

การปรับปรุงวิธีแคนนี่สำหรับการตรวจจับขอบของรูปภาพ Modifications of Canny Method for Image Edge Detection

ณัททัย เทพเกษตรกุล (Nahatai Tepkasetkul)* ดร.จีระยุทธ เวทย์วีระพงษ์ (Dr.Jeerayut Wetweerapong)**

บทคัดย่อ

วิธีแคนนี่เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาขอบของรูปภาพ ประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินการหลักสี่ขั้นตอน คือ การปรับค่าสีโดยใช้ตัวกรองเกาส์เซียน การหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล การพิจารณาขอบที่เป็นไปได้จากขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสี และการใช้ค่าเกณฑ์สองระดับเพื่อกำหนดขอบเข้มและขอบไม่เข้ม วิธีแคนนี่สามารถตรวจจับขอบได้ดี อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีความซับซ้อนในการดำเนินการ และมีความไม่สะดวกในการใช้งาน เนื่องจากมีความจำเป็นต้องกำหนดค่าเกณฑ์ทั้งสองจากผู้ใช้งาน งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับเปลี่ยนตัวกรองที่ใช้ในการปรับค่าสี วิธีการหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีที่ง่ายขึ้น และวิธีการหาค่าเกณฑ์ทั้งสองแบบอัตโนมัติเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ผลการทดลองพบว่าภาพขอบที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพเทียบเท่าภาพขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่

ABSTRACT

Canny method is one of efficient methods for finding the edges of an image. It consists of four main steps: smoothing the image by using Gaussian filter, calculating gradient magnitudes and directions of all pixels, considering possible edges, and using a double-threshold algorithm to detect strong and weak edges. This method can detect the edges well, but it is quite complex and difficult to implement. Moreover, the thresholds have to be set manually, which makes it inconvenient to use. In this paper, we propose the adjusting of the filter used to smooth the image, simplifying the calculation of changes of magnitude and direction of pixel values, and automatic thresholding. The experimental results show that the edge images obtained from the proposed method are as high-quality as that obtained from Canny method.

คำสำคัญ: การตรวจจับขอบ วิธีแคนนี่

Keywords: Edge detection, Canny method

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** อาจารย์ สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ขอบ (Edge) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสีของพิกเซลระหว่างสองบริเวณในรูปภาพ ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของรูปภาพ การตรวจจับขอบ (Edge detection) จึงเป็นพื้นฐานของการประมวลผลภาพในหลายๆ ด้าน เช่น การแบ่งส่วนภาพ (image segmentation) การกำหนดตำแหน่งภาพ (image registration) และการรู้จำแบบรูป (pattern recognition) วิธีการตรวจจับขอบโดยทั่วไปจะใช้การดำเนินการพื้นฐานที่ประกอบด้วย การดำเนินการผลต่างอันดับหนึ่ง เช่น การดำเนินการโรเบิร์ต (Robert operator) การดำเนินการพรีวิทท์ (Prewitt operator) และการดำเนินการโซเบล (Sobel operator) และการดำเนินการผลต่างอันดับสอง เช่น การดำเนินการลาปลาซ (Laplace operator) วิธีการเหล่านี้สามารถใช้งานได้ง่าย แต่คุณภาพของภาพขอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าเกณฑ์ที่กำหนด (threshold) หากค่าเกณฑ์มีค่าสูง จะทำให้ขอบบางส่วนไม่ถูกตรวจจับ ในทางกลับกัน หากค่าเกณฑ์มีค่าต่ำ จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับขอบ

Canny (1986) ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับขอบที่เรียกว่า วิธีแคนนี่ (Canny method) ซึ่งประกอบด้วย การดำเนินการหลัก 4 ขั้นตอน คือ การปรับค่าสีโดยใช้ตัวกรองเกาส์เซียนเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน การหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล การพิจารณาขอบที่เป็นไปได้โดยการเปรียบเทียบขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลนั้นกับพิกเซลข้างเคียงที่อยู่ในทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสี และการใช้ค่าเกณฑ์สองระดับ (ค่าเกณฑ์สูง และค่าเกณฑ์ต่ำ) เพื่อกำหนดพิกเซลที่เป็นขอบเข้มและขอบไม่เข้ม วิธีแคนนี่สามารถตรวจจับขอบได้ดี อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีความซับซ้อนในการดำเนินการ และมีความไม่สะดวกในการใช้งาน เนื่องจากมีความจำเป็นต้องกำหนดค่าเกณฑ์ทั้งสองจากผู้ใช้งาน เพื่อให้ได้ภาพขอบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงมีการพัฒนาวิธีแคนนี่ในขั้นตอนต่างๆ เช่น ปรับเปลี่ยนขั้นตอนการพิจารณาขอบที่เป็นไปได้ (Ding, Goshtasby, 2001) ปรับเปลี่ยนวิธีการหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล (Xun Wang, Jian-Qiu Jin, 2007) และนำเสนอการหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติด้วยวิธีการของ Otsu (Li et al., 2009) งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับเปลี่ยนตัวกรองที่ใช้ในการปรับค่าสี วิธีการหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีที่ง่ายขึ้น และวิธีการหาค่าเกณฑ์ทั้งสองแบบอัตโนมัติเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อนำเสนอวิธีการตรวจจับขอบวิธีใหม่ที่ปรับปรุงมาจากวิธีแคนนี่ สร้างค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติสำหรับวิธีการดังกล่าว และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของภาพขอบที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับวิธีแคนนี่

วิธีการวิจัย

วิธีแคนนี่

รูปที่ใช้ในการตรวจจับขอบเป็นรูปสีเข้มเทา (grayscale image) ซึ่งจะมีค่าสีของแต่ละพิกเซลอยู่ระหว่าง 0–255 และจัดเก็บในรูปแบบเมทริกซ์ ขนาด $m \times n$ เมื่อ m, n คือ จำนวนแถวและหลักของรูปภาพ ตามลำดับ

วิธีแคนนี่มีขั้นตอนการดำเนินการหลักอยู่ 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การปรับค่าสี (image smoothing)

ค่าสีของแต่ละพิกเซลของรูปภาพจะถูกปรับโดยใช้ตัวกรองเกาส์เซียน ซึ่งสร้างหน้ากากเมทริกซ์ย่อย (mask) สำหรับการกรอง โดยใช้สมการเกาส์เซียน

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

เมื่อ (x, y) เป็นตำแหน่งของสมาชิกในเมทริกซ์ย่อย และ σ เป็นค่าพารามิเตอร์

2. การหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสี (gradient)

คำนวณหาขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสี (gradient magnitude: M) และทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสี (gradient direction: α) โดยใช้สมการดังนี้

$$M(i, j) = \sqrt{g_x^2(i, j) + g_y^2(i, j)}$$

$$\alpha(i, j) = \arctan\left(\frac{g_y(i, j)}{g_x(i, j)}\right)$$

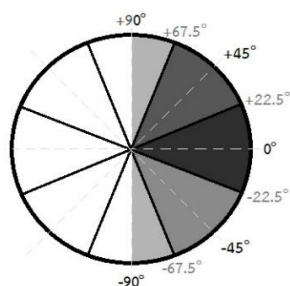
เมื่อ (i, j) คือ ตำแหน่งของพิกเซล g_x และ g_y คือ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีในแนว x และ y ตามลำดับ ซึ่งค่าของ g_x และ g_y สามารถหาได้หลายวิธี เช่น การใช้หน้ากากของตัวดำเนินการโรเบิร์ต การใช้หน้ากากของตัวดำเนินการพีร์วิทท์ หรือการใช้หน้ากากของตัวดำเนินการโซเบล (Gonzalez, Woods, 2008)

3. การพิจารณาขอบที่เป็นไปได้ (non-maxima suppression)

กำหนดพิกเซลที่เป็นไปได้ที่จะเป็นขอบ และกำจัดพิกเซลที่ไม่ใช่ขอบ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

3.1 พิจารณาทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีสำหรับแต่ละพิกเซล จากค่า $\arctan \theta$ ซึ่งอยู่ในช่วง $[-90^\circ, 90^\circ]$ เป็นสี่ช่วงย่อย และทำการปรับค่า ดังนี้

- ถ้า $-22.5^\circ < \alpha(i, j) \leq 22.5^\circ$ ปรับให้ $\alpha(i, j) = 0^\circ$
- ถ้า $22.5^\circ < \alpha(i, j) \leq 67.5^\circ$ ปรับให้ $\alpha(i, j) = +45^\circ$
- ถ้า $-67.5^\circ < \alpha(i, j) \leq -22.5^\circ$ ปรับให้ $\alpha(i, j) = -45^\circ$
- ถ้า $\alpha(i, j) \leq -67.5^\circ$ หรือ $\alpha(i, j) > 67.5^\circ$ ปรับให้ $\alpha(i, j) = 90^\circ$



รูปที่ 1 วิธีการแบ่งช่วงย่อยของทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่าสี

3.2 เปรียบเทียบขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลที่พิจารณากับพิกเซลข้างเคียงสองพิกเซลในทิศทางของการเปลี่ยนแปลง จะกำหนดให้เป็นขอบที่เป็นไปได้ ก็ต่อเมื่อ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลนั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลข้างเคียงทั้ง 2 พิกเซล

4. การใช้ค่าเกณฑ์สองระดับ (double thresholding)

ระบุพิกเซลที่เป็นขอบ โดยกำหนดค่าเกณฑ์สูง (T_h) และค่าเกณฑ์ต่ำ (T_l) และพิจารณาเฉพาะพิกเซลที่เป็นไปได้ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ดังนี้

- ถ้าขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ T_h จะเรียกพิกเซลนั้นว่า ขอบเข้ม (strong edge) และให้ขอบเข้มเป็นขอบของรูปภาพ
- ถ้าขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลอยู่ระหว่าง T_l และ T_h จะเรียกพิกเซลนั้นว่า ขอบไม่เข้ม (weak edge) และขอบไม่เข้มจะเป็นขอบ ถ้ามีพิกเซลข้างเคียงอย่างน้อย 1 พิกเซลเป็นขอบเข้ม
- ถ้าขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลมีค่าน้อยกว่า T_l ให้พิกเซลนั้นไม่เป็นขอบ

วิธีนำเสนอ

วิธีที่นำเสนอจะใช้รูปสี่เหลี่ยมเทา ซึ่งจะมีค่าสีของแต่ละพิกเซลอยู่ระหว่าง 0–255 และจัดเก็บในเมทริกซ์ ขนาด $m \times n$ เมื่อ m, n คือ จำนวนแถวและหลักของรูปภาพ ตามลำดับ ในการตรวจจับขอบมีการแบ่งขั้นตอนการดำเนินการเป็น 4 ขั้นตอนเหมือนวิธีเคนนี่ แต่มีการปรับเปลี่ยนการดำเนินการเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน โดยออกแบบการทดลองดังนี้

1. การปรับค่าสี

พิจารณาการปรับค่าสี 5 แบบ คือ ไม่มีการปรับค่าสี การปรับค่าสีโดยใช้ตัวกรองเกาส์เซียนขนาด 3x3 และ 5x5 และการปรับค่าสีโดยใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ย (Mean filter) ขนาด 3x3 และ 5x5

$\frac{1}{16}$ <table> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table> (a)	1	2	1	2	4	2	1	2	1	$\frac{1}{273}$ <table> <tr><td>1</td><td>4</td><td>7</td><td>4</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>16</td><td>26</td><td>16</td><td>4</td></tr> <tr><td>7</td><td>26</td><td>41</td><td>26</td><td>7</td></tr> <tr><td>4</td><td>16</td><td>26</td><td>16</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td>7</td><td>4</td><td>1</td></tr> </table> (b)	1	4	7	4	1	4	16	26	16	4	7	26	41	26	7	4	16	26	16	4	1	4	7	4	1	$\frac{1}{9}$ <table> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> (c)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$\frac{1}{25}$ <table> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> (d)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	1																																																																					
2	4	2																																																																					
1	2	1																																																																					
1	4	7	4	1																																																																			
4	16	26	16	4																																																																			
7	26	41	26	7																																																																			
4	16	26	16	4																																																																			
1	4	7	4	1																																																																			
1	1	1																																																																					
1	1	1																																																																					
1	1	1																																																																					
1	1	1	1	1																																																																			
1	1	1	1	1																																																																			
1	1	1	1	1																																																																			
1	1	1	1	1																																																																			
1	1	1	1	1																																																																			

- รูปที่ 2 (a) หน้ากากตัวกรองเกาส์เซียนขนาด 3x3 ซึ่งได้จากการประมาณค่าจากสมการเกาส์เซียน เมื่อ $\sigma = 1/\sqrt{2}$
 (b) หน้ากากตัวกรองเกาส์เซียนขนาด 5x5 ซึ่งได้จากการประมาณค่าจากสมการเกาส์เซียน เมื่อ $\sigma = 1$
 (c) หน้ากากตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3x3 (d) หน้ากากตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 5x5

รูปที่ 3 จะแสดงตัวอย่างการใช้งานหน้ากากตัวกรอง ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลในรูปที่ 3(a) โดยใช้ตัวกรองเกาส์เซียนขนาด 3x3 ดังรูปที่ 2(a) และตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3x3 ดังรูปที่ 2(c)

196	110	112	120	122	122	198
196	190	108	122	94	94	200
196	196	108	90	110	94	90
190	94	94	88	106	198	92
90	190	198	204	104	192	196
92	196	84	62	118	128	132
184	92	80	88	64	72	204

(a)

	162.00	125.75	110.25	106.13	119.75	
	159.25	118.88	101.13	106.88	115.75	
	144.25	127.00	116.25	125.25	141.25	
	148.50	148.50	132.63	133.25	154.25	
	140.75	123.88	105.13	109.00	131.75	

(b)

	156.89	128.44	109.56	107.56	124.89	
	152.44	121.11	102.22	110.67	119.78	
	150.67	140.22	122.44	131.78	131.33	
	136.44	134.44	117.56	133.33	140.67	
	134.00	132.67	111.33	114.67	134.44	

(c)

รูปที่ 3 (a) ค่าสีของรูปภาพ (b) การเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลโดยใช้ตัวกรองเกาส์เซียนขนาด 3x3 (c) การเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลโดยใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3x3

2. การหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสี

คำนวณผลต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลข้างเคียงที่อยู่ตรงข้ามกันของพิกเซลที่พิจารณาในทิศทาง เมื่อ $F(i, j)$ คือค่าสีของพิกเซล (i, j) ที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 1

$F(i-1, j-1)$	$F(i-1, j)$	$F(i-1, j+1)$
$F(i, j-1)$	$F(i, j)$	$F(i, j+1)$
$F(i+1, j-1)$	$F(i+1, j)$	$F(i+1, j+1)$

รูปที่ 4 พิกเซลที่พิจารณา

โดยมีสมการการคำนวณ ดังนี้

$$\text{แนวตั้ง} \quad r_1(i, j) = |F(i-1, j) - F(i+1, j)|$$

แนวนอน $r_2(i, j) = |F(i, j-1) - F(i, j+1)|$

$$\text{แนวเฉียงหลัก} \quad r_3(i, j) = |F(i-1, j-1) - F(i+1, j+1)|$$

แนวเฉียงรอง $r_4(i, j) = |F(i-1, j+1) - F(i+1, j-1)|$

กำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล (i, j) คือ

$$r(i, j) = \frac{r_1(i, j) + r_2(i, j) + r_3(i, j) + r_4(i, j)}{4}$$

และทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล (i, j) คือทิศที่ค่า $r_k(i, j)$ มีค่ามากที่สุด เมื่อ $k=1,2,3,4$

รูปที่ 5 แสดงการนำค่าสีจากรูปที่ 3(b) มาคำนวณหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล

	1.25	6.00	19.12	
	29.62	31.50	26.37	
	3.12	11.12	16.25	

(a)

	58.12	12.00	14.62	
	28.00	1.75	25.00	
	15.87	15.25	21.62	

(b)

	45.75	0.50	31.00	
	26.62	14.37	53.12	
	39.12	18.00	15.50	

(c)

	34.00	20.87	3.50	
	47.37	41.62	16.88	
	24.50	1.37	36.12	

(d)

	34.78	9.84	17.06	
	32.90	22.31	30.34	
	20.65	11.44	22.37	

(e)

รูปที่ 5 (a), (b), (c), (d) คือ ขนาดของผลต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าสีในแนวตั้ง แนวนอน แนวเฉียงหลัก และแนวเฉียงรอง ตามลำดับ (e) คือ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสี

ตัวอย่างการหาขนาดและทิศทางของฟลักเซล (3,3)

$$r_1(3,3)=|101.13-132.63|=31.50$$

$$r_2(3,3)=|127.00-125.25|=1.75$$

$$r_3(3,3)=|118.88-133.25|=14.37$$

$$r_4(3,3) = |106.88 - 148.50| = 41.62$$

ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล (3,3) คือ

$$r(3,3) = \frac{31.50 + 1.75 + 14.37 + 41.62}{4} = 22.31$$

ทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซล (3,3) คือ แนวเฉียงรอง (r_4) เนื่องจาก $r_4(3,3)$ มีค่ามากที่สุด

3. การพิจารณาขอบที่เป็นไปได้

เปรียบเทียบขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลที่พิจารณากับพิกเซลข้างเคียงสองพิกเซลในทิศทางของการเปลี่ยนแปลง จะกำหนดให้เป็นขอบที่เป็นไปได้ ก็ต่อเมื่อ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลนั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลข้างเคียงทั้ง 2 พิกเซล

ตัวอย่าง จากรูปที่ 5 จะเห็นว่า พิกเซล (3,3) มีทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสี คือ แนวเฉียงรอง ดังนั้น ในการพิจารณาว่าพิกเซลดังกล่าวจะเป็นขอบหรือไม่ จะต้องเปรียบเทียบ $r(3,3)$ กับขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลข้างเคียงในแนวเฉียงรอง คือ $r(2,4)$ และ $r(4,2)$ ซึ่งจะได้ว่า พิกเซล (3,3) เป็นขอบที่เป็นไปได้ เนื่องจาก $r(3,3) = 22.31 \geq 17.06 = r(2,4)$ และ $r(3,3) = 22.31 \geq 20.65 = r(4,2)$

4. การใช้ค่าเกณฑ์สองระดับ

ระบุพิกเซลที่เป็นขอบ โดยกำหนดค่าเกณฑ์สูง (T_h) และเกณฑ์ต่ำ (T_l) ซึ่งปรับปรุงจากวิธีการหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติด้วยวิธีการของ Otsu (Otsu, 1979; Jing Tian et al., 2008)

กำหนดค่าเกณฑ์เริ่มต้น (T_0) คือค่าเฉลี่ยของขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสี $r(i, j)$ ทั้งหมด เนื่องจากการใช้พิกเซลที่มีขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีมาก ๆ ในการกำหนดค่าเกณฑ์ อาจจะทำให้ได้ค่าเกณฑ์ที่มีค่าสูงเกินไป จึงเลือกพิจารณาพิกเซลเป็น 3 กรณี คือ พิกเซลที่มีขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีไม่เกิน $\frac{\max(r(i, j))}{p}$ เมื่อ $p = 1, 2, 3$

สำหรับแต่ละกรณี จะแบ่งพิกเซลเป็นสองกลุ่ม คือ พิกเซลที่มีค่า $r(i, j) < T_0$ และ $r(i, j) \geq T_0$ จากนั้น หาค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม ให้เป็น T_a และ T_b ตามลำดับ ให้ $T_1 = \frac{T_a + T_b}{2}$

- ถ้า $T_0 \neq T_1$ ให้แทน T_0 ด้วย T_1 แล้วทำซ้ำกระบวนการเดิม

- ถ้า $T_0 = T_1$ จะสิ้นสุดการคำนวณ และกำหนดให้ $T_h = T_l$

กระบวนการนี้จะสิ้นสุดการคำนวณได้เสมอ (กำหนด n_a^k และ n_b^k คือจำนวนพิกเซลที่มีค่า $r(i, j) < T_k$ และ $r(i, j) \geq T_k$ ตามลำดับ พิจารณากรณี $n_a^0 > n_b^0$ ขั้นตอนวิธีนี้จะให้ค่า $T_1 \geq T_0$ ถ้าค่าทั้งสองเท่ากัน จะสิ้นสุดการคำนวณ แต่ถ้า $T_1 > T_0$ จะได้ว่า $n_a^1 > n_a^0$ และ $n_b^1 < n_b^0$ ซึ่งจะเกิดพฤติกรรมในทำนองนี้ในรอบถัดไป เนื่องจากการเพิ่มและลดจำนวนทำได้จำกัด ขั้นตอนวิธีจึงต้องสิ้นสุด และกรณี $n_a^0 \leq n_b^0$ จะพิจารณาในทำนองคล้ายกัน) และกำหนดค่า T_l โดย $T_l = 0.4 \times T_h$ (MATLAB and Image Processing Toolbox Release 2014b)

จากพิกเซลที่เป็นไปได้ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 จะระบุพิกเซลขอบ ดังนี้

- ถ้าขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ T_h จะเรียกพิกเซลนั้นว่า ขอบเข้ม (strong edge) และให้ขอบเข้มเป็นขอบของรูปภาพ
- ถ้าขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลอยู่ระหว่าง T_l และ T_h จะเรียกพิกเซลนั้นว่า ขอบไม่เข้ม (weak edge) และขอบไม่เข้มจะเป็นขอบ ถ้ามีพิกเซลข้างเคียงอย่างน้อย 1 พิกเซลเป็นขอบเข้ม
- ถ้าขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิกเซลมีค่าน้อยกว่า T_l ให้พิกเซลนั้นไม่เป็นขอบ

34.78	0	17.06	34.78	0	17.06
32.90	22.31	30.34	32.90	22.31	30.34
20.65	11.44	0	20.65	11.44	0

(a)

(b)

รูปที่ 6 (a) ตัวอย่างเมทริกซ์ r หลังจากผ่านขั้นตอนที่ 3 (ค่า 0 แทนพิกเซลที่พิจารณาว่าไม่ใช่ขอบ)

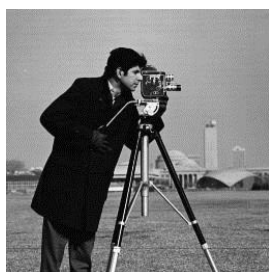
(b) พิกเซลขอบเมื่อ $T_h = 32$ และ $T_l = 12.8$

ถ้าหลังจากผ่านกระบวนการหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติได้ $T_h = 32$ และ $T_l = 0.4 \times 32 = 12.8$

จากรูปที่ 6(a) จะได้ว่า พิกเซล (1,1) และ (2,1) เป็นพิกเซลขอบเข้ม เพราะมีค่ามากกว่า $T_h = 32$ ดังนั้น พิกเซลทั้งสองจึงเป็นพิกเซลขอบ และพิกเซล (1,3), (2,2), (2,3) และ (3,1) เป็นพิกเซลขอบไม่เข้ม เพราะมีค่าอยู่ระหว่าง 12.8 และ 32 แต่จะเห็นว่า พิกเซล (2,2) และ (3,1) ติดกับพิกเซล (2,1) ดังนั้น พิกเซล (2,2) และ (3,1) จึงเป็นพิกเซลขอบ ในขณะที่พิกเซล (1,3) และ (2,3) ไม่ติดกับพิกเซลขอบเข้ม ดังนั้นพิกเซลทั้งสองไม่ใช่พิกเซลขอบ

ผลการวิจัย

ในส่วนนี้จะแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ โดยจะใช้รูปภาพทั้งหมด 4 รูป คือ ช่างภาพ ขนาด 256x256 พริก ขนาด 256x256 กล้องถ่ายรูป ขนาด 512x512 และศิลปะ ขนาด 512x512



(a)



(b)



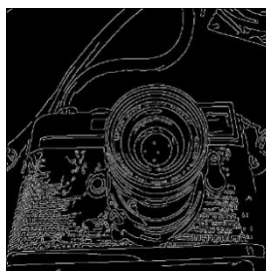
(c)



(d)

รูปที่ 7 (a) ช่างภาพ (b) พริก (c) กล้องถ่ายรูป (d) ศิลปะ

ในการพิจารณาประสิทธิภาพของภาพขอบที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ จะแสดงผลการทดลองสองการทดลอง การทดลองแรก คือ ภาพขอบที่ได้จากการใช้ตัวกรองที่แตกต่างกัน แต่ใช้ตัวแปรในการหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติแบบเดียวกัน และการทดลองที่สอง คือ ภาพขอบที่ได้จากการใช้ตัวแปรในการหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติที่แตกต่างกัน แต่ใช้ตัวกรองเดียวกัน โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับภาพขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่ซึ่งมาจากการดำเนินการของโปรแกรมแมทแล็บ (Matlab) เพื่อหาตัวกรองและค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 8 ภาพขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่

ในการทดลองแรก จะแสดงภาพขอบที่ได้โดยการใช้ตัวกรองที่แตกต่างกัน ในรูปที่ 9 แสดงภาพขอบที่ได้โดยใช้ค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติตามวิธีการที่นำเสนอเมื่อ $p = 3$ จะเห็นว่า ภาพขอบที่ได้จากรูปที่ 9 ไม่มีการปรับค่าสีพบเส้นขอบเท็จเป็นจำนวนมาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งาน ส่วนภาพขอบที่ได้จากรูปที่ 10 มีการปรับค่าสีไม่ว่าจะใช้ตัวกรองชนิดใดจะมีความคล้ายคลึงกันมาก และมีความใกล้เคียงกับภาพขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่ ดังนั้น เพื่อให้่ายในการคำนวณ จึงเลือกใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3x3 ในการดำเนินการ



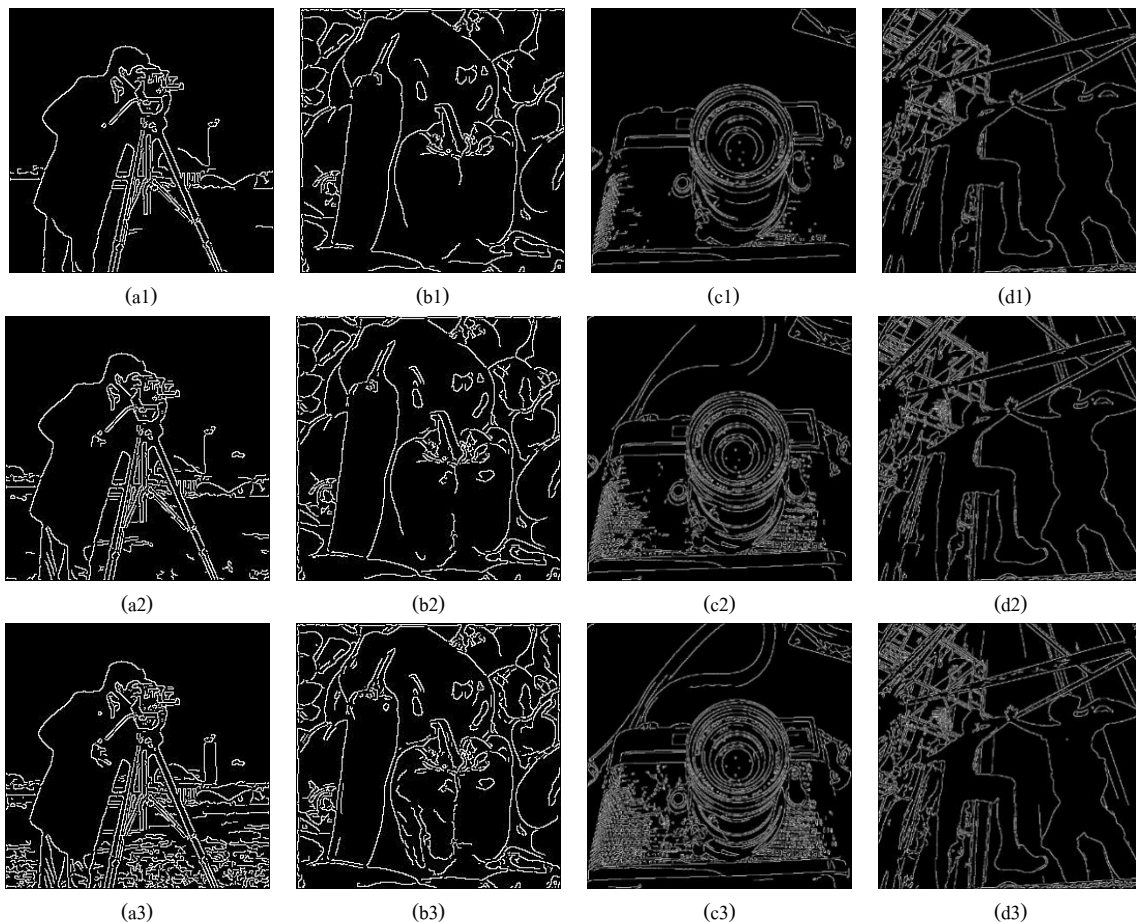
รูปที่ 9 ภาพขอบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ และใช้ตัวกรองแบบต่างๆ เมื่อใช้ $p = 3$ ในการหาเกณฑ์อัตโนมัติ:

(a1, b1, c1, d1) ได้จากรูปที่ไม่มีค่าปรับค่าสี (a2, b2, c2, d2) ได้จากการใช้ตัวกรองเกาส์เซียน ขนาด 3×3

(a3, b3, c3, d3) ได้จากการใช้ตัวกรองเกาส์เซียน ขนาด 5×5 (a4, b4, c4, d4) ได้จากการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ย ขนาด

3×3 (a5, b5, c5, d5) ได้จากการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ย ขนาด 5×5

ในการทดลองทั้งสอง จะแสดงภาพขอบที่ได้เมื่อใช้ค่า p ที่แตกต่างกันในการหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติ โดยในรูปที่ 10 จะแสดงภาพขอบที่ได้โดยใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ย ขนาด 3×3 ซึ่งจะเห็นว่า ภาพขอบที่ได้เมื่อใช้ค่า $p = 3$ จะมีความใกล้เคียงกับภาพขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่มากที่สุด

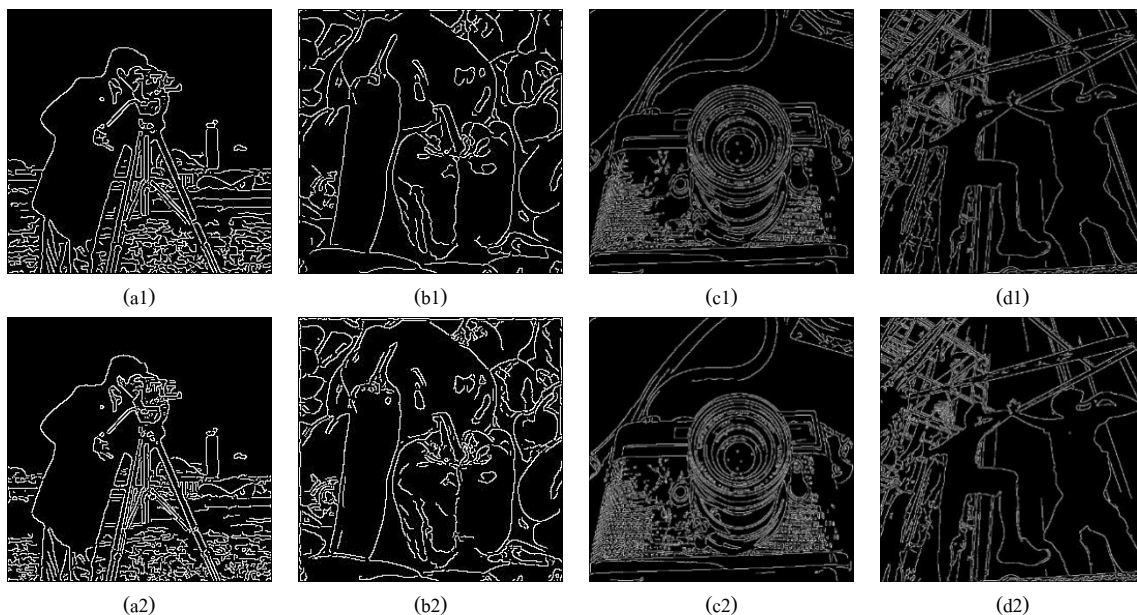


รูปที่ 10 ภาพขอบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ และใช้ค่า p ที่แตกต่างกันในการหาค่าเกณฑ์อัตโนมัติ โดยใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ย ขนาด 3×3 : (a1, b1, c1, d1) ได้จาก $p = 1$ (a2, b2, c2, d2) ได้จาก $p = 2$ (a3, b3, c3, d3) ได้จาก $p = 3$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองทั้งสอง สามารถสรุปได้ว่า วิธีที่นำเสนอสามารถให้ภาพขอบที่ดีเทียบเท่ากับวิธีแคนนี่ เมื่อใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3×3 ในการปรับค่าสีของภาพ และใช้ค่าตัวแปร $p = 3$ ในการคำนวณหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติ โดยมีการเปรียบเทียบภาพขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่และวิธีที่นำเสนอในรูปที่ 11

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

วิธีที่นำเสนอปรับปรุงมาจากวิธีแคนนี่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับวิธีการดำเนินการให้ง่ายขึ้น แต่ยังคงให้ภาพขอบที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าของเดิม ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนต่างๆ คือ การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยที่สามารถคำนวณได้ง่ายกว่าตัวกรองเกาส์เซียนในการปรับค่าสีของภาพ การปรับเปลี่ยนวิธีการหาขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าสีเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และเพิ่มวิธีการหาค่าเกณฑ์แบบอัตโนมัติเพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่ารูปขอบที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพเทียบเท่ารูปขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบภาพขอบที่ได้จากวิธีแคนนี่ กับภาพขอบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอเมื่อใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3×3 และ $p = 3$: (a1, b1, c1, d1) ได้จากวิธีแคนนี่ (a2, b2, c2, d2) ได้จากวิธีที่นำเสนอ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนเรียนดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์แห่งประเทศไทยที่มอบทุนการศึกษา และขอขอบพระคุณ อ.ดร.จิระยุทธ เวทย์วีระพงศ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาด้านวิชาการ

เอกสารอ้างอิง

- Canny J. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1986; 8(6): 679-698.
- Ding L, Goshtasby A. On the Canny edge detector. Pattern Recognition 2001; 34: 721-725.
- Gonzalez R.C, Woods R.E. Digital image processing. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall; 2008.
- Jing Tian, Weiyu Yu, Shengli Xie. An Ant Colony Optimization Algorithm For Image Edge Detection. 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation 2008; 751-756.
- Li Er-sen, Zhu Shu-long, Zhu Bao-shan, Zhao Yong, Xia Chao-gui, Song Li-hua. An Adaptive Edge-detection Method Based on the Canny Operator. 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology 2009; 465-469.
- MATLAB and Image Processing Toolbox Release 2014b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- Otsu N. A threshold selection method from gray level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 1979; 9(1): 62-66.
- Xun Wang, Jian-Qiu Jin. An Edge Detection Algorithm Based on Improved CANNY Operator. Seventh International Conference on Intelligent Systems Design and Applications 2007; 623-628.