของฮีสโตแกรมแบบสองยอดเช่นนี้ จึงเป็นงานที่ท้าทายในการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน t ที่เหมาะสม



ภาพ 2 ฮิสโตแกรมที่มีสองยอด

ในงานวิจัยนี้ หาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนแบบอัตโนมัติที่เหมาะสม (Nobuyuki Otsu, 1979) ได้จากการเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยน $t \in \{0,1,2,\ldots,255\}$ ที่ทำให้ค่าความแปรปรวนภายในกลุ่มรวมกัน (Within-class variance) น้อยที่สุด โดยทั่วไปนิยามค่าความแปรปรวนภายในกลุ่มรวมกัน (σ_w^2) มีค่าเท่ากับผลรวมของผลคูณค่าความแปรปรวนกับจำนวนพิกเซลของแต่ละกลุ่ม หรืออาจเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$\sigma_w^2[t] = \omega[t]\sigma_0^2[t] + (1-\omega[t])\sigma_1^2[t] \tag{2}$$

โดยที่ $\omega[t]$ คือ ผลรวมของค่าความน่าจะเป็นที่เมื่อค่าระดับเทาน้อยกว่า t ในขณะที่ $\sigma_0^2[t]$ และ $\sigma_1^2[t]$ คือ ค่าความแปรปรวนของค่าระดับเทาในกรณีค่าระดับเทาน้อยกว่า t และค่าความแปรปรวนของค่าระดับเทาในกรณีค่าระดับเทามากกว่าหรือเท่ากับ t ตามลำดับ

นอกจากนี้ เนื่องจากความซับซ้อนและยุ่งยากในการหาคำตอบจากสมการ (2) เราสามารถเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสม t ที่ทำให้ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมากที่สุด โดยค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม $\sigma_b^2[t]$ มีนิยามว่า (Nobuyuki Otsu, 1979)

$$\sigma_b^2[t] = \frac{\{\mu_T\omega[t]-\mu[t]\}^2}{\omega[t](1-\omega[t])} \tag{3}$$

โดยที่ μ_T และ $\mu[t]$ คือค่าเฉลี่ยของค่าระดับเทาของภาพและค่าโมเมนต์สะสมอันดับหนึ่งของฮีสโตแกรมตั้งแต่ค่าระดับเทา 0 จนถึง $t-1$

การแปลงภาพระดับเทาเป็นภาพขาวดำ

เมื่อได้รับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสม $t = t^*$ จากหัวข้อย่อยที่กล่าวมาข้างต้น นำค่าคงที่นี้มาใช้ในการแปลงภาพระดับเทาเป็นภาพขาวดำ (binary image) กำหนดให้ $w[x,y]$ และ $b[x,y]$ เป็นค่าระดับเทาของภาพระดับและภาพขาวดำ ตามลำดับ โดยการใช้ตัวดำเนินการขีดเริ่มเปลี่ยนแบบแข็ง (Gonzalez and Woods, 2002, p.607) สามารถหาค่าระดับเทาของภาพขาวดำที่ตำแหน่ง $[x,y]$ ได้ว่า

$$b[x,y] = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad w[x,y] \geq t^* \\ 0 & \text{if} \quad w[x,y] < t^* \end{cases} \tag{4}$$

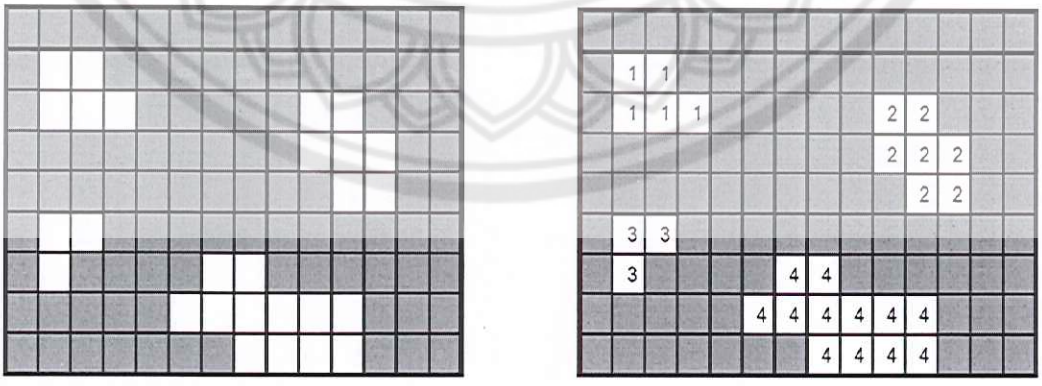
การติดป้ายส่วนประกอบที่เชื่อมต่อกัน

เมื่อได้รับภาพขาวดำจากหัวข้อย่อยข้างต้น อาจมีพิกเซลของวัตถุขาดหายไป จึงมีความจำเป็นต้องมีการเติมเต็มพิกเซลของวัตถุที่ขาดหายไปด้วยวิธีการติดป้ายส่วนประกอบที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นการติดป้ายให้กับแต่ละส่วนประกอบที่เชื่อมต่อกันในภาพลักษณ์ฐานสอง โดยที่การติดป้ายคือ สัญลักษณ์ที่ตั้งชื่อให้กับแต่ละส่วนประกอบ สามารถใช้การติดป้ายในการหาจำนวนวัตถุในภาพได้ด้วยการกำหนดค่าให้กับพิกเซลทุกๆ พิกเซลในภาพที่มีสีขาวหรือมีค่าระดับเทาเป็น 1 ที่อยู่ติดกันจะมีป้ายชื่อเดียวกันเพื่อบอกว่าเป็นวัตถุชิ้นเดียวกัน

ภาพ 3(ก) เป็นตัวอย่างภาพไบนารีซึ่งมีค่าระดับเทา 0 คือสีดำและมีค่าระดับเทา 1 คือสีขาวซึ่งแสดงถึงวัตถุ จะเห็นได้ว่ามีวัตถุ 4 อัน

วิธีการติดป้ายให้กับภาพ 3(ก) มีขั้นตอน ดังนี้ ให้สแกนพิกเซลตั้งแต่มุมบนซ้ายสุดตามแนวแถวแบบซิกแซกไปเรื่อยๆ เมื่อยังไม่พบค่าระดับเทา 1 ถ้าพบตำแหน่งพิกเซลใดที่มีค่าระดับเทา 1 ให้หยุดแล้วตรวจสอบค่าระดับเท่าของพิกเซลรอบข้างแบบ 8 ทิศทาง (Gonzalez and Woods, 2002, p.66) หาพิกเซลรอบข้างใดมีค่าระดับเทา 1 ด้วยให้เก็บค่าตำแหน่งของพิกเซลเหล่านั้นไว้ในคิว ต่อมาให้ตรวจสอบพิกเซลรอบข้างของกลุ่มพิกเซลรอบข้างเหล่านี้ว่ายังมีตำแหน่งรอบข้างใดมีค่าระดับเทา 1 ถ้ามีก็ให้ทำการเก็บตำแหน่งของพิกเซลไว้ในคิวอีก ทำการตรวจสอบไปเรื่อยๆ จนไม่พบค่าระดับเทา 1 ในพิกเซลข้างเคียงอีก ให้ระบุได้ว่าตำแหน่งกลุ่มพิกเซลทั้งหมดเหล่านี้เป็นวัตถุเดียวกับ ทำการ "ป้ายชื่อ 1" พร้อมกับเปลี่ยนค่าระดับเทาให้เป็น 0 เพื่อลบวัตถุนี้ออกจากภาพ แต่ยังเก็บตำแหน่งของกลุ่มพิกเซลป้ายชื่อ 1

ให้ดำเนินการหาวัตถุต่อไปตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจนผลลัพธ์ดังภาพ 3(ข)



(ก) (ข)

ภาพ 3 การติดป้ายส่วนประกอบที่เชื่อมต่อกัน (ก) ภาพก่อนติดป้าย (ข) ภาพหลังติดป้าย

ทฤษฎีการตรวจหาขอบภาพ

การหาขอบด้วยวิธีแคนนีประกอบด้วย 4 ขั้นตอน เริ่มต้นจากการปรับภาพให้เรียบด้วยวงจรกรองเกาส์เซียน (Smoothing with Gaussian filter) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน ต่อมาจะคำนวณหาขนาดและทิศทางของเกรเดียนต์ (Gradient) หลังจากนั้น ใช้การกำจัดค่าที่ไม่สูงสุด (Non-maximum suppression) ของเกรเดียนต์เพื่อทำให้ได้ขอบภาพที่บางลง และในขั้นตอนสุดท้าย จะใช้การกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อหาพิกเซลที่เป็นขอบและทำการเชื่อมต่อขอบ (Canny, 1986 and Jain, et al., 1995, p. 168-173)

วงจรกรองเกาส์เซียน

ในขั้นตอนแรกของการหาขอบโดยวิธีแคนนีนี้จะต้องกำจัดสัญญาณรบกวนออกก่อนโดยใช้วงจรกรองเกาส์เซียนซึ่งสามารถคำนวณได้จากการใช้หน้าต่างขนาดเล็ก ถ้าขนาดของหน้าต่างวงจรกรองเกาส์เซียนมีขนาดกว้างแล้วจะมีผลทำให้ลดสัญญาณรบกวนได้มาก แต่ถ้าขนาดของหน้าต่างกว้างมากเกินไปแล้วจะมีผลทำให้ขอบย่อยๆ ที่เป็นส่วนรายละเอียดนั้นหายไป การคำนวณหาภาพ S ที่ได้รับจากการใช้วงจรกรองเกาส์เซียนเป็นดังสมการ

$$s[x,y] = g[x,y,\sigma] * f[x,y] \tag{5}$$

โดยที่ $f[x,y]$ คือ ภาพที่ต้องการหาขอบ, $g[x,y,\sigma]$ คือ การกรองให้เรียบด้วยเกาส์เซียน และ σ คือความแปรปรวนของวงจรกรองเกาส์เซียน

การคำนวณเกรเดียนต์

ในขั้นแรก นำภาพที่ผ่านการขจัดสัญญาณรบกวน $s[x,y]$ มาสร้างอนุพันธ์ย่อย (partial derivatives) $P[x,y]$ ตามแนวแกน y ได้ว่า

$$p[x,y] \approx \frac{s[x,y+1]-s[x,y]+s[x+1,y+1]-s[x+1,y]}{2} \tag{6}$$

และหาอนุพันธ์ย่อย $Q[x,y]$ ตามแนวแกน x ได้ว่า

$$q[x,y] \approx \frac{s[x,y]-s[x+1,y]+s[x,y+1]-s[x+1,y+1]}{2} \tag{7}$$

จากนั้น นำค่าอนุพันธ์ย่อยทั้งสองในสมการ (6) และ (7) มาคำนวณหาขนาดและทิศทางของเกรเดียนต์ในรูปแบบเชิงขั้วหาขนาดของความชันได้ว่า

$$m[x,y] = \sqrt{(p[x,y])^2 + (q[x,y])^2} \quad (8)$$

และหาทิศทางของความชันได้ว่า

$$\theta[x,y] = \arctan\left(\frac{q[x,y]}{p[x,y]}\right) \quad (9)$$

การกำจัดค่าที่ไม่สูง

สำหรับการหาขอบโดยแคนนีนี้จุดที่ถือเป็นเส้นขอบได้นั้นจะต้องเป็นจุดที่ให้ค่าสูงสุดเฉพาะที่และเป็นทิศทางเดียวกับเกรเดียนต์ด้วย ซึ่งด้วยวิธีดังกล่าวนี้ทำให้ได้ขอบที่บางภาพที่ได้หลังการกำจัดค่าที่ไม่สูงสุดจะให้ค่าเป็นศูนย์ในทุกจุด ยกเว้นจุดที่เป็นค่าสูงสุดเฉพาะจุด (Local maxima points) ซึ่งจะยังคงค่าเดิมไว้

การกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

แม้ว่าภาพจะผ่านการทำให้เรียบในขั้นตอนแรกแล้วก็ตาม ภาพที่ได้อาจยังมีเส้นขอบที่ไม่ใช่ขอบที่แท้จริงปรากฏอยู่อันเนื่องจากสัญญาณรบกวนหรือลักษณะของวัตถุในภาพเป็นพื้นผิวที่มีลวดลายหรือมีรายละเอียดภายในมาก ดังนั้น เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมา 2 ค่า คือค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเกณฑ์สูง (high threshold) T_1 และค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเกณฑ์ต่ำ (low threshold) T_2 โดยพิกเซลที่มีค่ามากกว่า T_1 จะถูกปรับเป็น 1 (เป็นพิกเซลที่เป็นขอบ) แต่ถ้าน้อยกว่า T_2 จะถูกปรับเป็น 0 ส่วนค่าที่อยู่ระหว่างค่าขีดเริ่มเปลี่ยนทั้งสอง การปรับเป็นค่า 0 หรือ 1 นั้นขึ้นอยู่กับพิกเซลที่อยู่รอบข้าง หากพบว่าพิกเซลที่อยู่รอบข้างเป็นขอบหรือมีค่ามากกว่า T_1 จะปรับค่าพิกเซลดังกล่าวให้มีค่าเป็น 1 และถือเป็นหนึ่งในขอบภาพด้วยเช่นกัน

การหาอัตราส่วนสัญญาณข้อมูลขาออกต่อสัญญาณรบกวน

ในการหาอัตราส่วนสัญญาณข้อมูลขาออกต่อสัญญาณรบกวนจากข้อมูลแบบวัดจริง ได้ใช้อัตราส่วนระหว่างลำดับสัญญาณขาออกต่อลำดับสัญญาณรบกวน ซึ่งนิยามว่า

$$SNR = 10\log_{10}\left(\frac{\sum_{n=1}^{N}(s[n])^2}{\sum_{n=1}^{N}(e[n])^2}\right)\text{[dB]} \quad (10)$$

โดยที่ $s[n]$ คือ ลำดับข้อมูลสัญญาณขาออกจากวงจรกรอง และ $e[n]$ คือ ผลต่างลำดับข้อมูลสัญญาณรบกวนที่ได้รับจากการประมาณค่าลำดับข้อมูลที่ปราศจากสัญญาณรบกวน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการตรวจสอบความผิดปกติแบบอัตโนมัติบริเวณท็อปซิลด์ของภาพโพลทิพอยู่ 3 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

สมเจตน์ บุญชื่น และคณะ (2554) ทำการตรวจสอบการกัดกร่อนบริเวณท็อปซิลด์ของภาพโพลทิพด้วยเทคนิคแม่แบบต้นฉบับโดยประยุกต์ใช้วิธีการสกัดคุณลักษณะเด่นของภาพออกเป็น 3 องค์ประกอบคือ 1 คุณลักษณะเด่นการหาพื้นที่ภายในบริเวณท็อปซิลด์ด้วยวิธีการติดป้ายส่วนประกอบที่เชื่อมต่อกัน 2 การหาความยาวบริเวณขอบล่างท็อปซิลด์ด้วยวิธีการกำหนดรหัสลูกโซ่ 3 การหาจำนวนตำแหน่งกัดกร่อนบริเวณขอบล่างท็อปซิลด์ด้วยวิธีการหาผลต่างของพิกัดตำแหน่ง วิธีที่นำเสนอสำหรับการตรวจหาการกัดกร่อน จากผลการทดลองและทดสอบการใช้คุณลักษณะเด่นทั้งสามสำหรับการตรวจหาการกัดกร่อนของภาพโพลทิพขนาด 2,048 x 2,048 พิกเซล จำนวน 647 ภาพ พบว่า คุณลักษณะเด่นแบบตำแหน่งพิกัดของการกัดกร่อนตามแนวขอบล่างของบริเวณท็อปซิลด์ให้ค่าประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับผลที่ได้รับจากคุณลักษณะเด่นที่เหลือทั้งสองแบบ โดยมีค่าความไวสูงสุดถึง 0.9861 รองลงมาค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.9351 ค่าความจำเพาะเท่ากับ 0.8938 และค่าความแม่นยำเท่ากับ 0.8823

Somjate และคณะ (2011) ได้พัฒนางานวิจัยในข้อแรกที่ผ่านมาด้วยการรวมคุณลักษณะเด่น 1 หรือ 2 , 1 หรือ 3 และ 2 หรือ 3 สำหรับใช้ตรวจสอบภาพโพลทิพขนาด 2,048 x 2,048 พิกเซล จำนวน 647 ภาพ พบว่า การรวมคุณลักษณะเด่นที่ 1 หรือ 2 ให้ผลลัพธ์ของประสิทธิภาพในการตรวจสอบสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับการรวมคุณลักษณะเด่นที่เหลืออีกสองวิธี โดยมีค่าความไวสูงสุดถึง 0.9723 รองลงมาค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.9675 ค่าความจำเพาะเท่ากับ 0.9636 และค่าความแม่นยำเท่ากับ 0.9557

Somjate และคณะ (2012) ได้นำเสนอวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบการกัดกร่อนบริเวณท็อปซิลด์ของภาพโพลทิพโดยรวมคุณลักษณะเด่นทั้งสามเข้าด้วยกันตามที่กล่าวมาแล้วทั้งสองหัวข้อเพื่อใช้ตรวจสอบการกัดกร่อนของภาพโพลทิพขนาด 2,048 x 2,048 พิกเซล จำนวน 647 ภาพ พบว่า วิธีการที่นำเสนอให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่าความไว 0.9723 ค่าความจำเพาะ 0.9692 ค่าความแม่นยำ0.9623 และค่าความถูกต้อง 0.9706 ซึ่งเปรียบเทียบกับวิธีการที่ได้เคยทำผ่านมาแล้ว พบว่าวิธีการล่าสุดให้ผลลัพธ์ของความถูกต้องในการตรวจสอบภาพโพลทิพมีค่าสูงสุดถึง 97.06 %

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ศึกษางานวิจัยที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีกดังต่อไปนี้

Ryo Takei นำเสนอวิธีบรรทัดฐานสหสัมพันธ์ของภาพระดับเทา (Normalized Gray-Scale Correlation) โดยใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอเพื่อเลือกจุดบนภาพที่สนใจ เพื่อลดขนาดของรูปภาพในการเปรียบเทียบกับภาพต้นฉบับ ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวสามารถเลือกภาพที่สนใจได้อย่างแม่นยำ และเพิ่มความเร็วในการตรวจสอบความถูกต้องของภาพด้วย

N. Otsu นำเสนอวิธีการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนอัตโนมัติ จากฮิตโตแกรมของภาพระดับเทา โดยตั้งสมมติฐานว่าภาพระดับเทาที่ต้องการทดสอบมีการกระจายตัวของค่าฮิตโตแกรมเป็นแบบคู่ (Bimodel) จากนั้นทำการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมสำหรับการแยกระหว่างฮิสโตแกรมทั้งสองกลุ่ม โดยที่ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมากที่สุด ผลที่ได้สามารถเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยนแบบอัตโนมัติได้อย่างเหมาะสมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำแนกวัตถุได้อย่างถูกต้อง

Liu Jianzhuang และคณะ นำเสนอวิธีการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนแบบอัตโนมัติด้วยวิธีโอซึ (Otsu) แบบสองมิติ โดยได้พัฒนาวิธีการเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เป็นค่าเอนโทรปีของฮิสโตแกรม (Histogram) แบบหนึ่งมิติ มาเป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เป็นค่าเอนโทรปีของฮิตโตแกรมแบบสองมิติ พบว่าวิธีของโอซึสองมิติ มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีของโอซึหนึ่งมิติ

Xiangjian, H นำเสนอวิธีการหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี (Canny) เป็นวิธีการหาขอบโดยการหาจุดต่ำสุดและจุดสูงสุดในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของภาพ โดยการปรับภาพให้เรียบด้วยวงจรกรองเกาเซียนเพื่อลดเส้นขอบภาพที่ไม่ใช่ขอบที่แท้จริงอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน และกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อลดรายละเอียดของลวดลายภายในพื้นผิว จึงทำให้เส้นขอบที่ได้มีความต่อเนื่องและมีลักษณะหนา

Rosenfeld, A นำเสนอวิธีการติดป้ายส่วนประกอบที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นกระบวนการระบุองค์ประกอบของวัตถุชิ้นเดียวกันของส่วนย่อยภายในภาพที่มีการเชื่อมต่อกันทำให้สามารถหาจำนวนวัตถุหรือสามารถใช้ในการแยกวัตถุแต่ละชิ้นออกจากกันภายในภาพได้

Charu และคณะ ทำการลดสัญญาณรบกวนอิมพัลส์จากเสียงพูดและเสียงออดิโอด้วยเทคนิคเอสดีรอม (SD - ROM) ซึ่งวงจรกรองสัญญาณเอสดีรอมยังคงคุณภาพเสียงลักษณะเดิมได้เป็นอย่างดี

Sae-Tang และคณะ ทำการวัดค่าประสิทธิภาพการตรวจสอบการไหลซึมของลูกตา ประกอบด้วยค่าความไว ค่าความจำเพาะ ค่าความถูกต้อง และค่าพยากรณ์บวก เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพตัวชี้วัดของวิธีการที่นำเสนอ