



การประยุกต์ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์สำหรับการตรวจจับเส้นขอบของภาพสี

สำรวน เวียงสมุทร* นวภัค เอื้ออนันต์ และ วุฒิชัย พรพัชรพงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 4786 1867 อีเมล: Samruan.w@kkumail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.10.003

รับเมื่อ 14 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 19 สิงหาคม 2563 ตอรับเมื่อ 31 สิงหาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 19 ตุลาคม 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

เส้นขอบของภาพเป็นสิ่งจำเป็นต่อการประมวลผลภาพในหลายแขนง วิธีการตรวจจับเส้นขอบที่นิยมอย่างเช่นขั้นตอนวิธีของ Canny ใช้การไล่ระดับความเข้มของภาพเฉดสีเทาเพื่ออธิบายเส้นขอบโดยใช้เกรเดียนต์ แต่สารสนเทศของเกรเดียนต์ดังกล่าวนั้น ไม่สามารถใช้กับภาพสีธรรมชาติได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้งานเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณจากข้อมูลภาพสีโดยตรงเพื่อใช้เป็นสารสนเทศในการตรวจจับเส้นขอบของภาพสีธรรมชาติ แทนการใช้ขนาดของเกรเดียนต์ที่ใช้ในขั้นตอนวิธีของ Canny แบบดั้งเดิม ผลการทดลองการตรวจจับขอบโดยใช้ภาพสีในฐานข้อมูลมาตรฐาน BSDS500 แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์สามารถตรวจจับเส้นขอบในภาพสีได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การตรวจจับขอบของวิธีการที่นำเสนอกับผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีของ Canny แบบดั้งเดิมที่ใช้ขนาดของเกรเดียนต์ ผลการทดลองพบว่า วิธีการที่ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ให้ค่า F-measure ที่ดีกว่าผลลัพธ์ของวิธีการที่ใช้ขนาดของเกรเดียนต์ในทุกกรณี ทั้ง F-measure แบบ ODS, IDS และ AP ในกรณีที่ใช้ค่าขีดแบ่งแบบคงที่ และในกรณีที่ใช้ค่าขีดแบ่งแบบปรับค่าได้

คำสำคัญ: การตรวจจับขอบในภาพสี เคิร์ล สนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ สนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัด



Application of Curl of the Counter Tangential Vector Field for Edge Detection of Color Images

Samruan Wiangsamut*, Nawapak Eua-Anant and Wutthichai Phornphatcharaphong

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 4786 1867, E-mail: Samruan.w@kkumail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.10.003

Received 14 July 2020; Revised 19 August 2020; Accepted 31 August 2020; Published online: 19 October 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Information regarding edges is essential for many fields of image processing. A classical edge detection method, such as the Canny algorithm, uses the gradient of an intensity image for edge description. Nevertheless, such gradient information cannot be appropriately applied to natural color images. Therefore, this paper presents the application of curl of a counter tangential vector field, directly computed from color image data, to be used as information for edge detection in place of gradient magnitude used in the traditional Canny edge detection method. Experimental edge detection results, using color images in the BSDS500 database as benchmark data, indicate that the method using curl of a counter tangential vector field can effectively detect edges in color images. When compared with the results obtained using the traditional Canny edge detection method using gradient magnitude, it is found that the proposed method using curl of a counter tangential vector field yields the better F-measures in all ODS, IDS, and AP cases, for both fixed and adaptive thresholds.

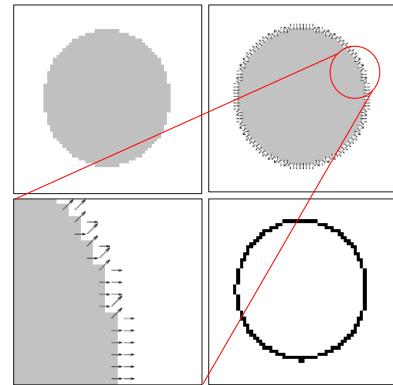
Keywords: Edge Detection of Color Images, Curl, Counter Tangential Vector Field, Normal Compressive Vector Field

Please cite this article as: S. Wiangsamut, N. Eua-Anant, and W. Phornphatcharaphong, "Application of curl of the counter tangential vector field for edge detection of color images," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, pp. 261-272, Apr.-Jun. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

การตรวจจับเส้นขอบ (Edge Detection) ของภาพ เป็นกระบวนการเริ่มต้นที่มีความสำคัญต่องานด้านการประมวลผลภาพทุกแขนง เพราะเส้นขอบจะนำไปสู่การสกัดขอบเขตของภาพ (Boundary Extraction) เพื่อนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาทางการประมวลผลภาพ เช่น การตรวจจับ/การติดตาม/การรู้จำวัตถุ การจำแนกภาพ และการค้นคืนภาพ การตรวจจับเส้นขอบเป็นกระบวนการพื้นฐานที่ประมวลผลภาพในระดับต่ำ (Low Level) โดยอาศัยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสารสนเทศบนจุดภาพ (Pixel) เช่น แสง สี เกรดสี และพื้นผิว วิธีการตรวจจับเส้นขอบตามปกติมักจะตรวจจับจากความไม่ต่อเนื่องของสารสนเทศในภาพเกรดสีเทา (Gray Scale) ซึ่งมีอยู่แนวสองทาง คือการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และการหาอนุพันธ์อันดับสอง โดยใช้พื้นฐานของเกรเดียนต์ (Gradient Base) และลาปลาเซียน (Laplacian Base) ตามลำดับ [1]–[3] ตัวดำเนินการที่นิยมใช้ในการประมาณเกรเดียนต์ ได้แก่ ตัวดำเนินการโรเบิร์ต (Robert) [4] พรีวิตต์ (Prewitt) [5] และโซเบล (Sobel) [6] ในขณะที่วิธีการที่นำเกรเดียนต์มาใช้ในการหาเส้นขอบที่มีชื่อเสียงได้แก่ วิธีการของ Canny [7] ถือเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการประมวลผลบนภาพเกรดสีเทา

เกรเดียนต์ $\nabla I = \frac{\partial I}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial I}{\partial y} \vec{j}$ เป็นปริมาณที่มีทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งแสดงถึงขนาด และทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของจุดภาพ โดยปกติบริเวณที่เป็นเส้นขอบของวัตถุจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความเข้มของจุดภาพทำให้ขนาดของเกรเดียนต์ในบริเวณนั้นมีค่าสูง ดังนั้นการตรวจจับเส้นขอบจึงมักกระทำในบริเวณที่ขนาดของเกรเดียนต์ของภาพเกรดสีเทามีค่ามาก การตรวจจับเส้นขอบด้วยเกรเดียนต์ประกอบด้วยการประมาณค่าเกรเดียนต์จากจุดภาพรอบๆ บริเวณที่สนใจแล้วตัดสินใจว่าจุดภาพดังกล่าวว่าเป็นขอบของวัตถุหรือไม่ โดยเฉพาะวิธีการ Canny มีการประเมินทั้งขนาด และทิศทางของเกรเดียนต์แล้วใช้ทิศทางของเกรเดียนต์เพื่อกำหนดทิศทางสำหรับค้นหาจุดภาพที่สนใจแล้วใช้ขนาดของเกรเดียนต์ในการกำหนดว่าจุดภาพใดควรจะเป็นจุดภาพบนเส้นขอบ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของ



รูปที่ 1 แถวบน (ซ้าย) ภาพเกรดสีเทา (ขวา) เกรเดียนต์ของภาพ แถวล่าง (ซ้าย) เกรเดียนต์บางส่วนของภาพ แถวบนขวา (ขวา) เส้นขอบ

สนามเกรเดียนต์ และเส้นขอบที่ได้จากการตรวจจับโดยใช้วิธีการของ Canny มีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่ศึกษาการใช้คุณสมบัติของเวกเตอร์มาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลภาพแทนการใช้เกรเดียนต์ เช่น การใช้เวกเตอร์แบบบีบอัดร่วมกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อสกัดอาณาเขตของวัตถุ [8] การตรวจจับเส้นขอบจากเวกเตอร์เพื่อแบ่งภาพหัวใจด้านซ้ายที่ได้จากการกำทอนทางแม่เหล็ก [9] การติดตามอาณาเขตของวัตถุแบบอัตโนมัติจากการหาอนุพันธ์อันดับสองของภาพสนามเวกเตอร์ [10]

ในการประยุกต์ใช้งาน นอกจากเกรเดียนต์จะถูกใช้ในการตรวจจับเส้นขอบแล้ว ยังมีการนำเกรเดียนต์มาใช้เป็นคุณลักษณะในการประมวลผลภาพในด้านอื่นๆ ได้ เช่น การนำขนาด และทิศทางของเกรเดียนต์ไปใช้เป็นคุณลักษณะเพื่อใช้จับคู่รายละเอียดของภาพหลายภาพที่มีมุมมองต่างกันที่เรียกว่า SIFT (Scale-invariant Feature Transform) [11] ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในงานประมวลผลภาพหลากหลายแขนง [12]–[17] การประยุกต์ใช้กราฟความถี่ของขนาด และทิศทางของเกรเดียนต์ HOG (Histogram of Oriented Gradients) เพื่อใช้เป็นคุณลักษณะในการจดจำรูปร่าง [18] เช่น การตรวจจับมนุษย์ [19]–[21] การจดจำป้ายถนน [22] การตรวจจับรถยนต์ [23] การประยุกต์ใช้เกรเดียนต์ในการฝังลายนิ้วมืออย่างมีประสิทธิภาพ [24] นอกจากนั้นแล้ว



ยังมีการนำเกรเดียนต์มาใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินคุณภาพของภาพได้อีกด้วย [25]-[28]

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเกรเดียนต์จะเป็นสารสนเทศที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการประมวลผลภาพในหลายด้าน แต่ข้อจำกัดที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานเกรเดียนต์คือนิยามของเกรเดียนต์สามารถใช้กับเฉพาะภาพสเกลาร์ หรือภาพเฉดสีเทาเท่านั้น แต่ไม่สามารถประยุกต์ใช้กับภาพที่มีหลายองค์ประกอบ เช่น ภาพสีธรรมชาติหรือภาพ Multispectral ได้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากพยายามศึกษาวิธีการประมวลผลภาพสีเพื่อค้นหาเส้นขอบ เช่น การใช้ตัวกรองความถี่สูง และต่ำเพื่อสร้างเวกเตอร์ที่เสมือนเกรเดียนต์จากภาพสี [29] การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) [30] การใช้ตรรกะแบบคลุมเคลือ (Fuzzy Logic) [31] การใช้เซตของแกน (Kernel) แบบใหม่ [32] เป็นอย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้ยังไม่อาจสร้างสนามเวกเตอร์จากภาพหลายองค์ประกอบเพื่อทดแทนการใช้งานสนามเวกเตอร์เกรเดียนต์ในการตรวจจับเส้นขอบภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้นำเสนอสนามเวกเตอร์ชนิดใหม่ที่เรียกว่าสนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัด ซึ่งคำนวณจากข้อมูลภาพสีโดยตรง [33] สนามเวกเตอร์นี้สามารถใช้ในการหาขอบของภาพสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อเป็นการต่อยอดการประยุกต์ใช้งานสนามเวกเตอร์ดังกล่าว บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการดัดแปลงสนามเวกเตอร์ดังกล่าวเพื่อใช้หาขอบของวัตถุในภาพสี วิธีการที่นำเสนอเป็นการใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ที่สร้างจากสนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัดชนิดใหม่ที่เสนอโดยคณะผู้วิจัยมาใช้ทดแทนข้อมูลขนาดของเกรเดียนต์ที่ใช้ในขั้นตอน Non Maximum Suppression ของขั้นตอนวิธีของ Canny ส่งผลให้ขั้นตอนวิธีการตรวจจับขอบของ Canny ที่แต่เดิมสามารถใช้ได้กับภาพเฉดสีเทาเท่านั้นสามารถนำมาใช้กับภาพสี หรือภาพหลายองค์ประกอบได้ วิธีการที่นำเสนอมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

เนื้อหาในหัวข้อนี้เป็นกรกล่าวถึง การสร้างสนามเวกเตอร์

แนวฉากแบบบีบอัดและสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ การคำนวณเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ และการประยุกต์ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ในการตรวจจับขอบของภาพสี โดยใช้ขั้นตอนวิธีของ Canny

2.1 สนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัด (Normal Compressive Vector Field)

ในกรณีของภาพหลายองค์ประกอบ สนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัดสามารถคำนวณได้จากข้อมูลภาพหลายองค์ประกอบโดยการรวบรวมเวกเตอร์ระยะขจัดระหว่างจุดเซนทรอยด์กับจุดศูนย์กลางของภาพ Local Color Distance ซึ่งนำเสนอโดยคณะผู้วิจัย [33] โดยใช้สมการที่ (1)

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x = \sum_{(x,y) \in N(i,j)} (x-i)d(I(i,j), I(x,y)) \\ n_y = \sum_{(x,y) \in N(i,j)} (y-j)d(I(i,j), I(x,y)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ

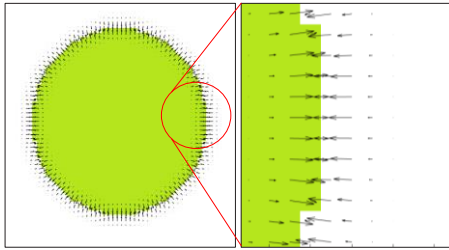
(i, j) คือ จุดภาพศูนย์กลางของหน้าต่างแบบเคลื่อนที่ (x, y) คือ จุดภาพข้างเคียงของ (i, j) ภายในหน้าต่างแบบเคลื่อนที่ $N(i, j)$

n_x และ n_y คือ ทิศทางของเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัดในแกน x และ y ตามลำดับ

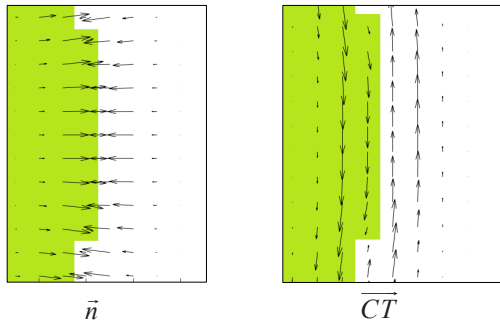
$d(I(x, y), I(i, j))$ คือ ระยะทางในปริภูมิสีระหว่างจุดศูนย์กลาง ณ จุดภาพ (i, j) กับ จุดภาพ (x, y) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$d(I(x, y), I(i, j)) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_n(x, y) - I_n(i, j))^2} \quad (2)$$

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างสนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัดที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) จากรูปจะพบว่า ทิศทางของเวกเตอร์ที่อยู่ภายใน และภายนอกวัตถุจะตั้งฉากกับเส้นขอบของวัตถุ และพุ่งเข้าหาเส้นขอบของวัตถุเสมอ ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคุณสมบัติ “การบีบอัด” ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการตรวจจับเส้นขอบต่อไปได้ กล่าวโดยสรุปว่าสนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัดเป็นสนามเวกเตอร์



รูปที่ 2 สนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัด



รูปที่ 3 (ซ้าย) สนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัด (ขวา) สนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์

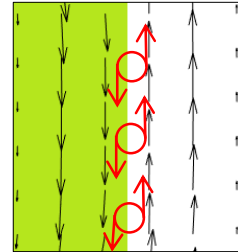
ที่มีคุณสมบัติที่ว่าเวกเตอร์ทุกตัวจะมีทิศทางตั้งฉากกับเส้นขอบในภาพ และเวกเตอร์ที่อยู่ฝั่งตรงข้ามของพื้นที่ที่ติดกันที่มีเส้นขอบวางกันจะมีทิศทางตรงข้ามกันดัง สนามเวกเตอร์นี้จะแตกต่างจากสนามเกรเดียนต์ตรงที่เวกเตอร์ในสนามเกรเดียนต์ไม่ว่าจะอยู่ฝั่งใดของเส้นขอบจะชี้ไปในทิศทางเดียวกันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 สนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ (Counter Tangential Vector Field)

เมื่อหมุนเวกเตอร์แต่ละตัวในสนามเวกเตอร์แนวฉากแบบบีบอัดไป 90 องศา ในทิศตามเข็มนาฬิกาดังสมการที่ (3) จะได้ผลลัพธ์เป็นสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3

$$\vec{CT} = \begin{bmatrix} n_y \\ -n_x \end{bmatrix} = n_y \vec{i} - n_x \vec{j} \quad (3)$$

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าเวกเตอร์ในสนามเวกเตอร์รูปขวานี้มีลักษณะขนานไปกับเส้นสัมผัสของขอบของวัตถุ และเวกเตอร์



รูปที่ 4 ลักษณะเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ ณ บริเวณขอบของวัตถุ

ที่อยู่คนละฝั่งของเส้นขอบจะมีทิศทางตรงข้ามกัน สนามเวกเตอร์นี้จึงมีชื่อเรียกว่าสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์

2.3 เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ (Curl of Counter-tangential Vector Field)

จากคุณสมบัติที่ว่าเวกเตอร์ในสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์จะมีทิศทางสัมผัสกับขอบของวัตถุ และเวกเตอร์ที่อยู่ด้านในวัตถุจะชี้ในทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกาขณะที่เวกเตอร์ภายนอกวัตถุจะชี้ในทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกาดังแสดงในรูปที่ 3 ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์มีค่าเป็นบวกและมีค่ามาก ณ บริเวณขอบของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นจึงสามารถใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์เป็นสารสนเทศเพื่อบ่งชี้ขอบของวัตถุได้

ในการคำนวณเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ งานวิจัยนี้ใช้ผลรวมของการคูณแบบ Cross Product ระหว่างเวกเตอร์ระยะขจัดจากจุดสังเกตไปยังตำแหน่งของจุดภาพรอบข้าง กับเวกเตอร์ของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ ณ จุดภาพภายในหน้าต่างเคลื่อนที่แบบวงกลมดังสมการที่ (4) และภาพเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 5

$$\vec{\nabla} \times \vec{CT} = \sum_{(x,y) \in N(i,j)} -(x-i)n_x - (y-j)n_y \quad (4)$$

เมื่อ $N(i, j)$ คือ หน้าต่างเคลื่อนที่แบบวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่จุดภาพ (i, j)

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างภาพสีตั้งต้น และภาพเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณได้โดยใช้สมการที่ (4) จาก



รูปที่ 5 (ซ้าย) ภาพสีดั้งเดิม (ขวา) ภาพเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณได้โดยใช้หน้าต่างเคลื่อนที่แบบวงกลมรัศมี 3 จุดภาพ

รูปจะเห็นได้ว่าเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์มีค่ามาก ณ บริเวณที่เป็นขอบของวัตถุ

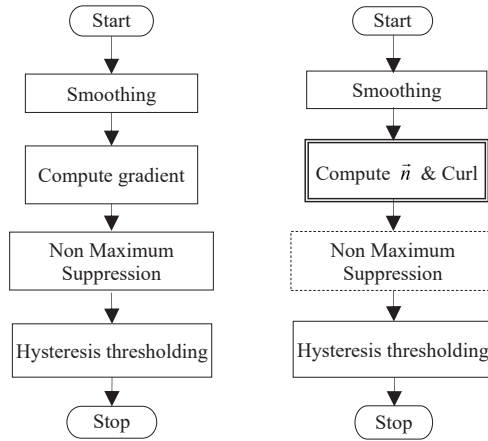
2.4 การประยุกต์ใช้เคิร์ลในการตรวจจับเส้นขอบ (Application of Curl for Edge Detection)

จากภาพเคิร์ลในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์มีสารสนเทศที่สามารถบ่งบอกตำแหน่งขอบของวัตถุในภาพสีได้อย่างมีนัยสำคัญซึ่งคล้ายกับขนาดของเกรเดียนต์ที่สามารถอธิบายสารสนเทศเกี่ยวกับขอบในภาพเฉดสีเทาได้ ดังนั้นเพื่อการตรวจจับขอบของภาพสีงานวิจัยนี้จึงได้นำเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์มาประยุกต์ใช้ทดแทนข้อมูลขนาดเกรเดียนต์ในขั้นตอนวิธีการตรวจจับขอบของ Canny ที่แต่เดิมถูกออกแบบมาให้ใช้กับภาพเฉดสีเทาเท่านั้น ขั้นตอนวิธีการตรวจจับขอบของ Canny และวิธีการที่ดัดแปลงใหม่ที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขั้นตอนวิธีของ Canny ที่ถูกดัดแปลงมาใช้สำหรับตรวจจับขอบในภาพสีที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนดังนี้

2.4.1 การปรับความราบเรียบ (Smoothing)

วิธีการของ Canny เริ่มต้นด้วยการปรับภาพ $I(i, j)$ ให้ราบเรียบโดยใช้ตัวกรองภาพความถี่ต่ำแบบเกาส์เซียน $G_\sigma(i, j)$ เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (5)



รูปที่ 6 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับขอบของ Canny (ซ้าย) การตรวจจับขอบในภาพเฉดสีเทาแบบดั้งเดิม (ขวา) การตรวจจับขอบในภาพสีที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้

$$g(i, j) = G_\sigma(i, j) * I(i, j) \tag{5}$$

เมื่อ $G_\sigma(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right)$

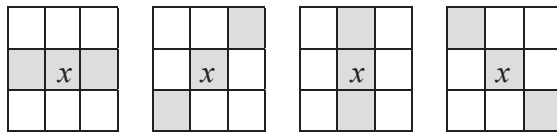
และ $g(i, j)$ คือ ภาพที่ผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวนแล้ว ในที่นี้แต่ละองค์ประกอบของภาพสีจะถูกนำไปกำจัดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองภาพตัวเดียวกัน

2.4.2 การคำนวณสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์และเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์

ในขั้นตอนนี้เดิมที่ขั้นตอนวิธีของ Canny แบบดั้งเดิมเป็นการคำนวณขนาดและทิศทางของเกรเดียนต์ของ $g(i, j)$ เพื่อใช้เป็นสารสนเทศหลักในการตรวจจับขอบ แต่ในงานวิจัยนี้ขนาดของเกรเดียนต์ถูกแทนที่ด้วยเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ $\vec{V} \times \vec{CT}$ และทิศทางของสนามเกรเดียนต์ถูกแทนที่ด้วยทิศทางของสนามแนวฉากแบบปีบอัด k ในขณะที่ขั้นตอนอื่นๆ ของขั้นตอนวิธีของ Canny ยังคงเหมือนเดิม ซึ่งการใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ และทิศทางของสนามแนวฉากแบบปีบอัดทำให้วิธีการของ Canny สามารถนำมาใช้กับภาพสีได้

2.4.3 การตรวจจับเส้นขอบแบบ Non Maximum Suppression

ขั้นตอนนี้เป็นการหาจุดภาพที่มีค่าสูงสุดเฉพาะที่ (Local



รูปที่ 7 จากซ้ายไปขวา ทิศทางการประเมินค่าเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์เฉพาะที่ ณ จุดภาพ ในทิศทาง 0, 45, 90 และ 135 องศา ตามลำดับ

Maxima) ของเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ในแนวตั้งฉากกับเส้นขอบเพื่อกำหนดให้เป็นจุดของเส้นขอบ โดยการตรวจหาจะพิจารณาเฉพาะจุดภาพที่อยู่ในแนวเดียวกันกับทิศทางของ \vec{k} เช่น ถ้ามุมของ \vec{k} ณ จุดภาพ x มีขนาดเป็น 0 องศา การพิจารณาจุดภาพจะพิจารณาเฉพาะเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ที่จุดภาพ จุดภาพทางตะวันออกและตะวันตกของจุดภาพ x เพื่อประเมินเส้นขอบของภาพ

รูปที่ 7 แสดงทิศทางการประเมินค่าเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์เฉพาะที่ใน 4 ทิศทาง

2.4.4 การใช้ค่าขีดแบ่งแบบ Hysteresis

ในขั้นตอนการตรวจจับขอบขั้นตอนสุดท้าย จุดของเส้นขอบที่ได้ในเบื้องต้นมักจะประกอบไปด้วยจุดที่เป็นขอบที่ชัดเจน (Strong Edge) และไม่ชัดเจน (Weak Edge) ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันเส้นขอบที่แท้จริง ในขั้นตอนนี้จึงมีการกำหนดค่าขีดแบ่ง (Threshold) ขึ้นมา 2 ค่า คือ ค่าขีดแบ่งต่ำ (T_L) และค่าขีดแบ่งสูง (T_H) แล้วเปรียบเทียบกับค่า $\vec{\nabla} \times \vec{CT}$ ของจุดภาพเส้นขอบเพื่อยืนยันและระบุว่าเส้นขอบขั้นสุดท้าย โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ คือ

- 1) ถ้า $\vec{\nabla} \times \vec{CT} \geq T_H$ ให้กำหนดจุดภาพดังกล่าวเป็นเส้นขอบ
- 2) ถ้า $T_L \leq \vec{\nabla} \times \vec{CT} \leq T_H$
 - 2.1) ถ้ามีจุดภาพข้างเคียงอย่างน้อย 1 จุดภาพ เป็นเส้นขอบให้กำหนดจุดภาพดังกล่าวเป็นเส้นขอบ
 - 2.2) ถ้าไม่มีจุดภาพข้างเคียงใดๆ เป็นเส้นขอบให้กำหนดจุดภาพดังกล่าวไม่เป็นเส้นขอบ
- 3) ถ้า $\vec{\nabla} \times \vec{CT} \leq T_L$ ให้กำหนดจุดภาพดังกล่าวไม่เป็นเส้นขอบ



รูปที่ 8 ตัวอย่างภาพในฐานะข้อมูล BSDS500 แถวบนคือภาพต้นฉบับ แถวที่ 2-4 ตัวอย่างผลเฉลยการแบ่งภาพด้วยมนุษย์

2.5 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ภาพสีที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้เป็นภาพสีจากฐานข้อมูลภาพมาตรฐาน BSDS500 [34] ที่รวบรวมภาพหลากหลายตัวอย่างทั้งภาพบุคคล สัตว์ พืช ธรรมชาติ และสิ่งก่อสร้าง โดยมีผลเฉลยการแบ่งส่วนภาพด้วยมนุษย์ (Ground Truth) มากกว่า 30 ตัวอย่าง ซึ่ง BSDS500 เป็นฐานข้อมูลที่นิยมใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการตรวจจับขอบกันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างภาพที่ใช้ในการทดลองแสดงดังในรูปที่ 8

ในการทดลองการตรวจจับเส้นขอบด้วยขั้นตอนวิธีของ Canny ในงานวิจัยนี้มีการเลือกใช้ค่าขีดแบ่งที่ดีที่สุดจากการทดลองทั้งการใช้เกรเดียนต์ และการใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์เป็นสารสนเทศในการตรวจจับเส้นขอบ โดยพิจารณาจากค่า F-measure คือ 0.005 และ 0.2 สำหรับ

การใช้เกรเดียนต์ และ 0.001 และ 0.005 สำหรับการใส่เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ นอกจากนั้นแล้วยังมีการทดลองด้วยค่าขีดแบ่งแบบปรับค่าได้ซึ่งเรียกว่าผลลัพธ์แบบ Soft Edge โดยกำหนดค่าขีดแบ่งต่ำที่ 0.001 ทั้ง 2 วิธี แล้วกำหนดค่าขีดแบ่งสูงที่ 0.01–0.5 สำหรับการเกรเดียนต์ และ 0.001–0.1 สำหรับการเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีการทดลองปรับค่าขีดแบ่งอยู่ 50 ช่วงเท่าๆ กัน จากนั้นนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับการแบ่งภาพด้วยมนุษย์เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้วย F-measure

2.6 การประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการตรวจจับขอบในงานวิจัยนี้ใช้ค่า F-measure [35] ที่คำนวณโดยใช้สมการที่ (6) ดังนี้

$$F - measure = 2 \frac{P \times R}{P + R} \quad (6)$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (7)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

เมื่อ P คือ ค่า Precision และ R คือ ค่า Recall

TP (True Positive) คือ เส้นขอบของภาพที่ขั้นตอนวิธีที่ตรวจจับได้ถูกต้องเมื่อเทียบกับ Ground Truth

FP (False Positive) คือ เส้นขอบของภาพที่ขั้นตอนวิธีตรวจจับได้แต่ไม่ถูกต้องตาม Ground Truth

FN (False Negative) คือ เส้นขอบของภาพที่ขั้นตอนวิธีที่ตรวจจับไม่ได้ตาม Ground Truth

ค่า F-measure ที่มากแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีในงานวิจัยนี้ค่า F-measure ประกอบด้วยค่าแบบใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับทุกภาพ (ODS) และแบบเลือกพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดเฉพาะภาพ (OIS) และแบบค่าเฉลี่ย (AP) ซึ่งจะมีค่า 0–1 และ F-measure ที่มีค่ามากจะแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีตามไปด้วย

2.7 เครื่องมือในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ชุดคำสั่งโปรแกรมแบบเปิดเผยของขั้นตอนวิธีการตรวจจับเส้นขอบแบบ Canny ภายใต้การทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 8.1 บนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) CPU i7-7410HQ v2 ที่ความถี่นาฬิกา 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์

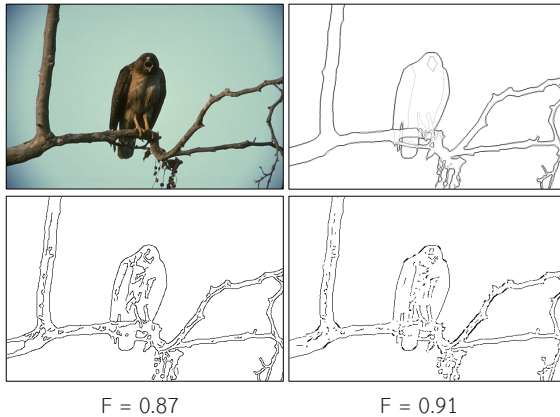
3. ผลการทดลอง

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นผลการทดลองการตรวจจับเส้นขอบของภาพโดยใช้ขั้นตอนวิธีของ Canny ที่ใช้สารสนเทศในการตรวจจับขอบเป็นเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณจากภาพสีโดยตรงเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีของ Canny แบบดั้งเดิมที่ใช้ขนาดของเกรเดียนต์ของภาพเฉดสีเทาที่แปลงมาจากภาพสีเป็นสารสนเทศในการตรวจจับขอบรูปที่ 9–10 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์การตรวจจับเส้นขอบของทั้ง 2 วิธี โดยใช้ค่าขีดแบ่งแบบคงที่และแบบปรับค่าได้

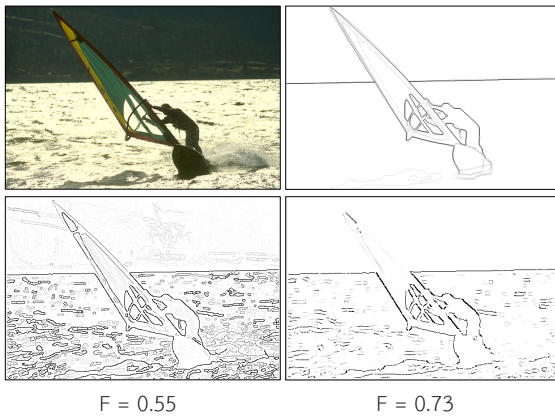
ตารางที่ 1 การประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับเส้นขอบด้วยเกรเดียนต์และเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์

	ODS	OIS	AP
Ground Truth	0.79	0.79	-
ค่าเกณฑ์คงที่			
เกรเดียนต์	0.53	0.53	0.41
เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์	0.59	0.59	0.51
ค่าเกณฑ์ปรับได้			
เกรเดียนต์	0.57	0.60	0.55
เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์	0.61	0.63	0.61

จากตารางที่ 1 และในรูปที่ 11 แสดงผลการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับขอบระหว่างขั้นตอนวิธีของ Canny ที่ใช้ขนาดของเกรเดียนต์กับขั้นตอนวิธีของ Canny ที่ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์โดยใช้ภาพชุด

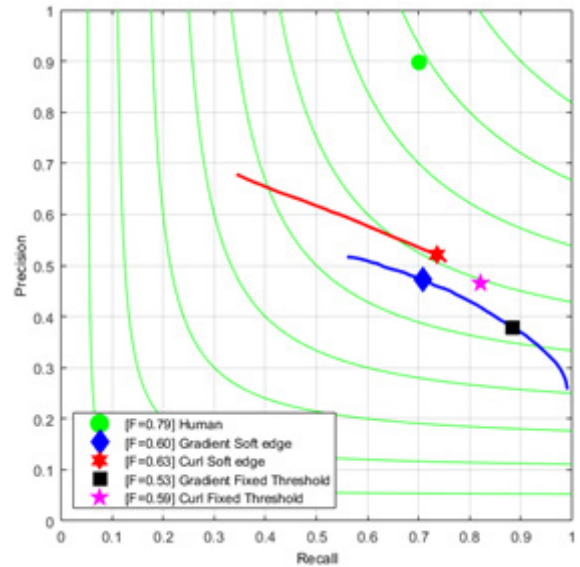


รูปที่ 9 ผลลัพธ์การตรวจจับเส้นขอบโดยใช้ค่าขีดแบ่งแบบคงที่จากซ้ายไปขวา แถวบน ภาพต้นฉบับและ Ground Truth ตามลำดับ แถวล่าง ผลลัพธ์การตรวจจับเส้นขอบโดยใช้เกรเดียนต์และเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลลัพธ์การตรวจจับเส้นขอบโดยใช้ค่าขีดแบ่งแบบปรับค่าได้ จากซ้ายไปขวา แถวบน ภาพต้นฉบับและ Ground Truth ตามลำดับ แถวล่าง ผลลัพธ์การตรวจจับเส้นขอบโดยใช้เกรเดียนต์และเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ ตามลำดับ

ข้อมูลทดสอบในฐานข้อมูล BSDS500 ทั้งหมด 100 ภาพ ผลการทดลองตามตารางที่ 1 และรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าการตรวจจับเส้นขอบโดยใช้ขั้นตอนวิธีของ Canny ที่ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์เป็นสารสนเทศในการตรวจจับ



รูปที่ 11 กราฟ Precision-Recall เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับเส้นขอบโดยใช้ขนาดของเกรเดียนต์และเคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์เป็นสารสนเทศในการตรวจจับขอบ ทั้งแบบค่าขีดแบ่งคงที่ (Fixed Threshold) และค่าขีดแบ่งแบบปรับค่าได้ (Soft Edge)

ขอบให้ผลลัพธ์ F-measure แบบ ODS, OIS และ AP ดีที่สุดที่ค่าขีดแบ่งแบบปรับค่าได้ คือ 0.61, 0.63 และ 0.61 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า F-measure ของเกรเดียนต์มีค่าเป็น 0.57, 0.60 และ 0.55 ตามลำดับ

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลลัพธ์การตรวจจับขอบโดยใช้ขั้นตอนวิธีของ Canny ที่ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีของ Canny แบบดั้งเดิมที่ใช้ขนาดของเกรเดียนต์ซึ่งประเมินด้วยค่า F-measure แบบ ODS, OIS และ AP แสดงให้เห็นว่าการใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ขนาดของเกรเดียนต์ในการตรวจจับขอบทั้งในกรณีของขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าขีดแบ่งคงที่และปรับค่าได้ เพราะผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้เกรเดียนต์ประกอบด้วยเส้นขอบของภาพจำนวนมากที่เป็นขอบที่ไม่สำคัญหรือเป็นขอบที่ผิดพลาด จึงทำให้ค่า F-measure มีค่าต่ำ



ซึ่งเท่ากับ 0.229 ในภาพ 304034.jpg ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ประกอบด้วยเส้นขอบจำนวนไม่มาก แต่เส้นขอบที่ได้เป็นเส้นขอบสำคัญที่มีลักษณะคล้ายกับผลเฉลย Ground Truth ที่ได้จากมนุษย์ ซึ่งมีค่า F-measure เท่ากับ 2.70 ในภาพเดียวกัน ดังนั้นผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีที่ใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์จึงมีความถูกต้องมากกว่า กล่าวโดยสรุป การใช้เคิร์ลของสนามเวกเตอร์ปฏิสัมพันธ์ซึ่งคำนวณจากข้อมูลภาพสี่โดยตรงเป็นสารสนเทศในการตรวจจับขอบทำให้ขั้นตอนวิธีของ Canny สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับเส้นขอบของภาพสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dharampal and V. Mutneja, "Methods of image edge detection: A review," *Journal of Electrical & Electronic Systems*, vol. 4, 2015.
- [2] R. V. Ramana, T. V. Rathnam, and A. S. Reddy, "A review on edge detection algorithms in digital image processing applications," *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 5, pp. 69–75, 2017.
- [3] S. Asha and R. R. Kanna, "A survey on content based image retrieval based on edge detection," *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 5, pp. 8272–8275, 2014.
- [4] L. Roberts, "Machine perception of three-dimensional solids," Ph.D dissertation, Department of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [5] J. Prewitt, "Object enhancement and extraction," *Picture Processing and Psychopictorics*, vol. 59, 1970.
- [6] I. Sobel, "An isotropic 3x3 gradient operator," *Machine Vision for Three-Dimensional Scenes*, Freeman, H., 1990, pp. 376–379.
- [7] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, pp. 679–698, 1986.
- [8] N. Eua-Anant and L. Udpa, "Boundary extraction algorithm based on particle motion in a vector image field," in *Proceedings of International Conference on Image Processing*, 1997, pp. 732–735, vol.2 .
- [9] K. Somkantha, N. Theera-Umpon, and S. Auephanwiriyakul, "Left ventricular segmentation of cardiac magnetic resonance images using a novel edge following technique," in *Proceedings of 2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2008, pp. 169–174.
- [10] F. Yang, L. D. Cohen, and A. M. Bruckstein, "A model for automatically tracing object boundaries," in *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017, pp. 2692–2696.
- [11] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, pp. 91–110, 2004.
- [12] X. Yu, H. Lei, Y. Du, B. Li, X. Yuan, W. Gao, Z. Song, and P. Zheng, "Image matching algorithm with color information based on SIFT," in *Proceedings Volume 10806, Tenth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2018)*, 2018.
- [13] J. Dou, q. Qin, and Z. Tu, "Hierarchical image matching algorithm based on SIFT," in *Proceedings 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018, pp. 5819–5822.



- [14] M. Sharif, S. Khan, T. Saba, M. Raza, and A. Rehman, "Improved video stabilization using SIFT-Log polar technique for unmanned aerial vehicles," Presented at the 2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS), Sakaka, Saudi Arabia, Saudi Arabia, 2019.
- [15] A. Dudhal, H. Mathkar, A. Jain, O. Kadam, and M. Shirole, "Hybrid SIFT feature extraction approach for Indian sign language recognition system based on CNN," in *Proceedings of the International Conference on ISMAC in Computational Vision and Bio-Engineering 2018 (ISMAC-CVB)*, 2019, pp. 727–738.
- [16] S. Liu, X. Yan, P. Li, X. Hao, and K. Wang, "Radar emitter recognition based on SIFT position and scale features," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, pp. 2062–2066, 2018.
- [17] A. Manickam, E. Devarasan, G. Manogaran, M. K. Priyan, R. Varatharajan, C.-H. Hsu, and R. Krishnamoorthi, "Score level based latent fingerprint enhancement and matching using SIFT feature," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, pp. 3065–3085, 2019.
- [18] R. K. T. McConnell, *Method of and Apparatus for Pattern Recognition*. United States, 1986.
- [19] N. Dalal and B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection," in *Proceedings 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 2005, pp. 886–893, vol. 1.
- [20] D. Sangeetha and P. Deepa, "Efficient scale invariant human detection using histogram of oriented gradients for IoT services," in *Proceedings 2017 30th International Conference on VLSI Design and 2017 16th International Conference on Embedded Systems (VLSID)*, 2017, pp. 61–66.
- [21] T. Surasak, I. Takahiro, C. Cheng, C. Wang, and P. Sheng, "Histogram of oriented gradients for human detection in video," in *Proceedings 2018 5th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*, 2018, pp. 172–176.
- [22] T. K. Islam, S. Wijewickrema, G. R. Raj, and S. O'Leary, "Street sign recognition using histogram of oriented gradients and artificial neural networks," *Journal of Imaging*, vol. 5, no. 4, pp. 44, 2019.
- [23] N. Laoprasitthachorn, K. Sunat, and S. Chiewchanwattana, "A novel feature selection in vehicle detection through the selection of dominant patterns of histograms of oriented gradients (DPHOG)," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20894–20919, 2019.
- [24] S. Suthaharan, "Fragile image watermarking using a gradient image for improved localization and security," *Pattern Recognition Letters*, vol. 25, pp. 1893–1903, 2004.
- [25] L. Liu, Y. Hua, Q. Zhao, H. Huang, and A. C. Bovik, "Blind image quality assessment by relative gradient statistics and adaboosting neural network," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 40, pp. 1–15, 2016.
- [26] M. Oszust, "No-reference image quality assessment with local gradient orientations," *Symmetry*, vol. 11, no. 1, pp. 95, 2019.
- [27] B. Jiang, J. Yang, Q. Meng, B. Li, and W. Lu, "A deep evaluator for image retargeting quality by geometrical and contextual interaction," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 50, no. 1,



- pp. 1–13, 2018.
- [28] H. Deng, D. Zhang, T. Wang, K. Ji, F. Wang, Z. Liu, Y. Xiang, Z. Jin, and W. Cao, “Objective image-quality assessment for high-resolution photospheric images by median filter-gradient similarity,” *Solar Physics*, vol. 290, pp. 1479–1489, 2015.
- [29] E. Nezhadarya and R. K. Ward, “A new scheme for robust gradient vector estimation in color images,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 20, no. 8, pp. 2211–2220, 2011.
- [30] Y. Liu, M.-M. Cheng, X. Hu, K. Wang, and X. Bai, “Richer convolutional features for edge detection,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 3000–3009.
- [31] C. González, P. Melin, and O. Castillo, “Edge detection method based on general type-2 fuzzy logic applied to color images,” *Information*, vol. 8, no. 3, pp. 104, 2017.
- [32] E. Avots, H. S. Arslan, L. Valgma, J. Gorbova, and G. Anbarjafari, “A new kernel development algorithm for edge detection using singular value ratios,” *Signal, Image and Video Processing*, vol. 12, pp. 1301–1309, 2018.
- [33] W. Phornphatcharaphong, “Boundary extraction of multispectral image based on a model of particle motion in vector fields,” Ph.D. dissertation, The Graduate School, Khon Kaen University, 2020 (in Thai).
- [34] D. Martin, C. Fowlkes, D. Tal, and J. Malik, “A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics,” in *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*, 2001, pp. 416–423, vol.2.
- [35] D. R. Martin, C. C. Fowlkes, and J. Malik, “Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color, and texture cues,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, pp. 530–549, vol. 26.