ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับการมองเห็นสีของการคั่วเมล็ดกาแฟโดยใช้โอเพนซีวี

Computational method for color vision of coffee bean roasting using openCV

ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย[1*], ประเสริฐ เผ่าชู[2], เอกพล อนุสุเรนทร์[1], ชูศักยฐ์ กมลขันติธร[1], วินัย เมธาวิทิต[1]

Chainarong Wisassakwichai[1*], Prasert Phaochoo[2], Ekkapol Anusurain[1], Choosak Kamonkhantithorn[1], Winai Methavithit[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

[2]สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

[1]Division of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

[2]Division of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep

*Corresponding author. Tel.: 08 1343 7693 E-mail: chainarong.w@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ให้มีความอิสระต่อคอมพิวเตอร์แพลตฟอร์ม สามารถทำได้สำเร็จโดยการใช้ภาษาการโปรแกรมที่เหมาะสม บทความนี้จึงได้นำเสนอ ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับการมองเห็นสีของการคั่วเมล็ดกาแฟ ใช้ทรัพยากรเปิดของภาษาการโปรแกรมซีพลัสพลัส ภาพดิจิตอลจะถูกปฏิบัติการประมวลผลบนไฟล์ข้อมูลภาพบันทึกอยู่ในหน่วยความจำสำรองของระบบคอมพิวเตอร์ วัตถุเชิงโปรแกรมของไฟล์ข้อมูลภาพถูกสร้างขึ้นด้วยไลบรารีของโอเพนซีวี (OpenCV, open source computer vision library) โดยใช้ปริภูมิสีแบบเอชเอสวี (HSV, hue-saturation-value color space) โดยที่ช่องสีต่าง ๆ จะแยกออกอยู่ในหน่วยวัตถุของการโปรแกรมเชิงวัตถุ การปรับเท่าฮีสโตแกรมจะดำเนินการบนหน่วยวัตถุที่เลือกสำหรับการแผ่ขยายค่าความเข้ม ก่อนที่ทั้งหมดจะถูกจำลองด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็นไม่ต่อเนื่องของความเข้มสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง ตัวแทนสีเชิงตัวเลขของเมล็ดกาแฟคั่วจะถูกกำหนดด้วยค่าคาดหมายและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถปฏิบัติการได้ทั้งเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวแบบราสเบอร์รีพาย ที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์และใช้ระบบปฏิบัติการลีนุกซ์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: คอมพิวเตอร์วิทัศน์ การประมวลผลภาพดิจิตอล วัตถุเชิงโปรแกรม ปริภูมิสีแบบเอชเอสวี การปรับเท่าฮีสโตแกรม การแจกแจงความน่าจะเป็น ค่าคาดหมาย ตัวแปรสุ่ม

Received 24-04-2019
Revised 17-06-2019
Accepted 24-06-2019

Abstract

Development of software for computer vision system which does not depend upon computer platforms can be accomplished by appropriate programming language. This paper presents the computational method for color vision of coffee bean roasting using the open source of C++ programing language. Digital image processing is performed on the image file recording in secondary memory unit of computer system. The programmatic object of image file is created by the library of OpenCV (open source computer vision) using HSV (hue-saturation-value) color space where the color channels separate into the instances of object-oriented programming. The histogram equalization operates on selected instance for intensity stretching before all of them are modeled with discrete probability distribution of color intensity in red green and blue. The numerical color representations of roast coffee beans are determined by expected values and standard deviation of random variables. The developed program can execute in both personal computer and Raspberry Pi computer single board with Widows and Linux operating system respectively.

Keywords: Computer vision, Digital image processing, Programmatic object, HSV color space, Histogram equalization, Probability distribution, Expected value, Random variables

1. บทนำ

การประมวลผลภาพดิจิตอลให้เอาต์พุตเป็นข้อมูลเข้าสู่กระบวนการแปลความหมาย เพื่อคอมพิวเตอร์จะมีความสามารถเห็นความแตกต่างของวัตถุ จำแนกประเภท ตลอดจนสามารถจัดเรียงวัตถุได้ตามขนาด ทั้งหมดนับได้เป็นกระบวนการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ดังจะพบได้ในการควบคุมหุ่นยนต์งานอุตสาหกรรมแบบเลือกและวาง (pick and place) ได้ใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ [1] ในที่ซึ่งกล้องจะถูกติดตั้งไว้หน้าพื้นที่ทำงาน เพื่อเชื่อมโยงภาพเข้ากับโปรแกรมประมวลผลภาพ การรู้จำวัตถุ เพื่อถ่ายโอนวัตถุจากระบบพิกัดของจุดภาพไปเป็นระบบพิกัดทำงานจริง แต่สำหรับงานทางด้านประเมินคุณภาพอาหารได้มีการแบ่งเป็นลำดับขั้นการทำงานตั้งแต่ [2-3] การจัดหาภาพ การประมวลผลเบื้องต้น การแยกบริเวณภาพ การเลือกหรือการสกัดลักษณะสมบัติเฉพาะ และการจัดประเภท ภาพดิจิตอลถูกจำลองในลักษณะแถวลำดับ 2 มิติ ของความเข้มสีกำหนดค่าเชิงตัวเลข $f(x,y)$ เมื่อคู่อันดับของจำนวนเต็ม (x,y) คือพิกัดเชิงพื้นที่ (Spatial coordinate) ของจุดภาพ [4] การวิเคราะห์สีของอาหารเพื่อกำหนดคุณภาพ จะมีการแยกภาพดิจิตอลออกเป็นช่องสีในปริภูมิเอชเอสวี [5-6] ทำให้สามารถกำหนดเส้นแบ่งเขต (Threshold) ในช่องสีส่วนประกอบของปริภูมิสีเพื่อให้เกิดการแยกบริเวณสี (Color segmentation) สำหรับกำจัดส่วนพื้นหลังออกจากส่วนบริเวณภาพที่ต้องการวิเคราะห์ภาพดิจิตอลซึ่งมีจำนวนจุดภาพ N จุดและความเข้มสีกำหนดเชิงตัวเลขอยู่ในช่วงปิด $f_k(x_i,y_j)\in[0,L]$ เมื่อ $k=0,1,2,\ldots,L$

ขณะ ที่ $i, j \in [0, N-1]$ จะสามารถคำนวณค่าฮีสโตแกรมได้ในลักษณะ

$$h(f_k) = \sum_{n=1}^{n_k} 1$$

เมื่อ n_k คือจำนวนจุดภาพที่มีความเข้มสีกำหนดค่าเชิงตัวเลขเท่ากับ $f_k \triangleq f_k(x_i, y_j)$ Laurent และคณะ [7] แยกภาพดิจิตอลออกเป็นช่องสีเพื่อคำนวณฮีสโตแกรม ซึ่งพบว่าการประมวลผลภาพโดยใช้ฮีสโตแกรมสี มีแบบรูปการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญสัมพันธ์กับความยากในการปรุงสุกของเมล็ดถั่วแขก

เป้าหมายของงานในที่นี้คือ พัฒนาระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์กำหนดค่าสีตัวแทนของภาพเมล็ดกาแฟจากการคั่ว โดยใช้ค่าคาดหมายและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม บ่งชี้ภาพสีตัวแทนที่สามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าสีระดับของการคั่วกำหนดไว้ก่อน สำหรับการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ของการคั่วเมล็ดกาแฟได้ทั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ และคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวแบบราสเบอร์รีพายที่ใช้ระบบปฏิบัติการลีนุกซ์

1.1 หลักการที่เกี่ยวข้อง

การวางมาตรฐานทางสีของ CIE (Commission internationale del'Eclairage) ได้กำหนดสามสีปฐมภูมิโดยใช้ค่าความยาวคลื่นได้แก่ 435.8 , 546.1 และ 700 nm สำหรับ สีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง ตามลำดับ

1.1.1 ปริภูมิสี

ปริภูมิสีอาร์จีบี (RGB color space) เป็นลูกบาศก์หนึ่งหน่วยที่แต่ละแกนพิกัดคือสีปฐมภูมิเรียงลำดับสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงิน จุดสีดำคือตำแหน่งของจุดกำเนิด จุดภายในลูกบาศก์คือสีต่าง ๆ กำหนดจากพิกัดค่าสีปฐมภูมิที่จุดนั้น กรณีที่ใช้เลขฐาน 2 จำนวน 8 บิต ในแต่ละสีปฐมภูมิ สีแดงสว่าง (Bright red) มีพิกัด (255, 0, 0) สีเขียวสว่าง (Bright green) มีพิกัด (0, 255, 0) และสีน้ำเงินสว่าง (Bright blue) มีพิกัด (0, 0, 255) แนวเส้นทแยงจากจุด (0, 0, 0) ไปยัง (255, 255, 255) คือโทนสีเทา (Grey scale) สำหรับภาพขนาด $m \times n$ ที่จุดใด ๆ ในปริภูมิอาร์จีบีสามารถส่งไปยังแนวเส้นทแยงโทนสีเทาด้วยภาพฉายของเวกเตอร์สามมิติ

$$gray = [r \;\; g \;\; b]\left[1/\sqrt{3} \;\; 1/\sqrt{3} \;\; 1/\sqrt{3}\right]^T$$

เมื่อจำนวนเต็ม $r, g, b \in [0, 255]$ คือพิกัดสีในปริภูมิ ทำการปรับขนาดโทนสีเทา $gray$ ให้อยู่ในช่วงปิด $[0, 255]$ ดังนี้

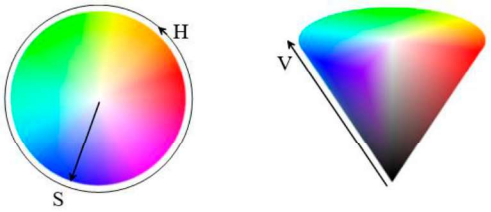
$$Gray = gray\left(\frac{255}{255\sqrt{3}}\right) = \frac{1}{\sqrt{3}}\, gray$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณโทนสีเทา $Gray \in [0, 255]$ ให้กับพิกัดสีในปริภูมิสีอาร์จีบีได้ด้วยสูตร

$$Gray = \frac{R + G + B}{3}$$

เมื่อ $Gray, R, G$ และ B คือเมทริกซ์ขนาด $m \times n$ โดยให้สัญลักษณ์อักษร mat แสดงถึงเมทริกซ์ทั้ง 4 นี้ และ $< mat >_{ij}$ คือสมาชิกตำแหน่งใด ๆ ที่นิยามค่าจำนวนเต็มในช่วง $< mat >_{ij} \in [0, 255]$

ปริภูมิสีเอชเอสวี (HSV color space) เป็นปริภูมิที่มี 3 ช่องสี (Channels) เช่นเดียวกับ ปริภูมิสีอาร์จีบีที่ประกอบด้วยช่องสีแดง ช่องสีเขียว และช่องสีน้ำเงิน แต่ปริภูมิเอชเอสวีจะประกอบด้วย ช่องเนื้อสี (hue; H) ช่องความอิ่มตัวของสี (Saturation; S) ช่องค่าความสว่างของแสง (Value; V) ซึ่งจัดเป็นช่องการมองเห็นสีสอดคล้องกับมนุษย์มากกว่าปริภูมิอาร์จีบี ด้วยเพราะมนุษย์ใช้ความสว่างของแสงในการจำแนกโทนสี ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปริภูมิสีเอชเอสวี

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริภูมิสีอาร์จีบีกับปริภูมิสีเอชเอสวีได้แก่ [8]

$$v = \max(r,g,b)$$

$$s = \begin{cases} \frac{v-\min(r,g,b)}{v} & if\ v \neq 0 \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

$$h = \begin{cases} \frac{60(g-b)}{v-\min(r,g,b)} & if\ v=r \\ 120+\frac{60(b-r)}{v-\min(r,g,b)} & if\ v=g \\ 240+\frac{60(r-g)}{v-\min(r,g,b)} & if\ v=b \end{cases}$$

$$h \leftarrow h+360 \quad if\ h<0$$

เมื่อ $0 \le r,g,b \le 1$ คือพิกัดสีในปริภูมิสีอาร์จีบี(ปรับขนาด) และ h, s และ v คือพิกัดสีในปริภูมิสีเอชเอสวี

1.1.2 ฮีสโตแกรมของภาพดิจิตอล

ภาพดิจิตอลโทนสีเทาที่ใช้เลขฐาน 2 จำนวน 8 บิต จะแสดงค่าระดับความเข้มโทนสีเทาได้ 256 ระดับ มีผลรวมค่าฮีสโตแกรมทุกระดับคือ

$$\sum_{k=0}^{255} h(f_k) = \sum_{k=0}^{255}\sum_{n=1}^{n_k} 1 = \sum_{k=0}^{255} n_k$$

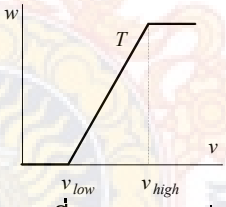
ในกรณีภาพมีขนาด $m \times n$ ผลรวมค่าฮีสโตแกรมทุกระดับจึงเท่ากับจำนวนจุดภาพทั้งหมดหรือ

$$\sum_{k=0}^{255} n_k = mn$$

โดยที่การกระจายตัวของฮีสโตแกรมในระนาบ xy ($x=k$, $y=h$) จะส่งผลต่อภาพปรากฏ การแผ่ขยายกราฟฮีสโตแกรมที่รวมกลุ่มอยู่ในช่วงระดับความเข้มหนึ่งออกไป จะส่งผลให้การเปรียบต่าง (Contrast) ของภาพปรากฏดีขึ้น การแผ่ขยายกราฟฮีสโตแกรมสามารถทำได้โดยการแปลงค่าระดับความเข้ม

$$w = T(v)$$

เมื่อ w และ v คือระดับความเข้มโทนสีเทาของภาพใหม่และเดิมตามลำดับ การแปลงค่าระดับความเข้มดังภาพที่ 2 คือการปรับเปรียบต่างแบบอัตโนมัติ (Automatic contrast adjustment) [9]



$$w = \begin{cases} 0 \\ (v-v_{low})\frac{255}{v_{high}-v_{low}} \\ 255 \end{cases}$$

ภาพที่ 2 การแปลงค่าระดับความเข้มแบบการปรับเปรียบต่างแบบอัตโนมัติ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในอุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับกาแฟ ยังขาดการกำหนดคำศัพท์เฉพาะเป็นข้อตกลงร่วมกันในการกำหนดระดับของเมล็ดกาแฟคั่ว ทำให้เกิดความสับสนในกลุ่มของนักคั่วกาแฟและผู้บริโภค อย่างไรก็ตามมีการแบ่งระดับการคั่วออกเป็น 6 ระดับได้แก่ [10] Cinnamon, City, Full city, Vienna, French และ Italian การให้ความร้อนเมล็ดกาแฟโดยการคั่ว

จะทำให้สีของเมล็ดกาแฟเปลี่ยนแปลง นำไปสู่การจัดระดับของการคั่วเมล็ดกาแฟดังภาพที่ 3

ภาพที่ 3 ระดับสีการคั่วเมล็ดกาแฟ (ที่มา : Dan Bollinger - Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org)

2.1 ตัวแปรหน่วยความจำภาพเมล็ดกาแฟคั่ว

ปริภูมิสีอาร์จีบีถูกใช้ในการแสดงผลภาพสีบนจอภาพคอมพิวเตอร์ ดังนั้นภาพเมล็ดกาแฟคั่วขนาด $m \times n$ จุดภาพจะต้องใช้เมทริกซ์ mat ตามขนาดภาพ จำนวน 3 เมทริกซ์สำหรับช่องสี R, G และ B ทำให้ภาพเมล็ดกาแฟคั่วเขียนได้ในลักษณะเมทริกซ์แต่งเติม (Augmented matrix) ดังนี้

$$^{RGB}Mat = \left[R \vdots G \vdots B\right]$$

ค่าระดับความเข้มสีในช่องสีใด ๆ เช่นช่องสี R จึงจะเขียนแทนด้วย

$$\left\langle {}^{RGB}Mat.R \right\rangle_{ij} = r$$

เมื่อ rคือระดับความเข้มสีในช่องสี R การสร้างตัวแปรหน่วยความจำสำหรับเมทริกซ์ Mat โดยภาษาการโปรแกรมซีพลัสพลัส ประกอบร่วมกับไลบรารีของโอเพนซีวี [11] ที่เป็นแบบทรัพยากรเปิดจะมีลักษณะข้อความสั่งดังต่อไปนี้

```
Mat CofRstImg =
        Imread(RstBean.jpg);
```

เมื่อ `Mat` คือวัตถุเชิงโปรแกรมของโอเพนซีวี `CofRstImg` คือชื่อตัวแปรหน่วยความจำตั้งขึ้นสำหรับหน่วยวัตถุข้อมูลภาพในปริภูมิสีอาร์จีบี และ `RstBean.jpg` คือไฟล์ข้อมูลภาพเมล็ดกาแฟคั่ว ถ้าให้ r = 127 แล้ว $\langle Mat.R \rangle_{ij}$ ดังสมการข้างต้นจะเขียนเป็นข้อความสั่งได้ดังนี้

```
CofRstImg.at<Vec3b>(i,j)[3]=127;
```

2.2 การปรับเท่าฮีสโตแกรม

ภาพดิจิตอลเมล็ดกาแฟคั่วเดียวกัน ถ่ายในสภาพแสงที่แตกต่างกัน สามารถส่งผลต่อระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตัดสินใจระบุค่าระดับสีที่ไม่เหมือนกันซึ่งนับเป็นข้อด้อย ดังนั้นเพื่อลดความไวแสงของเหตุการณ์นี้จึงทำการปรับเท่าฮีสโตแกรมให้กับช่องค่าความสว่างของแสง ของภาพเมล็ดกาแฟคั่วในปริภูมิเอชเอสวี ในการนี้จะประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function) แปลงค่าระดับความเข้ม [12]

$$w = T(v) = \int_0^v p_v(s)ds \qquad 0 \le v \le 1$$

เมื่อ s คือตัวแปรหุ่น (Dummy variable) ของการหาปริพันธ์ $p_v(v)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ที่การแปลงมีสมบัติ $0 \le T(v) \le 1$ เป็นฟังก์ชันค่าเดียวและเพิ่มขึ้นทางเดียว ทำให้

ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของความเข้มใหม่เป็นแบบเอกรูป

$$p_w(w) = \left[p_v(v)\frac{dv}{dw} \right]_{v=T^{-1}(w)} = 1$$

สำหรับการปรับเท่าฮิสโตแกรม ซึ่งในงานวิจัยนี้ $p_v(v)$ ไม่ต่อเนื่องและคำนวณค่าจาก

$$p_v(v_k) = \frac{n_k}{mn}$$

เมื่อ $p_v(v_k)$ คือการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability distribution) ของตัวแปรสุ่ม v_k ทำให้ต้องกำหนดสมการแปลงค่าระดับความเข้มในรูปปริพันธ์ข้างต้นใหม่เป็น

$$w_{v_k} = T(v_k) = \sum_{j=0}^{v_k} \frac{n_j}{mn} = \sum_{j=0}^{v_k} p_v(v_k)$$

ทำการแปลงปริภูมิสีอาร์จีบี เป็นปริภูมิสีเอชเอสวีที่เขียนแทนด้วย

$$^{HSV}Mat \leftarrow {}^{RGB}Mat$$

เมื่อ ^{HSV}Mat คือเมทริกซ์แต่งเติมสำหรับช่องสี H, S และ V

$$^{HSV}Mat = [H \vdots S \vdots V]$$

ทำการเขียนฮีสโตแกรมของช่องค่าความสว่างของแสงในรูปเมทริกซ์แถวดังนี้

$$H(^{HSV}Mat.V) = \left[n_0\ n_1\ n_2 \ldots n_k \ldots n_{255} \right]$$

เมื่อ n_k คือค่าฮีสโตแกรม $h(f_k)$ ทำให้สามารถคำนวณเมทริกซ์การแจกแจงความน่าจะเป็น

$$P = \frac{H(^{HSV}Mat.V)}{mn} = \left[p_0\ p_2\ p_3 \ldots p_k \ldots p_{255} \right]$$

จึงคำนวณค่าจำนวนเต็มระดับความเข้มใหม่จาก

$$\langle V' \rangle_{ij} = w_{\langle V \rangle_{ij}} = 255 \times \sum_{k=0}^{\langle V \rangle_{ij}} \langle P \rangle_k$$

โดยที่จำนวนเต็ม $\langle V' \rangle_{ij} \in [0, 255]$ สำหรับการปรับปรุงภาพดิจิตอลใหม่

$$^{HSV}Mat' = [H \vdots S \vdots V'] \leftarrow {}^{HSV}Mat = [H \vdots S \vdots V]$$

ซึ่งสามารถดำเนินงานด้วยไลบรารีของโอเพนซีวีด้วยข้อความสั่ง

```
equalizeHist(src, dst);
```

เมื่อ `src` คือ $^{HSV}Mat.V$ และ `dst` คือ $^{HSV}Mat'.V'$

2.3 คำนวณสีเมล็ดกาแฟคั่วด้วยค่าทางสถิติ

ด้วยมุมมองการกระจายตัวค่าระดับความเข้มสีในภาพดิจิตอลคือตัวแปรสุ่ม ที่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง คำนวณค่าได้ดังนี้

$$^{RGB}Mat' = \left[R' \vdots G' \vdots B'\right] \leftarrow {}^{HSV}Mat' = \left[H \vdots S \vdots V'\right]$$

$$P_r = \frac{H(^{RGB}Mat'.R')}{mn}$$

$$P_g = \frac{H(^{RGB}Mat'.G')}{mn}$$

$$P_b = \frac{H(^{RGB}Mat'.B')}{mn}$$

เมื่อ P_r, P_g และ P_b คือการแจกแจงความน่าจะเป็นไม่ต่อเนื่องของระดับความเข้มสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินตามลำดับ นำไปสู่ค่าคาดหมายของแต่ละสีปฐมภูมิ โดยการกำหนดให้ L คือเมทริกซ์แถวของระดับความเข้มสี

$$L = \left[0\ 1\ 2\ \ldots\ k\ \ldots\ 255\right]$$

ค่าคาดหมายจึงคำนวณด้วยสูตร

$$E_r = P_r L^T,\ E_g = P_g L^T \text{ และ } E_b = P_b L^T$$

ภาพสีตัวแทนของภาพเมล็ดกาแฟคั่ว $^{RGB}Mat^*$ จะคำนวณได้โดย

$$\left\langle {}^{RGB}Mat^*.R \right\rangle_{ij} = E_r \quad \forall\ i, j$$

$$\left\langle {}^{RGB}Mat^*.G \right\rangle_{ij} = E_g \quad \forall\ i, j$$

$$\left\langle {}^{RGB}Mat^*.B \right\rangle_{ij} = E_b \quad \forall\ i, j$$

$$^{RGB}Mat^* = \left[R \vdots G \vdots B\right]$$

ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละช่องสีดังนี้

$$S_r = \sqrt{P_r D_r (L - E_r I_R)^T}$$

$$S_g = \sqrt{P_g D_g (L - E_g I_R)^T}$$

$$S_b = \sqrt{P_b D_b (L - E_b I_R)^T}$$

เมื่อเมทริกซ์ทแยงมุม D_k คือ

$$D_k\Big|_{k=r,g,b} = \begin{bmatrix} 0-E_k & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1-E_k & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 2-E_k & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3-E_k & \cdots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 255-E_k \end{bmatrix}$$

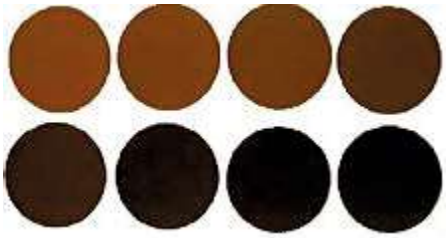
และ I_R คือเมทริกซ์แถว $I_R = \left[1\ 1\ 1\ \ldots\ 1\ \ldots\ 1\right]_{1\times 256}$ ทั้งค่าคาดหมายและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้ด้วยข้อความสั่ง ที่ใช้ฟังก์ชันของไลบรารีของโอเพนซีวีดังนี้

```
meanStdDev(srcRGB, Ergb, Srgb);
```

เมื่อ `srcRGB` คือหน่วยวัตถุเชิงโปรแกรมข้อมูลภาพสำหรับ $^{RGB}Mat' = \left[R' \vdots G' \vdots B'\right]$ โดยที่ `Ergb` และ `Srgb` คือตัวแปรหน่วยความจำแถวลำดับของค่าคาดหมาย E_r, E_g, E_b และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน S_r, S_g, S_b

2.4 ขั้นตอนวิธีคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่ว

การวัดระดับเมล็ดกาแฟคั่วว่าอยู่ระดับใดในทางปฏิบัติได้มีการใช้แผ่นวัสดุสีเทียบการคั่ว (Roast color tiles) มีระดับสีแสดงดังภาพที่ 4 [13]



ภาพที่ 4 แผ่นวัสดุสีเทียบการคั่วเมล็ดกาแฟ

จากภาพจะสังเกตได้ว่ามีทั้งหมด 8 ระดับ โดยระดับที่เข้มที่สุดเป็นระดับ Italian/Spanish หมายความว่าแผ่นวัสดุเทียบสีการคั่ว มีสีระดับการคั่วขึ้นมากว่าก่อนหน้าอีก 2 ระดับ

$input(^{RGB}Mat=[R:G:B],m,n,L,D_r,D_g$
$D_b,I_R)$
$^{HSV}Mat=[H:S:V]\leftarrow{}^{RGB}Mat=[R:G:B]$
$equalizeHist(^{HSV}Mat)$
$^{RGB}Mat'=[R':G':B']\leftarrow{}^{HSV}Mat'=[H:S:V']$
$meanStdDev(^{RGB}Mat')$

ภาพที่ 5 ขั้นตอนวิธีคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่ว

ขั้นตอนวิธีในภาพที่ 5 ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณค่าตัวแทนสี ของภาพเมล็ดกาแฟคั่ว E_r, E_g และ E_b พร้อมทั้งค่าส่วนเบี่ยงมาตรฐาน ซึ่งค่าตัวแทนสีนี้นำไปสร้างภาพดิจิตอล $^{RGB}Mat^*=[R:G:B]$ ของภาพเมล็ดกาแฟคั่วได้โดยมีขั้นตอนวิธีสำหรับฟังก์ชัน *equalizeHist* และ *meanStdDev* แสดงดังภาพที่ 6 และ 7

$input(^{HSV}Mat)$
$^{HSV}Mat'=[H:S:V']\leftarrow{}^{HSV}Mat=[H:S:V]$
$P=\frac{H(^{HSV}Mat.V)}{mn}$
$for\ i=0\ to\ m\ step\ 1$
$for\ j=0\ to\ n\ step\ 1$
$\left\langle {}^{HSV}Mat.V' \right\rangle_{ij}=255\times\frac{\left\langle {}^{HSV}Mat.V \right\rangle_{ij}}{\sum_{k=0}}\langle P\rangle_k$
$end\ for$
$end\ for$

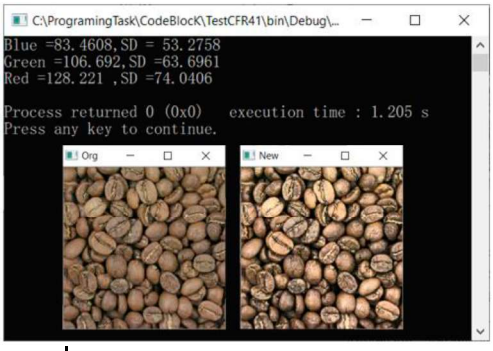
ภาพที่ 6 ขั้นตอนวิธีคำนวณ *equalizeHist*

$input(^{RGB}Mat')$
$for\ i=r,g,b\ according\ to\ I=R,G,B$
$P_i=\frac{H(^{RGB}Mat'.I)}{mn}$
$E_i=P_iL^T$
$S_i=\sqrt{P_iD_i(L-E_iI_R)^T}$
$end\ for$

ภาพที่ 7 ขั้นตอนวิธีคำนวณ *meanStdDev*

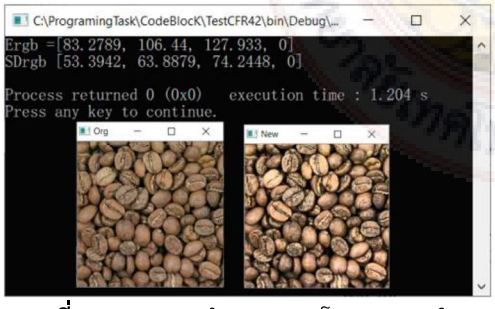
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เมื่อนำขั้นตอนวิธีที่สร้างขึ้นในภาพที่ 5 ไปพัฒนาโปรแกรม ด้วยภาษาการโปรแกรมซีพลัสพลัส จะมีลักษณะดังภาพที่ ก.1 ในภาคผนวก ก. และใช้ภาพดิจิตอลของเมล็ดกาแฟคั่วในภาพที่ 3 ที่ระดับคั่ว Cinnamon บันทึกอยู่ในหน่วยความจำสำรอง ของระบบคอมพิวเตอร์ใช้ชื่อไฟล์ “Cinnamon.png” สำหรับเป็นข้อมูลเข้าให้กับขั้นตอนวิธีคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟ ผลการทำงานของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 8 ได้ค่าตัวแทนสีแดง 128.2210 ค่าตัวแทนสีเขียว 106.6920 และ ค่าตัวแทนสีน้ำเงิน 83.4608



ภาพที่ 8 ผลการทำงานของโปรแกรมคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วจากขั้นตอนวิธีในภาพที่ 5 - 7

ภาพเมล็ดกาแฟคั่วระดับ Cinnamon ทางซ้ายของภาพที่ 8 เป็นภาพดั้งเดิมที่ยังไม่ปรับเท่าฮีสโตแกรมส่วนทางขวาปรับเท่าฮีสโตแกรมแล้วจึงนำเข้าสู่การคำนวณค่าตัวแทนสี อย่างไรก็ตามผลการทำงานแบบเดียวกัน แต่ใช้ฟังก์ชันในไลบรารีของโอเพนซีวี ปรับเท่าฮีสโตแกรม ตลอดจนคำนวณค่าคาดหมาย และส่วนเบี่ยงมาตรฐาน แทนที่จะใช้ขั้นตอนวิธีที่สร้างขึ้นในภาพที่ 6 - 7 ของบทความส่งผลให้การพัฒนาโปรแกรมทำได้ง่ายขึ้นดังโปรแกรมในภาพที่ ก.3 (ภาพผนวก ก.) นำไปสู่ผลการทำงานที่แตกต่างออกไปเล็กน้อยดังภาพที่ 9

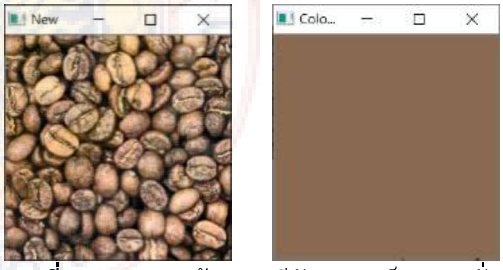


ภาพที่ 9 ผลการทำงานของโปรแกรมคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วโดยใช้ไลบรารีของโอเพนซีวี

การใช้ฟังก์ชันในไลบรารีของโอเพนซีวี ทำให้ผลตัวแทนสีของเมล็ดการแฟคั่วระดับ Cinnamon ในภาพที่ 9 แตกต่างจากภาพที่ 8 ไปเล็กน้อย โดยค่าตัวแทนสีแดง 127.9330 ค่าตัวแทนสีเขียว 106.4400 และค่าตัวแทนสีน้ำเงิน 83.2789 ทั้งนี้ในการที่จะทำให้ผลการทำงานของโปรแกรม เทียบเคียงได้กับแผ่นวัสดุสีเทียบการคั่วเมล็ดกาแฟ ดังภาพที่ 4 ค่าตัวแทนสีจึงถูกแปลงเป็นภาพตัวแทนสีด้วยขั้นตอนวิธีในภาพที่ 10 โดยจะมีผลการทำงานดังภาพที่ 11

$$
\begin{aligned}
&input(\,^{RGB}Mat = [R \vdots G \vdots B]\, m, n, E_r, E_g, E_b)\\
&\quad for\ i = 0\ to\ m\ step\ 1\\
&\qquad for\ j = 0\ to\ n\ step\ 1\\
&\qquad\quad for\ k = r, g, b\ according\ to\\
&\qquad\qquad K = R, G, B\\
&\qquad\qquad \left\langle \,^{RGB}Mat.K \right\rangle_{ij} = E_k\\
&\qquad\quad end\ for\\
&\qquad end\ for\\
&\quad end\ for
\end{aligned}
$$

ภาพที่ 10 ขั้นตอนวิธีสร้างภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่ว



ภาพที่ 11 ผลการสร้างภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่ว

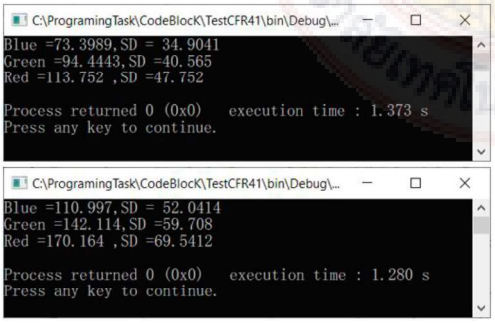
ผลการทำงานของโปรแกรมยังสามารถเปรียบ เทียบกับการเฉลี่ยสีของภาพดิจิตอลแบบออนไลน์บนเว็บไซต์ http://matkl.github.io/average-color/ ซึ่งมีผลการทำงานดังภาพที่ 12

ภาพที่ 12 ผลการเฉลี่ยสีของภาพเมล็ดกาแฟคั่วโดยใช้เว็บไซต์แบบออนไลน์

ผลการเฉลี่ยสีของภาพเมล็ดกาแฟคั่วดังภาพที่ 12 ให้ผลลัพธ์ค่าสีแดง 127 ค่าสีเขียว 106 และค่าสีน้ำเงิน 83 ซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกันมากกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ผลการปรับเท่าฮีสโตแกรมจะส่งผลให้ค่าตัวแทนสีของภาพเดียวกันแต่ให้แสงสว่างไม่เท่ากัน 2 ภาพ มีสภาพคงทนต่อความสว่างของภาพโดยจะสังเกตได้จากภาพเมล็ดกาแฟคั่วเดียวกัน 2 ภาพ แต่อีกภาพปรับสภาพความสว่างเพิ่มขึ้น 2 เท่า

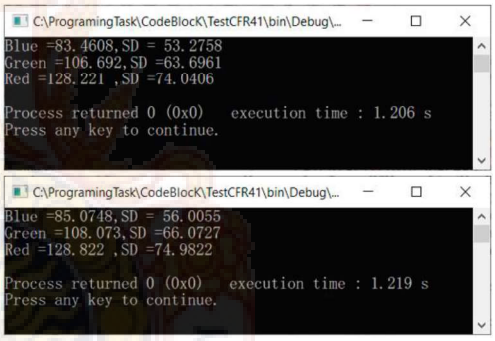
ภาพที่ 13 ภาพเมล็ดกาแฟคั่วเดียวกันปรับความสว่าง ต่างกัน 1 เท่า

จากเดิม ผลการใช้โปรแกรมคำนวณค่าสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่วทั้ง 2 ภาพดังปรากฏในภาพที่ 13 คือ

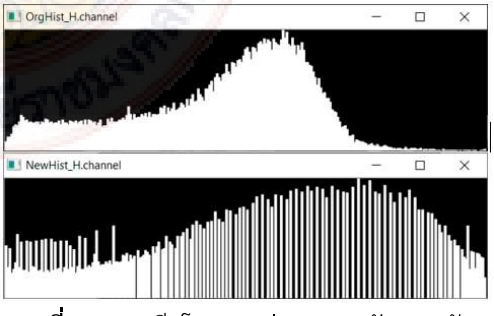


ภาพที่ 14 ผลคำนวณสีตัวแทนภาพเมล็ดกาแฟคั่วความสว่างต่างกัน 1 เท่าที่มีการปรับเท่าฮีสโตแกรม

เห็นได้จากผลการคำนวณในภาพข้างต้นว่า มีความแตกต่างค่าสีตัวแทนแต่ละค่าไม่เกิน 2 หน่วย แต่ในขณะที่ไม่มีการใช้การปรับเท่าฮีสโตแกรม ในขั้นตอนวิธีคำนวณค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่ว จะได้ผลดังภาพที่ 15 มีความแตกต่างของค่าสีตัวแทนแต่ละสีเกินกว่า 37 หน่วย นอกจากนี้ ในการปรับเท่าฮีสโตแกรมซึ่งส่งผลให้ การกระจายตัวของฮีสโตแกรมของภาพขยายกว้างขึ้น จะสามารถสังเกตได้จากการนำค่าฮีสโตแกรมในช่องค่าความสว่างของแสง V ก่อนและหลังการปรับเท่าฮีสโตแกรมไปวาดกราฟ มีผลดังภาพที่ 16 โดยภาพด้านบนคือภาพฮีสโตแกรมของช่องค่าความสว่างของแสง V ของเมล็ดกาแฟคั่วเดิม ส่วนภาพล่างคือฮีสโตแกรมที่ได้หลังการปรับเท่าฮีสโตแกรมแล้ว



ภาพที่ 15 ผลคำนวณสีตัวแทนภาพเมล็ดกาแฟคั่วความสว่างต่างกัน 1 เท่าไม่มีการปรับเท่าฮีสโตแกรม



ภาพที่ 16 ภาพฮีสโตแกรมก่อนและหลังการปรับเท่าฮีสโตแกรม

เห็นได้ชัดว่าการปรับเท่าฮีสโตแกรมที่ทำให้ค่าฮีสโตแกรมมีกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้ส่วนเบี่ยง เบนมาตรฐานมีค่าสูงดังผลการทำงานในภาพที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำงานในภาพที่ 15 ที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าอย่างเด่นชัด การสร้างภาพสีตัวแทนสี ด้วยระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์ของบทความนี้สำหรับภาพเมล็ดกาแฟคั่วตามภาพที่ 3 ทั้ง 6 ระดับได้ผลแสดงดังภาพที่ 17 และ 18

ภาพที่ 17 ผลภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่วโดยปรับเท่าฮีสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ

ตารางที่ 1 ผลคำนวณค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วปรับเท่าฮีสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ

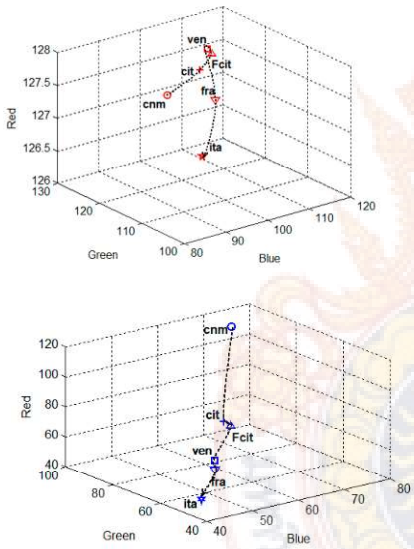
ระดับคั่ว	ขั้นตอนวิธีบทความวิจัย			ค่าเฉลี่ยสีของภาพ (ออนไลน์)			ความแตกต่าง		
	B	G	R	B	G	R	B	G	R
cnm	83	107	128	83	106	127	-	1	1
cit	96	112	128	97	113	128	1	1	-
Fcit	103	116	128	103	115	128	-	1	-
ven	104	118	128	104	118	127	-	-	1
fre	110	122	127	109	122	127	1	-	-
ita	111	126	126	110	125	126	1	1	-

ตารางที่ 2 ผลคำนวณค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วไม่ปรับเท่าฮีสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ

ระดับคั่ว	ขั้นตอนวิธีบทความวิจัย			ค่าเฉลี่ยสีของภาพ (ออนไลน์)			ความแตกต่าง		
	B	G	R	B	G	R	B	G	R
cnm	73	94	114	73	94	113	-	-	1
cit	58	68	77	57	67	77	1	1	-
Fcit	59	67	74	59	66	73	-	1	1
ven	51	58	62	51	57	62	-	1	-
fre	50	56	58	50	55	57	-	1	1
ita	43	48	48	42	48	48	1	-	-

ภาพที่เป็นข้อมูลเข้าให้กับขั้นตอนวิธีทางคอม พิวเตอร์ที่สร้างขึ้น ในแต่ละระดับการคั่วถูกปรับขนาดภาพลดลงจาก 800×800 เหลือ 200×200 จุดภาพ และมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการคำนวณค่าเฉลี่ยสีของภาพที่ได้จากเว็บไซต์ออนไลน์ดังแสดงในภาพที่ 12 พบว่ามีระดับค่าตัวแทนใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในตารางที่ 1 - 2 ซึ่งนับเป็นผลการพัฒนาโปรแกรมบนไอดีอี (Integrated development environment; IDE) ที่เป็นแบบทรัพยากรเปิดรู้จักในนาม “CODE::BLOCK” รุ่น 17.12 โดยใช้ตัวแปลโปรแกรม (Compiler) “GNU GCC” บนระบบปฏิบัติการ “Windows 10” ตัวประมวลผล “Intel(R) Core (TM) i7- 8750H CPU@2.2 GHz” นอกจากนี้ยังได้ทดลองปฏิบัติโปรแกรมบนไอดีอีและตัวแปลโปรแกรมเดียวกันบนคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวราสเบอร์รีพาย 3 รุ่นบี (Raspberry pi 3 model B) บนระบบปฏิบัติการ Linux raspberrypi 4.14.93-v7, armv71 GNU/Linux ซึ่งได้ผลการทำงานเหมือนกันทุกประการ

ภาพที่ 18 ผลภาพสีตัวแทนภาพเมล็ดกาแฟคั่วไม่ปรับเท่าฮีสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ



ภาพที่ 19 กราฟตำแหน่งค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วจากผลการคำนวณในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

การเคลื่อนที่ของพิกัดสีในปริภูมิอาร์จีบี ของกราฟด้านบนในภาพที่ 19 จากคั่วอ่อนที่สุดไปถึงคั่วเข้มที่สุด 6 ระดับ เป็นผลจากการคำนวณในตารางที่ 1 โดย 4 ระดับแรกมีลักษณะเคลื่อนที่ในทิศทางการเพิ่มค่าของพิกัดสีเขียวและสีน้ำเงิน บนระนาบแกนพิกัดสีแดงคงที่ ขณะที่ 2 ระดับสุดท้ายค่าพิกัดสีแดงจะมีทิศทางลดลงเล็กน้อย แต่สำหรับกราฟด้านล่างเป็นผลจากการคำนวณในตารางที่ 2 การเคลื่อนที่ของพิกัดสีในปริภูมิอาร์จีบีจากคั่วอ่อนที่สุดไปถึงคั่วเข้มที่ สุดมีทิศทางลดลงทั้ง 3 สี

4. สรุปผลการวิจัย

ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น ทำให้ภาพดิจิตอลของการคั่วเมล็ดกาแฟ ถูกแสดงแทนด้วยข้อมูลเชิงตัวเลข 3 ค่าคือ ตัวแทนสีน้ำเงิน สีเขียวและสีแดงพร้อมทั้งสร้างภาพตัวแทนสี ที่สามารถนำไปพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ในอุตสาหกรรมยุคที่ 4.0 ด้วยภาษาการโปรแกรมซีพลัสพลัสบนแหล่งทรัพยากรเปิดได้ทั้งหมด สำหรับระบบอัตโนมัติการคั่วเมล็ดกาแฟเชิงอุตสาหกรรมหรือในครัวเรือน จากผลการทดลองพบว่าการปรับเท่าฮีสโตแกรมในช่องค่าความสว่างของปริภูมิเอชเอสวี ของภาพดิจิตอลเมล็ดกาแฟคั่วที่ระดับใด ๆ ทำให้ค่าตัวแทนสีมีความคงทนต่อสภาพแสงที่เปลี่ยนไป และข้อมูลตัวแทนสีมีแบบรูปการเคลื่อนที่ของค่าพิกัดสีที่แน่นอน ตามลำดับของภาพดิจิตอลเมล็ดกาแฟคั่วจากระดับอ่อนไปจนถึงเข้มที่สุด ผลการทำงานของระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์ ให้ผลการคำนวณต่างกันเพียงเล็กน้อย ในระดับเลข ทศนิยม เมื่อเทียบกับการใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปของไล บรารีโอเพนซีวีบางฟังก์ชัน ที่ทำการคำนวณอย่างเดียวกัน จึงนับเป็นหนทางให้สามารถนำขั้นตอนวิธีของบทความนี้ไปพัฒนาโปรแกรมบนแพลตฟอร์มอื่นที่ไม่สามารถใช้ไลบรารีโอเพนซีวีได้ ดังเช่นในระ ดับไมโครคอนโทรลเลอร์ และเมื่อนำผลการคำนวณตัวแทนสี ไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าเฉลี่ยสีของภาพดิจิตอลแบบออนไลน์ พบว่ามีผลใกล้เคียงกัน

5. อ้างอิง

[1] Andhare P, Rawat SP. Pick and Place Industrial Robot Controller with Com puter Vision. 2016 International Conference on Computing Commu nication Control and automation (ICCUBEA); 2016 Aug 12-13; Pune, India: IEEE; 2016:1-4.

[2] Mery D, Pedreschi F, Soto A. Automated Design of a Computer Vision System for Visual Food Quality Evaluation. Food and Bioprocess Technology, 2013; 6(8): 2093-2108.

[3] Priyadharshini K, Akila R. A Survey on Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation. IJIRCCE 2016; 4(8): 14860–65.

[4] Habib MT, Majumder A, Jakaria AZM, et al. Machine Vision Based Papaya Disease Recognition. Journal of King Saud Uni versity-Computer and Infor mation Sciences, 2018.

[5] Trientin D, Hidayat B, Darana S. Beef Freshness Classification by Using Color Analysis, Multi-wavelet Transformation and Artificial Neural Network. 2015 International Conference on Automa tion, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Infor mation Technology (ICACOMIT); 2015 Oct 29-30; Bandung, Indonesia: IEEE; 2015:181-85.

[6] Adi K, Pujiyanto S, Nurhayati OD, et al. Beef Quality Identifica tion Using Color Analysis and K-nearest Neighbor Classification. 2015 4th International Conference on Instrumen tation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME); 2015 Nov 2-3; Bandung, Indonesia: IEEE; 2015:180-4.

[7] Laurent B, Ousman B, Dzudie T,et al. Digital Camera Images Processing of Hard-to-Cook Beans. J Eng Tech Res, 2010; 2(9): 177 – 88.

[8] Garcia G, Suarez OD, Aranda JLE, et al. Learning Image Processing with Open CV. Birmingham: Packt Publishing Ltd; 2015

[9] Burger W, Burge MJ. Principles of Digital Image Processing: Fundamental Techniques. London: Springer-Verlag London Limited; 2009.

[10] Rao S. The Coffee Roaster's Compa nion. Canada: Scott Rao; 2014.

[11] Kaehler A, Bradski G. Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with The OpenCV library. Tokyo: O'Reilly Media, Inc.; 2017.

[12] Gonzalez RC, Woods RE. Digital Image Processing. New Jersey: Prentice Hall; 2002.

[13] Sinnott K. The Art and Craft of Coffee: An Enthusiast's Guide to Selecting, Roasting, and Brewing Exquisite Coffee. Massachusetts: Quarry Books; 2011.

7. ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

```cpp
#include "opencv2/highgui/highgui.hpp"
#include "opencv2/imgproc/imgproc.hpp"
#include <iostream>
using namespace cv; using namespace std;
void histogramPlot(Mat, String);
void colorPlot(Mat, Mat*);
int main( int argc, char** argv)
{ Mat MatRGB=imread("cinnamon.png");
  namedWindow("Org", 1);
  imshow("Org", MatRGB);
  Mat MatHSV;
  cvtColor(MatRGB, MatHSV, CV_BGR2HSV);
  vector<Mat>colorSpaceHSV;
  split(MatHSV, colorSpaceHSV);
  Mat Mat_Hue=colorSpaceHSV[2].clone();
  int imgRow=MatRGB.rows, imgCol=MatRGB.cols;
  Mat histData; int nBins=256;
  int hsize[]={ nBins };
  float range[]={0, 256};
  const float *ranges[]={ range };
  int chnls[]={0};
  calcHist(&Mat_Hue, 1, chnls, Mat(),
           histData,1,hsize,ranges);
  histogramPlot(histData, "OrgHist_H.channel");
  Mat Pr=histData/sum(histData)[0];
  Mat Mat_nHue = Mat_Hue.clone();
  float CPD[256]; Mat L=cv::Mat(1,256,CV_32F);
  for(int i=0; i<256; i++)
    {  CPD[i]=0.0; L.at<float>(i)=(float)i;
       for( int j=0; j<=i; j++)
          CPD[i] += Pr.at<float>(j);    }  uchar k;
  for (int i=0; i<imgRow; i++)
    { for (int j=0; j<imgCol; j++)
        {   k=Mat_Hue.at<uchar>(i,j);
            Mat_nHue.at<uchar>(i,j)=
            (uchar)round(255*CPD[k]);        } }
  calcHist(&Mat_nHue , 1, chnls, Mat(),
           histData,1,hsize,ranges);
  histogramPlot(histData, "NewHist_H.channel");
  Mat nMatHSV, nMatRGB; colorSpaceHSV[2]=Mat_nHue;
  merge(colorSpaceHSV, nMatHSV);
  cvtColor(nMatHSV, nMatRGB, CV_HSV2BGR);
  vector<Mat> colorSpaceRGB;
  split(nMatRGB, colorSpaceRGB);
  Mat histRGB[3], Prb[3], Expt[3];
  Mat R1(1,256,CV_32FC1,Scalar(1.0)), D[3], Var[3];
  Mat IL=Mat::eye(256,256, CV_32F);
  for(int i=0; i<256; i++)
     IL.at<float>(i,i)=i;
  calcHist(&colorSpaceRGB[0] , 1, chnls,
           Mat(), histRGB[0],1,hsize,ranges);
  calcHist(&colorSpaceRGB[1] , 1, chnls,
           Mat(), histRGB[1],1,hsize,ranges);
  calcHist(&colorSpaceRGB[2] , 1, chnls,
           Mat(), histRGB[2],1,hsize,ranges);
  namedWindow( "New", 1 );
  imshow( "New", nMatRGB );
  for(int i=0; i<3; i++)
     { Prb[i]=histRGB[i]/sum(histRGB[i])[0];
       Expt[i]=Prb[i].t()*L.t();
       D[i]=IL-Mat::eye(256,256, CV_32F)*
            Expt[i].at<float>(0);
       Var[i]= Prb[i].t()*D[i]*(L.t()-
               Expt[i].at<float>(0)*R1.t()); }
  cout<<"Blue ="<< round(Expt[0].at<float>(0))
      <<",SD = "<<sqrt(Var[0].at<float>(0))<<"\n";
  cout<<"Green ="<<round(Expt[1].at<float>(0))
      <<",SD ="<<sqrt(Var[1].at<float>(0))<< "\n";
  cout<<"Red ="<<round(Expt[2].at<float>(0))
      <<" ,SD ="<<sqrt(Var[2].at<float>(0))<<"\n";
  colorPlot(MatRGB, Expt);
  waitKey();
  return 0;
}
```

ภาพที่ ก1. โปรแกรมคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วจากขั้นตอนวิธีในภาพที่ 5 – 7

```cpp
void colorPlot(Mat MatRGB, Mat *Expt)
{  Mat ColrRep = MatRGB.clone();
   for (int i=ColrRep.rows/3; i<ColrRep.rows; i++)
   { for (int j=0; j<ColrRep.cols; j++)
      {  ColrRep.at<Vec3b>(i,j)[0]=
                round(Expt[0].at<float>(0));
         ColrRep.at<Vec3b>(i,j)[1]=
                round(Expt[1].at<float>(0));
         ColrRep.at<Vec3b>(i,j)[2]=
                round(Expt[2].at<float>(0));
      }
   }
   namedWindow( "ColorRep", 1 );
   imshow( "ColorRep", ColrRep );
}

void histogramPlot(Mat histData, String Name)
{  Mat histBuff, histImg;
   normalize(histData, histBuff,
             0, 1, NORM_MINMAX, -1, Mat() );
   histImg=imHist(histBuff,2,2);
   namedWindow(Name, 1 );
   imshow(Name,histImg);
}
```

ภาพที่ ก2. ฟังก์ชันสร้างภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่วตามขั้นตอนวิธีในภาพที่ 10 และวาดกราฟฮีสโตแกรมในภาพที่ 16

```cpp
#include "opencv2/highgui/highgui.hpp"
#include "opencv2/imgproc/imgproc.hpp"
#include <iostream>
using namespace cv; using namespace std;
void histogramPlot(Mat,String);
void colorPlot(Mat,Scalar);
int main( int argc, char** argv )
{ Mat MatRGB=imread("cinnamon.png");
  namedWindow( "Org", 1 );imshow( "Org",MatRGB );
  Mat MatHSV; cvtColor(MatRGB, MatHSV,CV_BGR2HSV);
  vector<Mat>colorSpaceHSV;split(MatHSV,colorSpaceHSV);
  Mat Mat_Hue=colorSpaceHSV[2].clone();
  Mat histData;int nBins = 256;
  int hsize[]={ nBins };
  float range[]={0,256};const float *ranges[]={range};
  int chnls[] = {0};
  calcHist(&Mat_Hue,1,chnls,Mat(),histData,1,hsize,ranges);
  histogramPlot(histData, "NewHist_H.channel");
  Mat src = Mat_Hue.clone(), dst;
  equalizeHist( src, dst );
  calcHist(&dst,1,chnls,Mat(),histData,1,hsize,ranges);
  histogramPlot(histData, "NewHist_H.channel");
  Mat nMatHSV, nMatRGB; colorSpaceHSV[2] = dst;
  merge(colorSpaceHSV, nMatHSV);
  cvtColor(nMatHSV, nMatRGB, CV_HSV2BGR);
  Scalar Ergb, SDrgb;meanStdDev(nMatRGB, Ergb,SDrgb);
  cout<<"Ergb ="<<Ergb<<"\n"<<"SDrgb "<<SDrgb<<"\n";
  colorPlot(MatRGB, Ergb);
  waitKey();
  return 0;
}
```

ภาพที่ ก3. โปรแกรมคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกา แฟคั่ว โดยใช้ฟังก์ชันในไลบรารีของโอเพนซีวีในการปรับเท่าฮีสโตแกรม คำนวณค่าคาดหมาย และส่วนเบี่ยงมาตรฐาน