



การปรับปรุงภาพสีจอตาในปริภูมิสี HSI แบบไม่เป็นเชิงเส้น
Color Retinal Enhancement in Improved Nonlinear Hue-Saturation-Intensity
(iNHSI)

ธานี จินตสุทธิศักดิ์

Thani Jintasuttisak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Science in Computer Sciences

Prince of Songkla University

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การปรับปรุงภาพสีจอตาในปริภูมิสี HSI แบบไม่เป็นเชิงเส้น
Color Retinal Enhancement in Improved Nonlinear Hue-Saturation-Intensity
(iNHSI)

ธานี จินตสุทธิศักดิ์

Thani Jintasuttisak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Computer Sciences

Prince of Songkla University

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงภาพสีจอตาในปริภูมิสี HSI แบบไม่เป็นเชิงเส้น
ผู้เขียน	นายธานี จินตสุทธิศักดิ์
สาขาวิชา	วิทยาการคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต อินทจักร์)

(รองศาสตราจารย์ สักกริยา ชิตวงศ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต อินทจักร์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาดา เวทย์ประสิทธิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลงานมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต อินทจักร์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายธานี จินตสุทธิศักดิ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อนและ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายธานี จินตสุทธิศักดิ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงภาพสีจอตาในปริภูมิสี HSI แบบไม่เป็นเชิงเส้น
ผู้เขียน	นายธานี จินตสุทธิศักดิ์
สาขาวิชา	วิทยาการคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

ภาพถ่ายจอประสาทตานี้มีความสำคัญสำหรับจักษุแพทย์เพื่อที่จะใช้ในการระบุและตรวจสอบโรคต่างๆที่สามารถระบุสัญญาณการเกิดโรคได้จากจอตา และโรคที่มีความเกี่ยวข้องกับ การมองเห็นของมนุษย์ เช่น โรคเบาหวาน และ โรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น จากกระบวนการได้มาซึ่งภาพถ่ายจอตานี้มักจะได้อาพที่มีความคมชัดต่ำ ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ข้อมูลเนื่องจาก รายละเอียดของภาพไม่ชัดเจน วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการปรับปรุงคุณภาพ และเพิ่มความคมชัดของภาพถ่ายจอตา เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพที่มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยการปรับปรุงคุณภาพนั้นจะปรับปรุงในระบบสี iNHSI ซึ่งประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบด้วยกันได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าความอิ่มตัว และ ค่าความเข้ม โดยเลือกเฉพาะ ค่าความเข้ม เพียงองค์ประกอบเดียวมาปรับปรุง เพื่อที่จะยังคงรักษาค่าเฉลี่ย และค่าความอิ่มตัว ให้คงค่าเดิมไว้ เพราะค่าเฉลี่ย และค่าความอิ่มตัวเดิมของภาพนั้นจะเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในกระบวนการวิเคราะห์ของจักษุแพทย์ ซึ่งในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพนั้นจะใช้วิธีการแจกแจงของข้อมูลแบบ Rayleigh ในขั้นตอนวิธี Contrast-limited Adaptive Histogram Equalization โดยจะปรับปรุงในเชิงพื้นที่ เพื่อให้ได้ภาพที่สามารถแสดงสารสนเทศที่น่าไปตัดสินใจได้ (มีความเปรียบต่างในเชิงพื้นที่ และมีสีที่ถูกต้องตามความเป็นจริง)

Thesis Title	Color Retinal Enhancement in Improved Nonlinear Hue-Saturation-Intensity (iNHSI)
Author	Mr Thani Jintasuttisak
Major Program	Computer Science
Academic Year	2013

ABSTRACT

Color retinal fundus image is important for ophthalmologist to identify and detect many retinopathy diseases, such as diabetes and hypertension. From an acquisition process, retinal images often have low contrast and low dynamic range. In this thesis, we propose a method using improved nonlinear hue-saturation-intensity color model (iNHSI) to preserve chromatic information of the retinal images. The intensity component is enhanced by Rayleigh transformation in contrast-limited adaptive histogram equalization (Rayleigh CLAHE) algorithm. The proposed algorithm can improve the contrast and increase the overall appearance. The algorithm was tested by using standard public database for benchmarking diabetic retinopathy detection of the fundus images. The proposed method can preserve the hue component, at which ophthalmologist use to diagnosis process.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลหลายท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ คือ

รองศาสตราจารย์ ดร. สาธิต อินทจักร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาวิจัย ตรวจสอบงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ รวมถึงถ่ายทอดทักษะความรู้และคุณธรรมสำหรับวิชาชีพแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา ภูยานนทชัย ภาควิชาจุฬารัตนวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ข้อมูล และแนะนำปัจจัยในการวิเคราะห์โรคจากภาพถ่ายจอตา ทำให้ผู้วิจัยมีความเข้าใจปัญหาและมีแนวทางในการทำวิจัยที่ดีขึ้น

อาจารย์สุนิดา รัตโนทยานนท์ ที่ได้ตรวจทานบทความวิจัย และให้คำแนะนำในการเขียนบทความวิจัย ก่อนส่งบทความวิจัยเพื่อเผยแพร่

อาจารย์ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ ซึ่งสามารถนำความรู้นี้มาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเอกสารต่างๆ

เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือที่ดีมาโดยตลอด

ทูลราชกรีฑาสโมสร ช่วยในการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษาเล่าเรียน

คุณพ่อ คุณแม่ ทุกคนในครอบครัว รวมทั้งญาติพี่น้องที่คอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ธานี จินตสุทธิศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(11)
รายการภาพประกอบ.....	(12)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินการ.....	3
1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	3
1.4.2 ระยะเวลาการดำเนินการ.....	4
1.5 สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5.1 สถานที่.....	4
1.5.2 เครื่องมือที่ใช้.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎี หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ภาพดิจิทัล.....	6
2.3 ความละเอียดของภาพ (Image Resolution).....	8
2.3.1 ความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution).....	8
2.3.2 ความละเอียดเชิงคลื่น (Spectral Resolution).....	9
2.4 ฮิสโทแกรมกับคอนทราสต์ของภาพ.....	10
2.4.1 ฮิสโทแกรมของภาพ (Image Histogram).....	10
2.4.2 คอนทราสต์ (Contrast).....	11
2.4.2.1 ภาพคอนทราสต์ต่ำ (Low Contrast Image).....	11
2.4.2.2 ภาพคอนทราสต์สูง (High Contrast Image).....	11
2.5 Contrast Enhancement.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 การยืดคอนทราสต์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear Contrast Stretch).....	12
2.5.2 การยืดคอนทราสต์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Contrast Stretch).....	14
2.5.2.1 Histogram Equalization (HE).....	14
2.5.2.2 Adaptive Histogram Equalization (AHE).....	20
2.5.2.3 Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE).....	22
2.5.2.4 Gray-Level Grouping (GLG).....	24
2.5.3 Piecewise Linear Contrast Stretch	26
2.6 ระบบสี RGB และ ระบบสี HSI.....	27
2.6.1 ระบบสี RGB.....	27
2.6.2 ระบบสี HSI.....	28
2.6.3 การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็นระบบสี HSI.....	28
2.6.4 การแปลงจากระบบสี HSI มาเป็นระบบสี RGB.....	29
2.7 ระบบสี Improved Nonlinear HSI (iNHSI).....	31
2.7.1 การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็นระบบสี iNHSI.....	34
2.7.2 การแปลงจากระบบสี iNHSI มาเป็นระบบสี RGB.....	35
2.8 การประมวลผลภาพสี RGB.....	37
2.8.1 การประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างแต่ละแบนด์...	37
2.8.1 การประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างในระบบสี iNHSI.....	38
2.9 การวัดและการประเมินคุณภาพ.....	39
2.9.1 การวัดคุณภาพเชิงสเปกตรัม.....	39
2.9.2 การวัดเอนโทรปีของข้อมูล.....	40
2.9.3 การวัดโดย Quaternion Structural Similarity (QSSIM).....	41
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
2.11 สรุป.....	43
3 การวิเคราะห์ห้ออกแบบและพัฒนา.....	44
3.1 บทนำ.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การแปลงจากระบบสี RGB ไปเป็นระบบสี iNHSI.....	44
3.3 การจำแนกลักษณะของภาพถ่ายจอตา.....	45
3.3.1 ความเบ้ (Skewness).....	46
3.3.2 การวัดความเบ้ (Skewness Measurement).....	48
3.4 Rayleigh Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization (Rayleigh CLAHE)...	52
3.5 การแสดงภาพหลังจากการปรับปรุงแล้ว.....	59
3.6 สรุป.....	60
4 ผลการทดลองและบทวิจารณ์.....	61
4.1 บทนำ.....	61
4.2 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง.....	61
4.3 กำหนดตัวแปร <i>Clip – limit</i> และค่า α ในขั้นตอนวิธี Rayleigh CLAHE.....	62
4.4 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Rayleigh กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Gaussian และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Exponential ในวิธีการ CLAHE.....	67
4.5 การวัดและการประเมินประสิทธิภาพ.....	69
4.6 ผลการทดลองและการเปรียบเทียบ.....	72
4.7 สรุป.....	80
5 สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 บทนำ.....	81
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย.....	83
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก ก.....	86
ก ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ ICCAS 2014.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	94

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	4
2.1 แสดงจำนวนบิตเก็บข้อมูลต่อหนึ่งพิกเซล และค่าสีที่เก็บได้.....	10
2-2 แสดงการคำนวณ HE.....	15
2-3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ HE.....	16
2-4 แสดงค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของภาพประกอบที่ 2-35	33
2-5 แสดงค่าจากการวัดการประเมินด้วยวิธี QSSIM ของภาพที่ลดคุณภาพเทียบกับภาพต้นฉบับ.....	42
4-1 แสดงภาพต้นฉบับ ภาพผลลัพธ์ และค่าต่างๆ.....	69
4-2 แสดงค่า Entropy ของภาพต้นฉบับและภาพผลลัพธ์จากวิธีการต่างๆ.....	77
4-3 แสดงค่า CC ระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพผลลัพธ์จากวิธีการต่างๆ.....	78
4-4 แสดงค่า QSSIM ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพผลลัพธ์จากวิธีการต่างๆ.....	79

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 เมทริกซ์แสดงจุดภาพของภาพดิจิทัล.....	6
2-2 การแทนสีด้วยเวกเตอร์ในภาพสี RGB.....	7
2-3 องค์ประกอบของภาพสี RGB.....	8
2-4 ภาพระดับสีเทา (Gray scale) ในช่วง 0-255.....	8
2-5 แสดงภาพจริงและภาพที่ขยาย 200% เมื่อค่า Resolution ต่างกัน.....	9
2-6 แสดงจำนวนของพิกเซลใน 1 Dpi.....	9
2-7 แสดงภาพเด็กและฮิสโทแกรมค่าความสว่างของภาพเด็ก.....	10
2-8 ภาพ Low Contrast.....	11
2-9 ภาพ High Contrast.....	11
2-10 แสดงการยืดคอนทราสต์ที่เป็นเชิงเส้น.....	12
2-11 รูปภาพเดิมที่ต้องการเพิ่มความคมชัด โดยวิธี Linear Contrast Stretch.....	13
2-12 แสดงฮิสโทแกรม ของภาพก่อนและหลังการปรับปรุงภาพโดยวิธี Linear Contrast Stretch.....	14
2-13 แสดงผลของการประมวลผลด้วยวิธี HE.....	14
2-14 แสดงฮิสโทแกรมของภาพโทนสีเทา 3 บิต.....	15
2-15 แสดงฮิสโทแกรมผลลัพธ์ของภาพโทนสีเทา 3 บิต หลังประมวลผลด้วยวิธีการ HE.....	17
2-16 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE.....	17
2-17 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE.....	18
2-18 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE.....	18
2-19 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE.....	19
2-20 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE.....	19
2-21 แสดงภาพถ่ายจอตาโดยแบ่งภาพออกเป็นขนาด 8 × 8 เท่าๆกัน.....	20
2-22 แสดงผลลัพธ์หลังจากการประมวลผลด้วยวิธี HE ของภาพที่ตำแหน่ง แถวที่ 1 คอลัมน์ที่ 2.....	21
2-23 แสดงรูปภาพก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยวิธี AHE.....	21

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-24 แสดงขั้นตอนการตัดฮิสโทแกรม.....	23
2-25 แสดงการตัดฮิสโทแกรมและรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของภาพ 1 พื้นที่.....	23
2-26 แสดงผลลัพธ์ภาพถ่ายจอตาค่อนและหลังปรับปรุงค่าความสว่างด้วยวิธี CLAHE.....	23
2-27 แสดงการจับกลุ่มของวิธีการ GLG.....	24
2-28 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ GLG.....	25
2-29 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ GLG.....	26
2-30 แสดงการยืดค่าความสว่างแบบ Piecewise ที่กำหนดช่วงของการยืดออกเป็น 4 ช่วง.....	26
2-31 RGB Model.....	27
2-32 RGB 24-bit color cube.....	27
2-33 แบบจำลองระบบสี HSI	28
2-34 แนวคิดสัมพันธ์ระหว่างระบบสี RGB และระบบสี HSI.....	30
2-35 แสดงการเกิดปัญหา out-of-gamut.....	31
2-36 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างระบบสี HSI และระบบสี iNHSI.....	32
2-37 แสดงแนวคิดของโมเดลสี iNHSI และการแบ่งลูกบาศก์สี RGB ออกเป็น 2 ส่วน.....	33
2-38 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างแต่ละแบนด์ของวิธี Linear Contrast Stretch และวิธี HE.....	37
2-39 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างแต่ละแบนด์ของวิธี Linear Contrast Stretch และวิธี HE.....	38
2-40 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างในระบบสี iNHSI โดยวิธี Linear Contrast Stretch และวิธี HE.....	38
2-41 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างในระบบสี iNHSI โดยวิธี Linear Contrast Stretch และวิธี HE.....	39
2-42 ภาพเดิมและภาพที่ผ่านการลดคุณภาพ.....	41
3-1 แสดงผังการทำงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ.....	45

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-2 ภาพ Under-exposure และภาพ Over-exposure.....	46
3-3 โคงค์ปกติ.....	47
3-4 โคงค์ที่มีลักษณะเบ้ซ้าย.....	47
3-5 โคงค์ที่มีลักษณะเบ้ขวา.....	48
3-6 แสดงภาพสีเทา Under-exposure และ Over-exposure.....	48
3-7 แสดงส่วนของจอตาของภาพสีเทา Under-exposure และ Over-exposure.....	49
3-8 แสดงสัดส่วนพื้นที่ได้กราฟ.....	51
3-9 แสดงข้อมูลค่าความสว่างของจุดภาพภายในพื้นที่ของจอตา.....	51
3-10 แสดงฮิสโทแกรมของค่าความสว่างที่เป็นสมาชิกภายในเซต A	52
3-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $Clip - limit$ และค่าเอนโทรปี.....	53
3-12 แสดงการแบ่งภาพสีเทาออกเป็นขนาด 8×8	54
3-13 แสดงกระบวนการตัดฮิสโทแกรม ของแต่ละพื้นที่.....	56
3-14 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของภาพประกอบที่ 3-13 (ก) กำหนด $\alpha = 0.4$ และ $V_{clip}=0.01$	57
3-15 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนที่ผ่านกระบวนการสเกลจากสมการที่ (3.12)	58
3-16 แสดงภาพผลลัพธ์ ก่อนและหลังอินเทอร์โพลชัน.....	58
3-17 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ภาพ Under-exposure จากสมการที่ (3.11) และ สเกลข้อมูลด้วยสมการที่ (3.12)	59
3-18 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ภาพ Over-exposure จากสมการที่ (3.11) และ สเกลข้อมูลด้วยสมการที่ (3.12)	60
4-1 ภาพจอตา.....	62
4-2 แสดงการแบ่งภาพจอตาออกเป็นขนาด 8×8 และเลือกข้อมูลภาพจอตา 4 พื้นที่	63
4-3 แสดงภาพผลลัพธ์จากการกำหนดค่า $Clip - limit$ ที่แตกต่างกัน.....	63
4-4 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอน และเปรียบเทียบภาพผลลัพธ์จากการกำหนดค่า $Clip - limit = 0.1, 0.01$ และ 0.001	64
4-5 ฟังก์ชันถ่ายโอนเมื่อกำหนดค่า α ที่ต่างกัน.....	65
4-6 ผลลัพธ์ภาพ Over-exposure.....	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-7 ผลลัพธ์ภาพ Under-exposure.....	66
4-8 กราฟค่าความน่าจะเป็นสะสมในพื้นที่ R1, R2, R3 และ R4 จากภาพประกอบที่ 4-2.....	67
4-9 แสดงผลลัพธ์ของแต่ละการแจกแจงในขั้นตอนวิธี CLAHE.....	68
4-10 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละการกระจายของภาพประกอบที่ 4-8.....	68
4-11 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	72
4-12 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	73
4-13 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	73
4-14 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	74
4-15 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	74
4-16 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	75
4-17 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	75
4-18 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	76
4-19 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	76
4-20 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ.....	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบการมองเห็นของมนุษย์อาศัยแสงที่ส่องสว่างตกกระทบมายังวัตถุและสะท้อนมายังดวงตา ตาของมนุษย์มีส่วนประกอบต่างๆที่ช่วยในการมองเห็น มีเซลล์รับแสงที่อยู่ในจอตา ประกอบไปด้วยเซลล์ไวแสง 2 ชนิด คือ เซลล์รูปกรวย (Cone cell) กับ เซลล์รูปแท่ง (Rod cell) โดย เซลล์รูปกรวย เป็นเซลล์รับแสง แบ่งเป็น 3 กลุ่ม มีความไวต่อแสงสีต่างกันคือ ไวต่อแสงสีแดง (Red: R) สีเขียว (Green: G) และสีน้ำเงิน (Blue: B) ซึ่งในระบบถ่ายภาพสีก็มีการรับสัญญาณสี RGB เช่นกัน และต่อมาคือ เซลล์รูปแท่ง เป็นเซลล์รับแสงที่มีลักษณะเป็นแท่ง ไวต่อแสงมากกระจายอยู่บริเวณรอบๆ โฟเวีย (Fovea) ในระบบของเซลล์รูปแท่ง จะปรากฏระดับค่าความเข้ม (ระดับความสว่าง) โดยในระบบการมองเห็นของมนุษย์นั้นจะรับรู้สีและค่าความสว่างของภาพในรูปแบบ RGB จากเซลล์รูปแท่ง กับ เซลล์รูปกรวย และจากนั้นสัญญาณภาพถูกส่งผ่านเส้นประสาทตา (Optic Nerves) ไปสู่สมอง ซึ่งสมองจะแปลสัญญาณภาพ RGB จากตา เป็นค่าเฉดสี (Hue: H) ค่าความอิ่มตัวสี (Saturation: S) และค่าความสว่างของแสง (Intensity: I) ในรูปแบบของระบบสี HSI (Gonzalez and Woods, 2009)

ความชัดเจนแม่นยำของการมองเห็น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 4 อย่าง คือ

1. ขนาดของวัตถุ (Size) เป็นขนาดที่ตกกระทบบนจอตาจะวัดด้วยมุมในการมอง (Visual Angle) ที่ถูกกำหนดด้วยระยะทางกับขนาดทางกายภาพของวัตถุ และพบว่าคนเราจะมองเห็นภาพชัดเจนที่สุดที่มุมประมาณ 1.4 – 2 องศา
2. ความสว่าง (Luminance) ขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ แล้วสะท้อนเข้าสู่ดวงตาในปริมาณที่เหมาะสม
3. ความแตกต่างของสีวัตถุกับพื้นผิว โดยรอบซึ่งเป็นความเปรียบต่างหรือคอนทราสต์ (Contrast) ระหว่างวัตถุกับฉากหลัง เกิดขึ้นโดยการสะท้อนแสงจากพื้นผิววัตถุนั้นๆ เข้าสู่ดวงตาของมนุษย์ โดยพื้นผิวเหล่านั้นอาจมีสีหรือความสว่างแตกต่างกัน ถ้าความแตกต่างยิ่งมากก็จะยิ่งเห็นวัตถุชัดเจนขึ้น
4. เวลา (Time) ระยะเวลาที่ใช้มองต้องมากพอที่จะบรรยายละเอียดของวัตถุนั้นๆ ได้

อุปกรณ์ถ่ายภาพที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เช่น กล้องดิจิทัล ซึ่งเป็นอุปกรณ์ถ่ายภาพที่มีรูปแบบการทำงานที่คล้ายคลึงกับการระบบการมองเห็นของมนุษย์ โดยจะทำการถ่ายภาพในย่านความถี่ของการมองเห็นของมนุษย์และบันทึกสีสรรที่เรามองเห็นในระบบสี RGB (Gonzalez and Woods, 2009) ภาพที่มีความผิดเพี้ยนของสีและการปรับปรุงคุณภาพของภาพสี ในปัจจุบันแม้ว่าจะมีซอฟต์แวร์ที่สามารถแก้ไขปรับปรุงสีและความคมชัดได้ ซึ่งผู้ใช้จะต้องมีความรู้ในเรื่องการปรับแก้ภาพสี

การแก้ไขและปรับปรุงภาพสีมักจะเป็นปัญหา โดยคุณภาพของภาพสี RGB ที่บันทึกโดยอุปกรณ์ถ่ายภาพดิจิทัลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การตอบสนองของตัววัดสัญญาณสภาพแวดล้อมของฉากที่จะถ่ายของกล้องไปแต่ละช่องสัญญาณของสี ตัววัดสัญญาณทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดระดับความเข้มของสี การสมดุลสีขาว (White Balance) ความสัมพันธ์ของความไวของแสงกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับสัญญาณและความยาวคลื่น คุณสมบัติของพื้นผิวของวัตถุที่อยู่ในฉากและสภาพแสง(การส่องสว่างของแสงโดยรอบ) ปัจจัยเหล่านี้มีส่วนสำคัญต่อคุณภาพของภาพสี RGB

ในทำนองเดียวกันการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพถ่ายก็มีความสำคัญในการประยุกต์กับงานต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายอวัยวะต่างๆ ที่ใช้ในทางการแพทย์ ถ้าหากผู้ที่ถ่ายภาพไม่มีความชำนาญ ในบางครั้งภาพถ่ายที่ได้ไม่มีสารสนเทศเพียงพอที่จะใช้ในการวินิจฉัยโรค ในงานวิจัยนี้ได้นำปัญหาของภาพถ่ายจอตา (Retinal Image) ที่เป็นภาพสี แต่ภาพมีคอนทราสต์ไม่เหมาะสมคือสูงหรือต่ำเกินไปจนทำให้สารสนเทศจากภาพไม่เพียงพอต่อการวินิจฉัย

จากปัญหาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงขอเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตาที่มีความสว่างของภาพสีที่ไม่เหมาะสมจนทำให้รายละเอียดของข้อมูลภายในภาพแสดงออกมาไม่ชัดเจน โดยจะปรับแก้ความสว่างของภาพในระบบสี HSI ซึ่งเป็นระบบสีที่สมองของมนุษย์ใช้ในการรับรู้สีของวัตถุที่มองเห็น เพื่อให้ได้ภาพสี RGB ที่ดูเป็นธรรมชาติ และได้ข้อมูลภาพที่มีความถูกต้องมากที่สุด เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการวินิจฉัยโรคต่างๆ ที่ปรากฏบนจอตา เช่น โรคความดันโลหิตสูง และโรคเบาหวาน เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษา ออกแบบและพัฒนาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา ที่มีความสว่างของภาพมาก หรือน้อยจนทำให้รายละเอียดของข้อมูลภายในภาพแสดงออกมาไม่ชัดเจน โดยจะแก้ไขและปรับปรุงค่าความสว่างในระบบสี HSI เพื่อให้ได้ภาพสี RGB ที่ดูเป็นธรรมชาติ และได้ข้อมูลภาพที่ใกล้เคียงความถูกต้องมากที่สุด เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย

1. ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง คือ ข้อมูลภาพสีจอตา (Color fundus photograph)
2. ออกแบบวิธีการปรับปรุงภาพของภาพถ่ายจอตา ที่มีความสว่างของภาพมาก หรือน้อยเกินไป จนทำให้รายละเอียดของข้อมูลภายในภาพแสดงออกมาไม่ชัดเจน
3. เพื่อเพิ่มความคมชัดของภาพถ่ายจอตา
4. ประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่นๆ

1.4 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินการ

1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ศึกษางานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเทคโนโลยีและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย
3. กำหนดขอบเขตของปัญหาในการทำวิจัย
4. วิเคราะห์และออกแบบกระบวนการ
5. พัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการที่ได้ออกแบบไว้
6. เขียนบทความวิจัยและเผยแพร่
7. จัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอน	เดือน											
	2556						2557					
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
1.												
2.												
3.												
4.												
5.												
6.												
7.												

1.4.2 ระยะเวลาการดำเนินการ

มิถุนายน 2556 – พฤษภาคม 2557

1.5 สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย

1.5.1 สถานที่

ห้องปฏิบัติการปัญญาประดิษฐ์ (AIR Lab) CS207 ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

1.5.2 เครื่องมือที่ใช้

1) ด้านฮาร์ดแวร์

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจำนวน 1 เครื่อง

- CPU : Intel Core i5 2.3 GHz
- Hard Disk : 320 GB
- Ram : 4 GB

2) ด้านซอฟต์แวร์

- ระบบปฏิบัติการ Mac OSX Version 10.8.4 Mountain Lion
- โปรแกรมประยุกต์ MATLAB R2009b

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพถ่ายจอตา ที่มีความสว่างของภาพมากหรือน้อยเกินไป จนทำให้รายละเอียดของข้อมูลภายในภาพแสดงออกมาไม่ชัดเจน โดยจะปรับปรุงค่าความสว่างของภาพในระบบสี HSI เพื่อเพิ่มความคมชัดและแสดงรายละเอียดของข้อมูลภายในภาพให้มีความชัดเจนเพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์ข้อมูลในภาพได้

2. ได้ภาพถ่ายจอตาที่มีความคมชัดเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการวินิจฉัยโรค

บทที่ 2

ทฤษฎี หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาในส่วนแรกจะกล่าวถึง โครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆของภาพดิจิทัล ประเภทของภาพดิจิทัลเมื่อแบ่งตามลักษณะของความคมชัด และความสว่างภายในภาพ จากนั้นจะเป็นการอธิบาย ขั้นตอนวิธีต่างๆที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพสี RGB ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา อธิบายโครงสร้างของระบบสี RGB และระบบสี HSI รวมไปถึงจนถึงการแปลงค่าสี สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา Out-of-Gamut ซึ่งเกิดจากการแปลงค่าสี และการประเมินคุณภาพของขั้นตอนวิธีที่ได้ออกแบบไว้

2.2 ภาพดิจิทัล

ภาพดิจิทัลเป็นการแทนข้อมูลภาพในระนาบสองมิติโดยมีหน่วยที่เล็กที่สุดเรียกว่า จุดภาพหรือพิกเซล (Pixel) ภาพดิจิทัลสามารถนิยามเป็นฟังก์ชันสองมิติ $f(x, y)$ โดยที่ x และ y เป็นพิกัดของจุดภาพ ค่าของ $f(x, y)$ คือระดับค่าความสว่าง ที่ตำแหน่ง (x, y) ถ้ากำหนดให้ภาพ $f(x, y)$ มีขนาด M แถว และ N คอลัมน์ และพิกัดของจุดกำเนิด(Origin) ของภาพคือที่ตำแหน่ง $(x, y) = (0, 0)$ แล้วจะสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ดังภาพประกอบที่ 2-1

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, N-1) \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix}$$

ภาพประกอบที่ 2-1 เมทริกซ์แสดงจุดภาพของภาพดิจิทัล

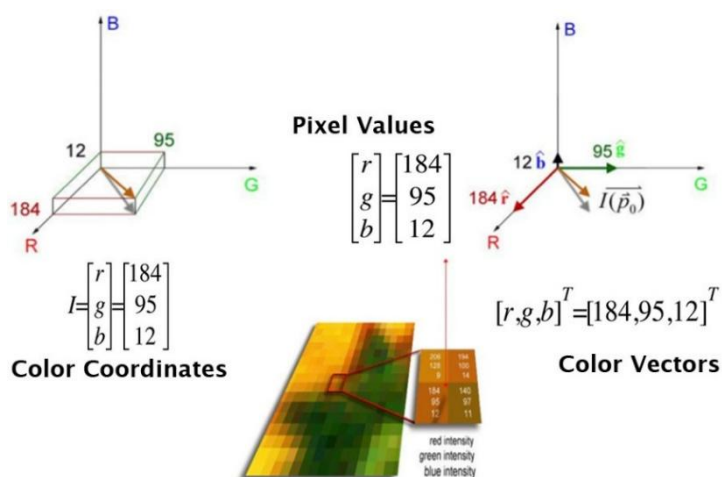
สมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์คือจุดภาพโดยตำแหน่ง $(0, 0)$ จะอยู่ทางด้านมุมบนของภาพ ลำดับตำแหน่งของจุดภาพจะเรียงจากซ้ายไปขวาและบนลงล่าง จุดภาพจะเก็บค่าระดับความสว่างเป็นค่าตัวเลขหรือค่าดิจิทัล ที่บันทึกลงหน่วยความจำในลักษณะแรสเตอร์ (Raster) ภาพที่มีการจัดเก็บในลักษณะนี้จะเรียกว่าภาพบิตแมป (Bit-mapped image) หรือภาพแรสเตอร์

(Raster image) แต่ไฟล์ภาพที่มีการจัดเก็บในลักษณะนี้จะมียุขขนาดใหญ่ จึงมักจะมีการบีบอัดภาพ (Image compression) เพื่อให้ข้อมูลภาพมียุขเล็กกลง

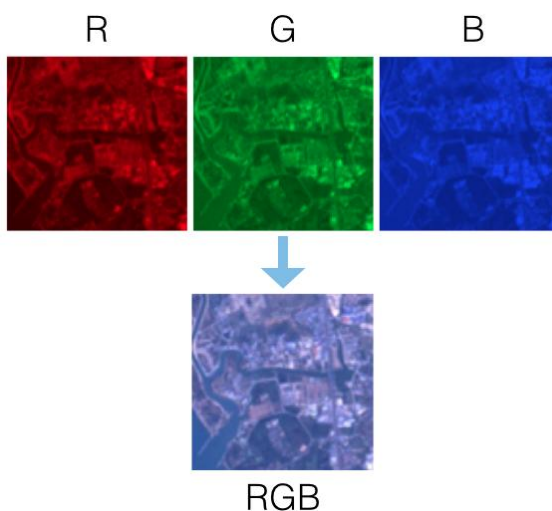
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เป็นการประมวลผลภาพสี ดังนั้นจึงแบ่งภาพที่นำมาประมวลผลออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ภาพสี (Color Image) ในที่นี้จะหมายถึง ภาพสี RGB ที่ประกอบไปด้วย ข้อมูลภาพ 3 แบนด์ คือ แบนด์ค่าของสีแดง (Red: R) แบนด์ค่าของสีเขียว (Green: G) และแบนด์ค่าของสีน้ำเงิน (Blue: B) แต่ละแบนด์สีเป็นภาพค่าความสว่าง ที่สามารถแทนเป็นเวกเตอร์สี $[r, g, b]^T$ ดังตัวอย่างภาพประกอบที่ 2-2 ที่แสดงให้เห็นถึงค่าความสว่างของ 1 จุดภาพสี RGB โดยจุดนั้น ประกอบไปด้วยระดับค่าความสว่างของสีแดงเท่ากับ 184 สีเขียวเท่ากับ 95 และสีน้ำเงินเท่ากับ 12 หรือ $[r, g, b]^T = [184, 95, 12]^T$ เมื่อนำค่าทั้ง 3 ค่ามาแทนในพิกัดฉากปริภูมิสามมิติโดยมีแกน R แกน G และแกน B เป็นแกนพิกัดฉากในระบบสี RGB ซึ่งเป็นรูปลูกบาศก์ ภาพประกอบที่ 2-3 แสดงให้เห็นถึง โครงสร้างของภาพสี RGB เมื่อนำค่าความสว่างในตำแหน่งเดียวกัน ของแบนด์สีแดง แบนด์สีเขียว และแบนด์สีน้ำเงิน มารวมซ้อนกันแสดงเป็นภาพสี RGB

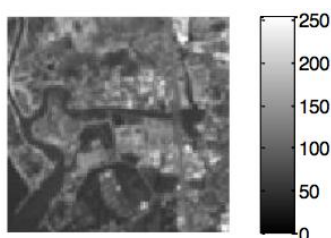
2) ภาพโทนสีเทา (Grayscale Image) เป็นภาพระดับความสว่างของสีเทา ที่มีอยู่เพียงแบนด์เดียว ซึ่งได้จากภาพที่มีค่าความสว่างของสีแดงเท่ากับสีเขียว และเท่ากับสีน้ำเงิน หรือ $r = g = b$ เป็นภาพโทนสีเดียว (Monochrome Image) ดังภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบที่ 2-2 การแทนสีด้วยเวกเตอร์ในภาพสี RGB



ภาพประกอบที่ 2-3 องค์ประกอบของภาพสี RGB



ภาพประกอบที่ 2-4 ภาพระดับสีเทา (Gray scale) ในช่วง 0-255

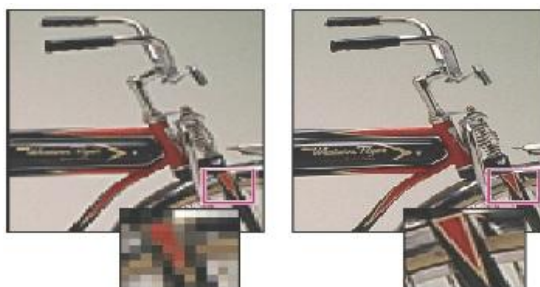
2.3 ความละเอียดของภาพ (Image Resolution)

เป็นการวัดความละเอียดของภาพ การแสดงรายละเอียดของวัตถุที่ปรากฏขึ้นภายในภาพ ความละเอียดมีอยู่ด้วยกันหลายแบบขึ้นอยู่กับว่าจะพิจารณาความละเอียดในแง่ใด (สมพงษ์ เลียงโรคาพาธ, 2552: ระบบออนไลน์) เช่น ความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) ความละเอียดเชิงคลื่น (Spectral Resolution) ความละเอียดเชิงรังสี (Radiometric Resolution) ความละเอียดเชิงเวลา (Temporal Resolution) ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะศัพท์ความละเอียดเชิงพื้นที่ และ ความละเอียดเชิงคลื่น ซึ่งมีส่วนที่เกี่ยวข้องและมีความสัมพันธ์กับงานวิจัยนี้

2.3.1 ความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution)

คือ ความละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ในการบันทึกรายละเอียดของภาพ โดยพิจารณาเป็นพื้นที่ เช่น พิจารณาว่ากล้องดิจิทัลสามารถถ่ายภาพดิจิทัลที่มีจำนวนจุดภาพที่จุดภาพในหนึ่งหน่วยของภาพ หมายถึง จำนวนพิกเซลที่แสดงใน 1 หน่วยของภาพ ความละเอียดในการแสดง

ที่แตกต่างกัน จะมีผลให้คุณภาพของภาพที่แสดงออกมาแตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้หน่วยวัดเป็น Ppi (Pixel per Inch) หรือ Dpi (Dot per Inch) เช่น 72 Ppi หมายถึง ในพื้นที่ 1 ตารางนิ้วจะมีจำนวนพิกเซลเท่ากับ $72 \times 72 = 5184$ พิกเซล ในขณะที่รูปเดียวกันมี Resolution = 300 Ppi จะมีจำนวน $300 \times 300 = 90,000$ พิกเซลต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว ภาพที่มี Resolution สูง จะแสดงรายละเอียดของภาพได้ดี ทำให้ภาพที่ได้มีคุณภาพมากกว่าภาพที่มีความละเอียดต่ำ ดังภาพประกอบที่ 2-5



ภาพประกอบที่ 2-5 แสดงภาพจริงและภาพที่ขยาย 200% เมื่อค่า Resolution ต่างกัน

หน่วยจุดต่อนิ้ว หมายถึง จำนวนจุดที่เรียงต่อกันในระยะ 1 นิ้ว ในทางแนวตั้ง หรือทางแนวนอน เช่น ในระยะ 1 นิ้ว มีจุดเรียงกันอยู่ 3 จุด จะเรียกว่า 3 Dpi ในระยะ 1 นิ้ว มีจุดเรียงกันอยู่ 10 จุด จะเรียกว่า 10 Dpi ดังภาพประกอบที่ 2-6



ภาพประกอบที่ 2-6 แสดงจำนวนของพิกเซลใน 1 Dpi

2.3.2 ความละเอียดเชิงคลื่น (Spectral resolution)

การแสดงผลละเอียดของสี หรือความละเอียดของสเกลสีเทา (Gray scale resolution) หรือความลึกของบิต (bit depth) หรือความลึกของภาพ คือความละเอียดของอุปกรณ์ที่สามารถบันทึกระดับความแตกต่างของสี หรือน้ำหนักสี ในภาพต้นฉบับหรือวัตถุต้นแบบได้มากหรือน้อย ถ้าบันทึกระดับความแตกต่างของสีได้มาก ภาพดิจิทัลที่ได้ก็จะมีสีหรือน้ำหนักสีมากตาม

ไปด้วยหน่วยความละเอียดที่กำหนดเป็น บิตต่อพิกเซล ตัวอย่างเช่น ภาพดิจิทัลที่มีข้อมูลภาพ 1 บิตต่อ 1 พิกเซล นั้นจะเป็นภาพขาวดำ เนื่องจาก พิกเซล หนึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แค่ บิตเดียว สีที่ได้เท่ากับ 2 สี ดังตารางที่ 2-1 คือ สีขาว และสีดำ หากต้องการแสดงสีให้ได้มากขึ้น ก็ต้องเก็บข้อมูลต่อ พิกเซล ให้มากขึ้น เช่น ถ้าเก็บข้อมูลพิกเซลเป็น 8 บิต โดยมีระดับความสว่างอ่อนแตกต่างกันได้ 256 สี หรือ 256 ระดับ ในช่วง Gray scale 0-255 ดังภาพประกอบที่ 2-4 ที่แสดงภาพ 8 บิต Gray scale และถ้าต้องมีการแยกสี (Color separation) ให้เป็นข้อมูลแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่องข้อมูล (Channel) โดยแสงแต่ละสีมีการเก็บข้อมูลพิกเซลเป็น 8 บิต เมื่อนำข้อมูลสีแดง ข้อมูลสีเขียว และข้อมูลสีน้ำเงินทั้งหมด 3 กลุ่มมารวมกันเพื่อแสดงผลเป็นภาพสี RGB ในแต่ละพิกเซลต้องใช้ข้อมูลทั้งสิ้นเท่ากับ (8 บิต \times 3 Channel = 24 บิต) ซึ่งเรียกความลึกของสีเท่ากับ 24 บิต สามารถแสดงค่าได้ทั้งหมด 16.7 ล้านสี ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงจำนวนบิตเก็บข้อมูลต่อหนึ่งพิกเซล และค่าสีที่เก็บได้

จำนวนบิตเก็บข้อมูล / พิกเซล	ภาพโทนสีเทา	ภาพสี RGB
1 บิต	$2^1 = 2$ สี	$2^1(R) \times 2^1(G) \times 2^1(B) = 8$ สี
2 บิต	$2^2 = 4$ สี	$2^2(R) \times 2^2(G) \times 2^2(B) = 64$ สี
4 บิต	$2^4 = 16$ สี	$2^4(R) \times 2^4(G) \times 2^4(B) = 4096$ สี
8 บิต	$2^8 = 256$ สี	$2^8(R) \times 2^8(G) \times 2^8(B) = 16.7$ ล้านสี

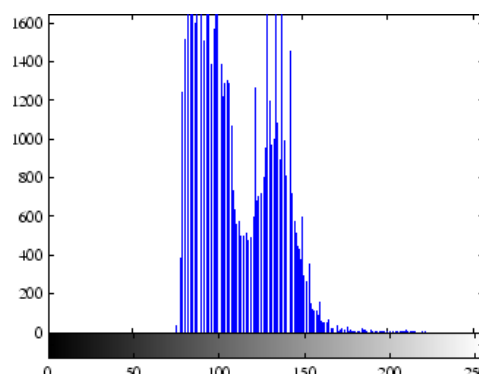
2.4 ฮิสโทแกรมกับคอนทราสต์ของภาพ

2.4.1 ฮิสโทแกรมของภาพ (Image Histogram)

ฮิสโทแกรมของภาพ $h(r_k) = n_k$ เป็นกราฟแบบไม่ต่อเนื่องที่แสดงจำนวนพิกเซลทั้งหมด n_k ในภาพที่มีระดับความสว่างเท่ากับ r_k ดังภาพประกอบที่ 2-7



(ก) ภาพเด็ก



(ข) ฮิสโทแกรมค่าความสว่างของภาพเด็ก

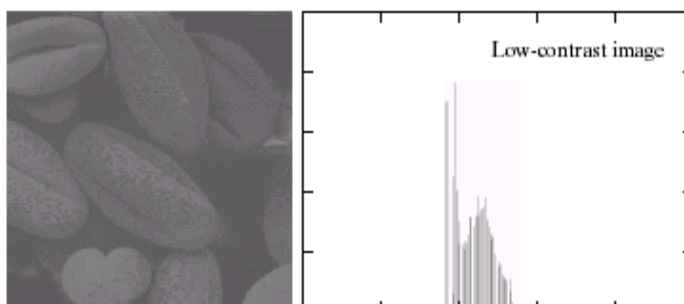
ภาพประกอบที่ 2-7 แสดงภาพเด็กและฮิสโทแกรมค่าความสว่างของภาพเด็ก

2.4.2 คอนทราสต์ (Contrast)

คอนทราสต์ เป็นค่าความเปรียบต่างของแสงหรือสีที่ทำให้มองเห็นวัตถุในภาพได้อย่างชัดเจน โดยในลักษณะการมองเห็นภาพที่มีคอนทราสต์ สามารถกำหนดได้จากความต่างของความสว่างและสีของวัตถุที่มีความแตกต่างจากวัตถุอื่นๆ ที่อยู่รอบๆ ดังนั้นค่าความเข้มของความสว่างและค่าความเข้มของสีของวัตถุจะส่งผลให้ภาพมีลักษณะคอนทราสต์ต่ำ และคอนทราสต์สูงแตกต่างกันไป

2.4.2.1 ภาพคอนทราสต์ต่ำ (Low Contrast Image)

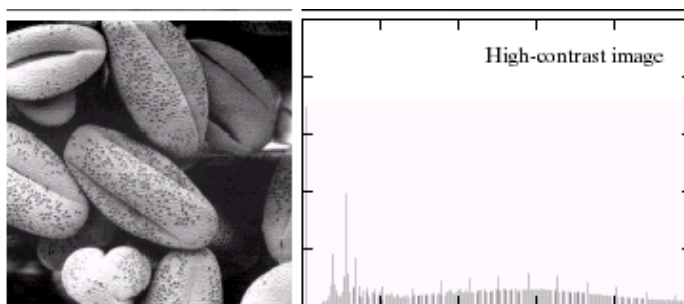
ภาพที่มีลักษณะคอนทราสต์ต่ำ จะมีฮิสโทแกรม ของค่าความสว่างกระจุกกันอยู่ในช่วงแคบๆ เป็นภาพที่มีแสงหรือความสว่างค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งภาพ หรือภาพที่มีความสว่างแตกต่างกันในภาพน้อยค่าความเปรียบต่างระหว่างส่วนที่สว่างที่สุดกับส่วนที่มืดที่สุด มีค่าห่างกันน้อย ดังภาพประกอบที่ 2-8



ภาพประกอบที่ 2-8 ภาพ Low Contrast (Gonzalez and Woods, 2009)

2.4.2.2 ภาพคอนทราสต์สูง (High Contrast Image)

ภาพที่มีลักษณะคอนทราสต์สูง จะมีฮิสโทแกรมของค่าความสว่างกระจายกันอยู่ในช่วงกว้างๆ หรือเป็นภาพที่มีแสงหรือความสว่างต่างกันมาก เช่น ภาพที่มีส่วนของในที่ร่มและกลางแจ้งอยู่ในภาพเดียวกัน ดังภาพประกอบที่ 2-9

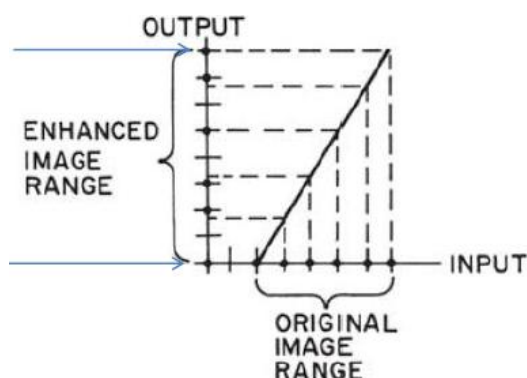


ภาพประกอบที่ 2-9 ภาพ High Contrast (Gonzalez and Woods, 2009)

2.5 Contrast Enhancement

เป็นการปรับปรุงค่าความสว่างของภาพ โดยการยืดช่วงค่าความสว่างให้เต็มพิสัย (Range) ของข้อมูลภาพ ทำให้ภาพที่ปรับปรุงแล้วมีคอนทราสต์ที่ดี ที่สามารถแสดงรายละเอียดของข้อมูลในภาพได้อย่างชัดเจน เทคนิคการปรับปรุงระดับความสว่างของภาพสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.5.1. การยืดคอนทราสต์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear Contrast Stretch) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการปรับระดับค่าความสว่างให้มีช่วงที่กว้างขึ้น ตามสัดส่วนด้วยการขยายพิสัยของระดับค่าความสว่างของข้อมูลเดิมให้มีค่ามากยิ่งขึ้นเต็มช่วง 0-255 (สำหรับภาพ 8 บิต) โดยทำการแมปค่าความสว่างต่ำสุดในภาพไปยังค่าความสว่างเท่ากับ 0 และแมปค่าความสว่างสูงสุดในภาพไปยังค่าความสว่างเท่ากับ 255 ทุกๆค่าความสว่างจะแมปไปเป็นเชิงเส้นในระหว่างช่วงค่าความสว่าง 0 – 255 เพื่อเพิ่มคอนทราสต์ให้กับภาพ ดังภาพประกอบที่ 2-10



ภาพประกอบที่ 2-10 แสดงการยืดคอนทราสต์ที่เป็นเชิงเส้น

การปรับคอนทราสต์แบบเชิงเส้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2.1)$$

โดยที่ $T[f(x, y)]$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนค่าความสว่าง $f(x, y)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$g(x, y) = \left(\frac{255}{DN_{max} - DN_{min}} \right) \times (f(x, y) - DN_{min}) \quad (2.2)$$

โดยที่

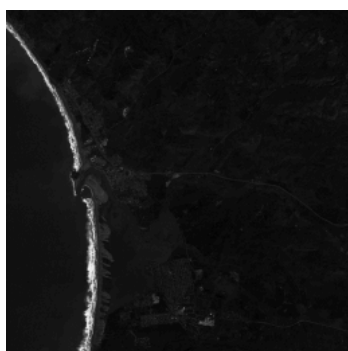
$g(x, y)$ คือ ค่าความสว่างใหม่ที่ตำแหน่ง (x, y)

$f(x, y)$ คือ ค่าความสว่างเดิมที่ตำแหน่ง (x, y)

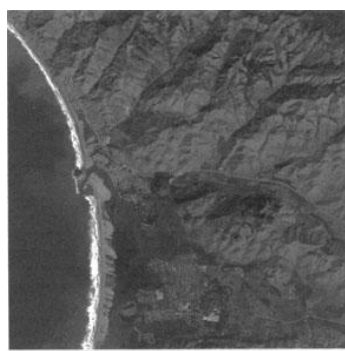
DN_{min} คือ ค่าความสว่างต่ำสุดในภาพ $f(x, y)$

DN_{max} คือ ค่าความสว่างสูงสุดในภาพ $f(x, y)$

ตัวอย่าง ภาพประกอบที่ 2-11 (ก) คือ รูปที่ต้องการเพิ่มความคมชัด



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์

ภาพประกอบที่ 2-11 รูปภาพเดิมที่ต้องการเพิ่มความคมชัดและภาพผลลัพธ์โดยวิธี

Linear Contrast Stretch

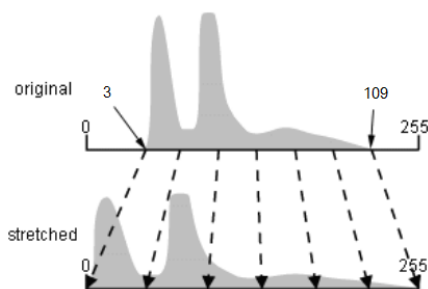
จากภาพประกอบที่ 2-10 (ก) นั้นมีค่าความสว่างต่ำสุดคือ 3 สูงสุดคือ 109 ต้องการแปลงค่าความสว่าง ตั้งแต่ 3-109 ไปเป็น 0-255 โดยสมมติว่าค่าของจุดภาพเก่าคือ 20 (โดยจะต้องทำการปรับปรุงค่าความสว่างของทุกๆจุดภาพ) สามารถแทนค่าลงไปในสมการที่ (2.2) และค่าที่ได้แสดงในสมการที่ (2.3)

$$g(x, y) = \left(\frac{255}{109-3} \right) \times (20 - 3) \quad (2.3)$$

$$= 40.89$$

$$= 41$$

โดยแสดงฮิสโทแกรม ของค่าความสว่าง จากขยายในสัดส่วนเท่าๆกันดังภาพประกอบที่ 2-12

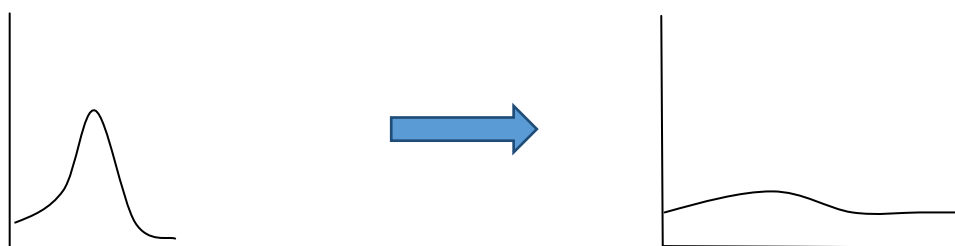


ภาพประกอบที่ 2-12 แสดงฮิสโทแกรม ของภาพก่อนและหลังการปรับปรุงภาพ โดยวิธี
Linear Contrast Stretch

2.5.2 การยืดคอนทราสต์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Contrast Stretch) เป็นการปรับระดับค่าความสว่างของข้อมูลภาพ โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น จุดประสงค์ในการใช้วิธีนี้คือ พยายามที่จะเปลี่ยนการกระจายของข้อมูลที่ไม่ปกติให้เป็นแบบปกติและปรับจำนวนจุดภาพในแต่ละค่าความสว่างให้มีจำนวนใกล้เคียงกัน ซึ่งเทคนิคนี้เรียกว่า “Histogram Equalization Stretch” หรือการยืดภาพตามความถี่ของข้อมูล

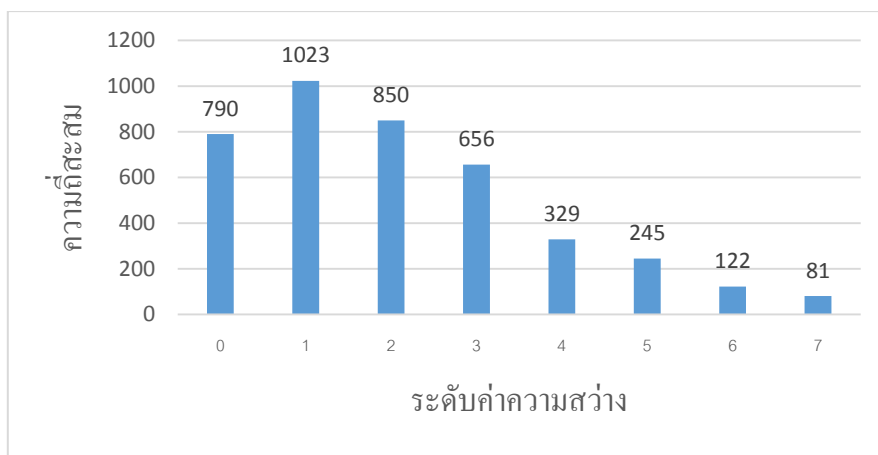
2.5.2.1 Histogram Equalization (HE)

เป็นการนำค่าฮิสโทแกรมของภาพมาประมวลผล เพื่อชดเชยระดับค่าความสว่างให้มีการกระจายกันอย่างสม่ำเสมอตลอด ดังภาพประกอบที่ 2-13 โดยวิธีการนี้มีสมมติฐานที่ว่า ควรมีการกำหนดจำนวนจุดภาพให้มีความถี่เท่ากันในแต่ละระดับความสว่าง



ภาพประกอบที่ 2-13 แสดงผลของการประมวลผลด้วยวิธี HE

ตัวอย่างการประมวลผลด้วยวิธี HE ของภาพโทนาสีเทา 3 บิต (8 ระดับค่าความสว่าง หรือ $L = 8$) และภาพมีขนาด 64 แถว 64 คอลัมน์ เมื่อนำค่าความสว่างของภาพมาแสดงในรูปแบบฮิสโทแกรม ดังภาพประกอบที่ 2-14 และนำค่าความสว่างที่ปรากฏภายในภาพเรียงจากน้อยไปมาก โดยแสดงการคำนวณดังตารางที่ 2-2



ภาพประกอบที่ 2-14 แสดงฮิสโทแกรมของภาพโทนสีเทา 3 บิต

ตารางที่ 2-2 แสดงการคำนวณ HE

r_k	n_k	$p_r(r_k)$	CDF_k
$r_0 = 0$	790	0.19	0.19
$r_1 = 1$	1023	0.25	0.44
$r_2 = 2$	850	0.21	0.65
$r_3 = 3$	656	0.16	0.81
$r_4 = 4$	329	0.08	0.89
$r_5 = 5$	245	0.06	0.95
$r_6 = 6$	122	0.03	0.98
$r_7 = 7$	81	0.02	1

โดยที่

r_k คือ ระดับค่าความสว่างที่ k

n_k คือ จำนวนความถี่สะสมของจุดภาพที่ระดับความสว่างที่ k

$p_r(r_k)$ เป็น PDF (Probability Density Function) คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่ระดับค่าความสว่างเท่ากับ k สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.4)

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{M \times N} \quad (2.4)$$

โดยที่ M และ N คือ จำนวนแถว และคอลัมน์ของภาพ ตัวอย่างการคำนวณค่า PDF ที่ระดับค่าความสว่าง $k = 0$

$$\begin{aligned} p_r(r_0) &= \frac{n_0}{M \times N} \\ &= \frac{790}{64 \times 64} \\ &= 0.19 \end{aligned}$$

CDF (Cumulative Distribution Function) คือ ฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.5)

$$CDF_k = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \quad (2.5)$$

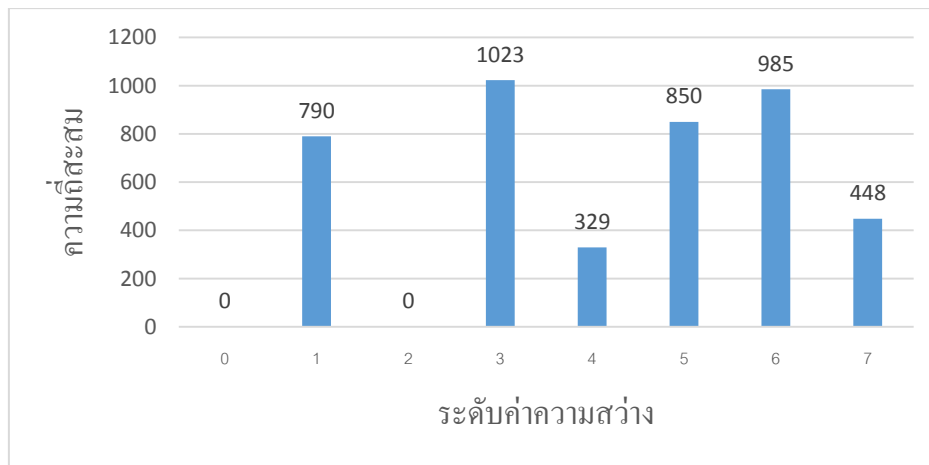
เมื่อคำนวณค่า CDF แล้ว ขั้นตอนต่อมาเป็นการคำนวณค่าความสว่างใหม่โดย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6) และแสดงฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์ดังกล่าวประกอบที่ 2-15

$$s_k = (L - 1)CDF_k \quad (2.6)$$

$$s_1 = (8 - 1) \sum_{j=1}^k p_r(r_j) = 7p_r(r_0) + 7p_r(r_1) = 3.08$$

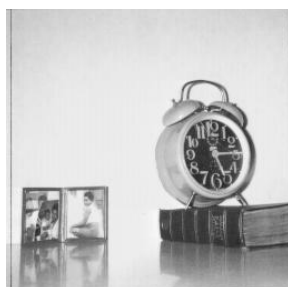
ตารางที่ 2-3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ HE

r_k	n_k	$p_r(r_k)$	CDF_k	S_k
$r_0 = 0$	790	0.19	0.19	$s_0 = 1.33 \rightarrow 1$
$r_1 = 1$	1023	0.25	0.44	$s_1 = 3.08 \rightarrow 3$
$r_2 = 2$	850	0.21	0.65	$s_2 = 4.55 \rightarrow 5$
$r_3 = 3$	656	0.16	0.81	$s_3 = 5.67 \rightarrow 6$
$r_4 = 4$	329	0.08	0.89	$s_4 = 6.23 \rightarrow 6$
$r_5 = 5$	245	0.06	0.95	$s_5 = 6.65 \rightarrow 7$
$r_6 = 6$	122	0.03	0.98	$s_6 = 6.86 \rightarrow 7$
$r_7 = 7$	81	0.02	1	$s_7 = 7.00 \rightarrow 7$

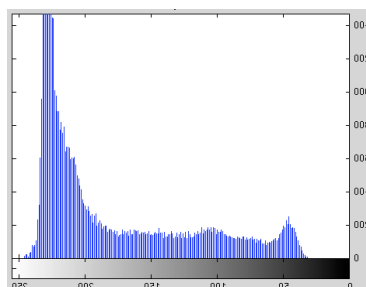


ภาพประกอบที่ 2-15 แสดงฮิสโทแกรมผลลัพธ์ของภาพโทนสีเทา 3 บิต หลังประมวลผลด้วยวิธีการ HE

เมื่อใช้วิธีการ HE ประมวลผลภาพโทนสีเทา ในการปรับปรุงคอนทราสต์ของภาพ เพื่อให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่แสดงสารสนเทศของรายละเอียดภายในภาพชัดเจนขึ้น ดังภาพประกอบที่ 2-16 ถึง 2-20



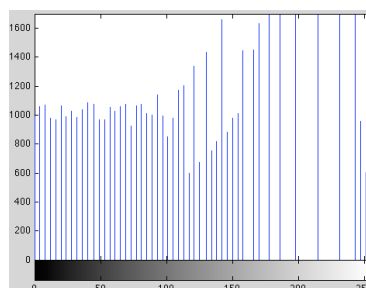
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพต้นฉบับ



(ค) ภาพผลลัพธ์

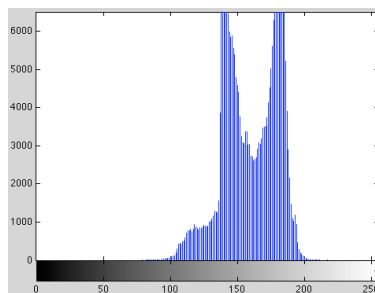


(ง) ฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์

ภาพประกอบที่ 2-16 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE



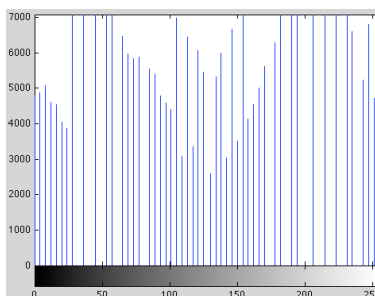
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพต้นฉบับ



(ค) ภาพผลลัพธ์

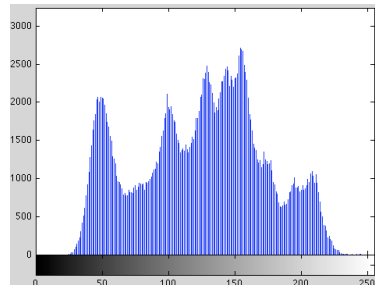


(ง) ฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์

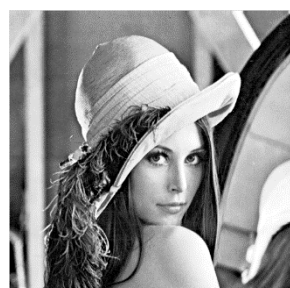
ภาพประกอบที่ 2-17 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE



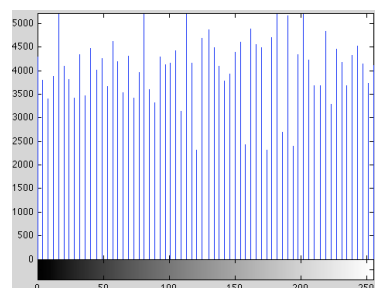
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพต้นฉบับ

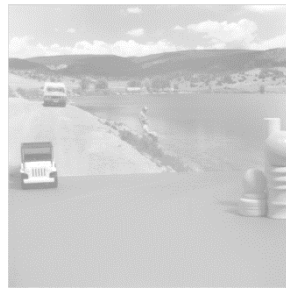


(ค) ภาพผลลัพธ์

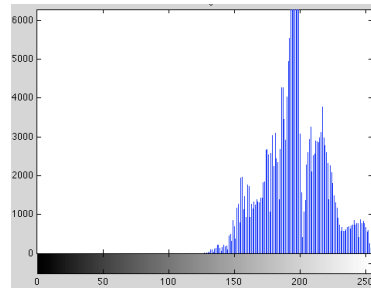


(ง) ฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์

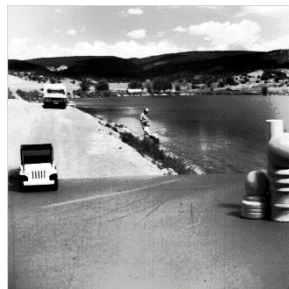
ภาพประกอบที่ 2-18 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE



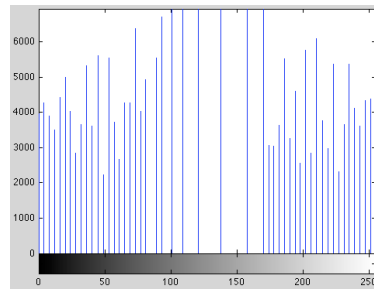
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพต้นฉบับ



(ค) ภาพผลลัพธ์

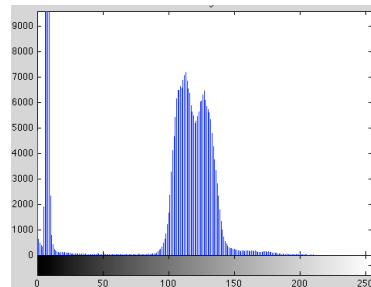


(ง) ฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์

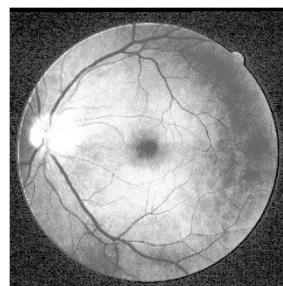
ภาพประกอบที่ 2-19 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE



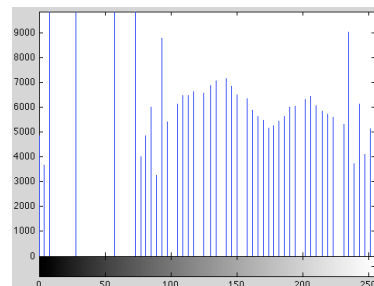
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพต้นฉบับ



(ค) ภาพผลลัพธ์

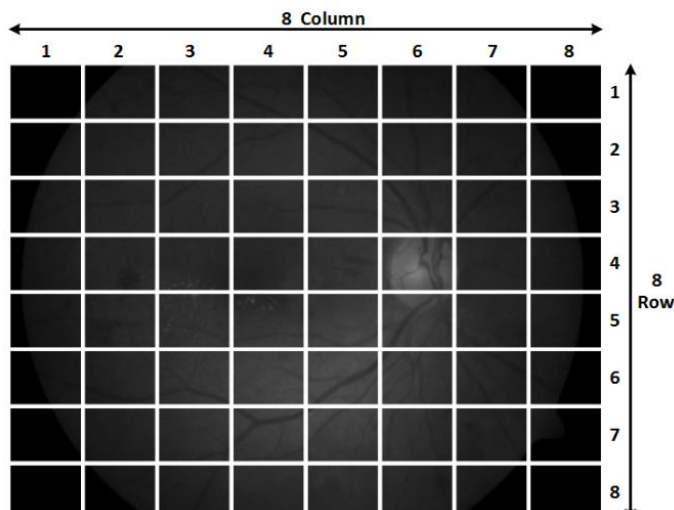


(ง) ฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์

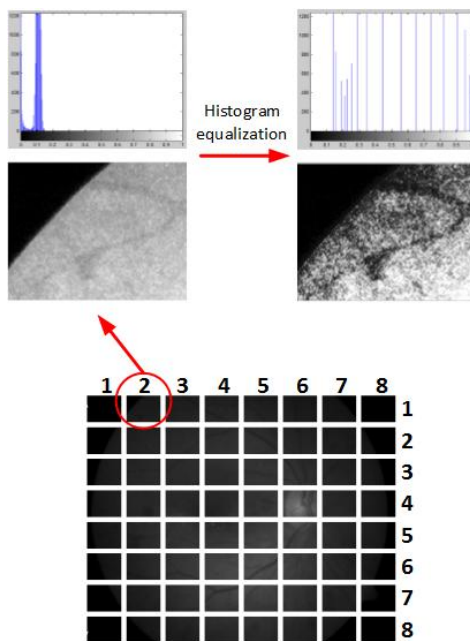
ภาพประกอบที่ 2-20 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ HE

2.5.2.2 Adaptive Histogram Equalization (AHE)

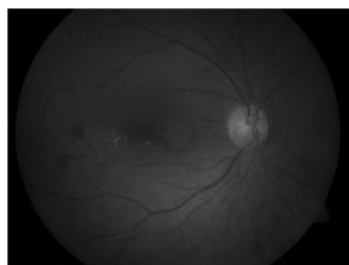
จากวิธีการ HE (Gonzalez and Woods, 2009) ที่ใช้ในการปรับปรุง และเพิ่มความคมชัดของภาพจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของวิธีการ HE นั้นเหมาะกับภาพถ่ายทั่วไป เช่น ภาพถ่ายคน ดังภาพประกอบที่ 2-18 หรือ ภาพวิวธรรมชาติ ดังภาพประกอบที่ 2-19 แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการนำมาปรับปรุงภาพถ่ายจอตาเพราะจะไปขยายสัญญาณรบกวน (Noise) ในข้อมูลพื้นหลังของภาพ (Background) ให้เกิดขึ้นหลังจากปรับปรุงคุณภาพ (Intajag et al., 2008) ดังภาพประกอบที่ 2-20 มีการพัฒนาเพื่อแก้ปัญหการขยายของสัญญาณรบกวนของวิธี HE โดยการปรับปรุงในระดับพื้นที่ (Local Enhancement) (Pizer et al., 1987) โดยจะเป็นการแบ่งภาพออกเป็นพื้นที่ (Region) ดังภาพประกอบที่ 2-21 โดยจำนวนของภาพย่อย (Sub-image) ที่ได้แบ่งออกเป็นพื้นที่นั้นจะถูกกำหนดโดยผู้ใช้ และทุกๆพื้นที่ที่แบ่งออกมานั้นจะนำมาปรับปรุงโดยใช้วิธี HE ดังภาพประกอบที่ 2-22 เป็นการนำภาพย่อยจากแถวที่ 1 คอลัมน์ที่ 2 ไปปรับปรุงด้วยวิธี HE จากนั้นนำแต่ละพื้นที่ของภาพที่ได้ปรับปรุงแล้วมาต่อรวมเป็นภาพเดียวกันดังภาพประกอบที่ 2-23 (ข) เป็นฮิสโทแกรมของข้อมูลภาพต้นฉบับ (ก) เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการ AHE ซึ่งแสดงภาพผลลัพธ์ดังภาพ (ค) และแสดงฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์ดังภาพ (ง)



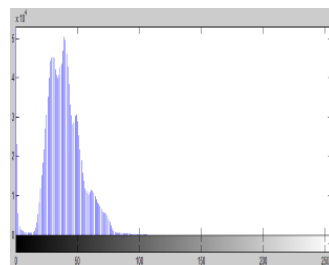
ภาพประกอบที่ 2-21 แสดงภาพถ่ายจอตาโดยแบ่งภาพออกเป็นขนาด 8×8 เท่าๆกัน



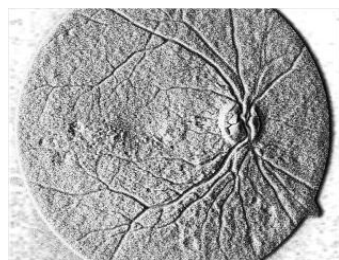
ภาพประกอบที่ 2-22 แสดงผลลัพธ์หลังจากการประมวลผลด้วยวิธี HE ของภาพที่ตำแหน่ง แถวที่ 1 คอลัมน์ที่ 2



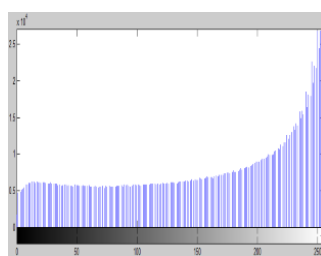
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโตแกรมของภาพต้นฉบับ



(ค) ภาพผลลัพธ์

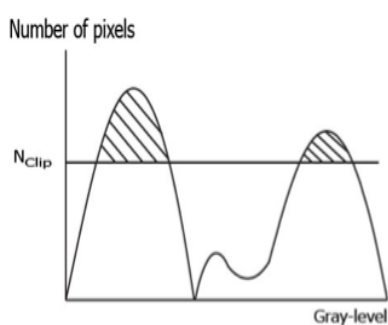


(ง) ฮิสโตแกรมของภาพผลลัพธ์

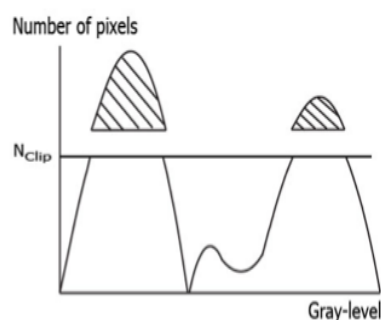
ภาพประกอบที่ 2-23 แสดงรูปภาพก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยวิธี AHE

2.5.2.3 Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization

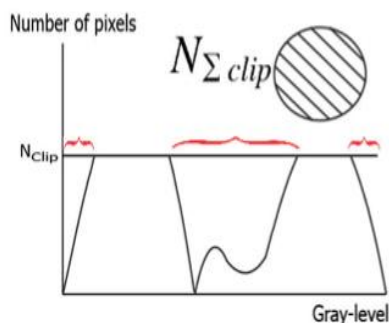
จากวิธีการ AHE ที่ได้มีการพัฒนามาจากวิธี HE สังเกตได้ว่ายังคงเป็นปัญหาเดียวกัน คือ การเกิด Over-enhancement ดังภาพผลลัพธ์ในภาพประกอบที่ 2-23 (ค) และฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์ (ง) ดังนั้นจึงได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้วิธีการ Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) (Karel, 1994) บนพื้นฐานของวิธีการ AHE ซึ่งจะเป็นการลดการกระจายของสัญญาณรบกวนโดยการตัดฮิสโทแกรม (Clip Histogram) แล้วนำไปกระจายให้กับค่าความสว่างที่มีค่าความถี่สะสมไม่เกินค่า N_{clip} ซึ่งเป็นค่า *Clip - limit* ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดฮิสโทแกรม กำหนดโดยผู้ใช้ ดังภาพประกอบที่ 2-24 แสดงขั้นตอนการตัดฮิสโทแกรม และภาพประกอบที่ 2-25 แสดงตัวอย่างการนำส่วนพื้นที่ที่ได้เลือกในภาพประกอบที่ 2-22 มาตัดฮิสโทแกรมก่อนนำไปคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อปรับปรุงค่าความสว่างของพื้นที่นั้น และทุกๆพื้นที่ที่จะต้องปรับปรุงค่าความสว่างด้วยขั้นตอนวิธีดังกล่าว ในขั้นตอนวิธี CLAHE สามารถเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนได้หลายฟังก์ชัน สำหรับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอได้เลือกใช้ Rayleigh ทั้งนี้เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันอื่นๆ เช่น Gaussian และ Exponential แล้ว Rayleigh มีความเหมาะสมที่จะใช้กับภาพจอตามากกว่า ซึ่งจะอธิบายในส่วนของเปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนแต่ละการแจกแจงไว้ในบทที่ 4 และภาพผลลัพธ์จากการนำภาพจอตมาในภาพประกอบที่ 2-23 (ค) มาปรับปรุงค่าความสว่างโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Rayleigh ในขั้นตอนวิธี CLAHE แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-26 (ข) โดยขั้นตอนการคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Rayleigh ในวิธีการ CLAHE นั้น แสดงไว้ในส่วนของบทที่ 3



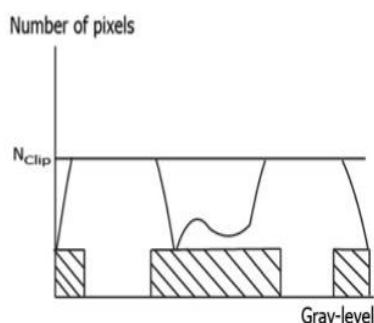
(ก) ฮิสโทแกรมเดิม



(ข) ตัดฮิสโทแกรม
ที่ระดับค่า N_{clip}



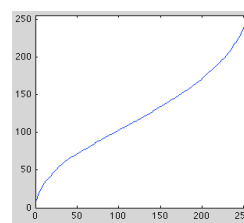
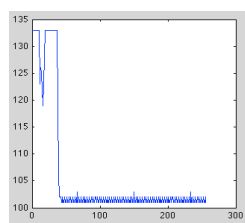
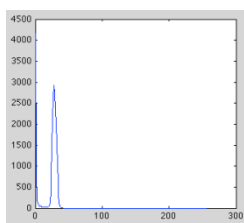
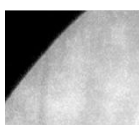
(ค) นำค่าความถี่สะสมมารวมกัน



(ง) กระจายให้กับค่าความสว่าง
ที่มีค่าความถี่สะสมไม่เกินค่า N_{clip}

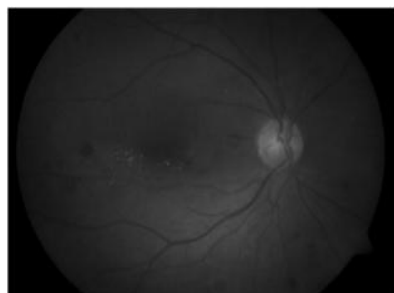
ภาพประกอบที่ 2-24 แสดงขั้นตอนการตัดฮิสโทแกรม

(ก) ภาพ 1



พื้นที่ (ข) ฮิสโทแกรม (ค) ตัดฮิสโทแกรมกำหนด (ง) ฟังก์ชันถ่ายโอน
ของภาพ (ก) $Clip - limit = 0.001$ Rayleigh ของภาพ (ก)

ภาพประกอบที่ 2-25 แสดงการตัดฮิสโทแกรมและรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของภาพ 1 พื้นที่



(ก) ภาพเดิม

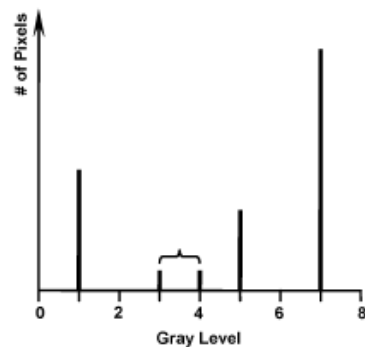


(ข) ภาพผลลัพธ์

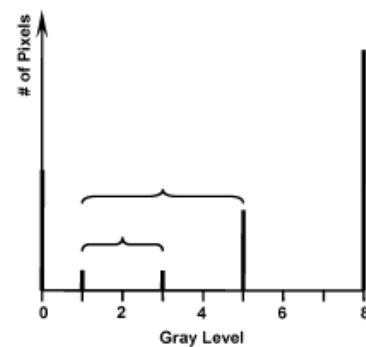
ภาพประกอบที่ 2-26 แสดงผลลัพธ์ภาพถ่ายจอตา ก่อนและหลังปรับปรุงค่าความสว่างด้วยฟังก์ชัน
ถ่ายโอนแบบ Rayleigh ในขั้นตอนวิธี CLAHE

2.5.2.4 Gray-Level Grouping (GLG)

เป็นวิธีการปรับปรุงคอนทราสต์ของภาพ เน้นไปที่ภาพคอนทราสต์ต่ำ เพื่อให้ภาพมีคอนทราสต์ที่ดีขึ้น GLG มีขั้นตอนวิธีในการปรับปรุงภาพ ที่สามารถกำหนดค่าตัวแปรได้เองจากข้อมูลภาพ จึงเป็นวิธีการปรับปรุงภาพแบบอัตโนมัติ (ZhiYu Chen et al., 2006) GLG ใช้การประมวลผลฮิสโทแกรมของภาพโดยจุดประสงค์เพื่อที่จะปรับฮิสโทแกรมของภาพ ผลลัพธ์มีการกระจายที่สม่ำเสมอต่อเนื่องกัน (Uniform) โดยเริ่มจากการจับคู่ระหว่างค่าความถี่สะสมที่มีค่าน้อยที่สุดของค่าความสว่าง กับค่าความสว่างใกล้เคียงที่มีความถี่สะสมน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่สะสมของค่าความสว่างใกล้เคียงอื่นๆ ดังภาพประกอบที่ 2-27 แสดงการจับกลุ่มของฮิสโทแกรมค่าความสว่าง ที่มีระดับความสว่างอยู่ในช่วง 0-8



(ก) ฮิสโทแกรมเดิมและการจับกลุ่มครั้งแรกของค่าความถี่สะสมที่ค่าความสว่างใกล้เคียง



(ข) ฮิสโทแกรมหลังจากคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนในครั้งแรกและการจับกลุ่มครั้งที่สอง

ภาพประกอบที่ 2-27 แสดงการจับกลุ่มของวิธีการ GLG

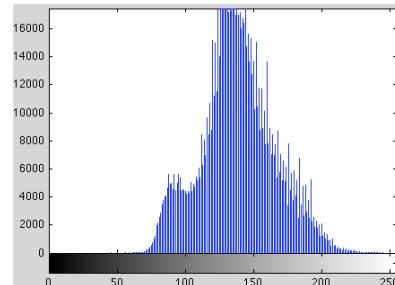
จากภาพประกอบที่ 2-27 เริ่มต้นด้วยการแบ่งกลุ่มของค่าความสว่างที่มีค่าความถี่สะสมไม่เท่ากับ 0 ออกเป็น G_n จำนวนกลุ่ม จากภาพ (ก) แบ่งออกเป็น $n = 5$ นั่นคือ 5 กลุ่ม โดยที่ $G_5(1) = 6$ หมายถึง กลุ่มที่ 1 มีค่าความถี่สะสมเท่ากับ 6 , $G_5(2) = 1, G_5(3) = 1, G_5(4) = 4, G_5(5) = 12$ จากนั้นหากกลุ่มที่มีความถี่สะสมน้อยที่สุด นั่นคือ กลุ่มที่ 2 มีค่าความถี่สะสมเท่ากับ 1 ต่อมาทำการจับกลุ่มกับกลุ่มใกล้เคียงของกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 3 โดยเลือกกลุ่มใกล้เคียงที่มีค่าความถี่สะสมน้อยที่สุด นั่นคือเลือกกลุ่มที่ 3 มีค่าความถี่สะสมเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า กลุ่มที่ 1 ที่มีค่าความถี่สะสมเท่ากับ 6 จากนั้นให้นำค่าความถี่สะสมของกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มารวมกัน เท่ากับ $1+1=2$ และนำไปคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอน เพื่อหาค่าความสว่างใหม่และคำนวณค่าเฉลี่ยของระยะทางที่จำนวนกลุ่มของค่าความสว่างเท่ากับ n ของแต่ละค่าความสว่างของฮิสโท

แกรมที่เกิดจากฟังก์ชันถ่ายโอน (D_n) (ข) จากนั้นทำการลดจำนวน G_n กลุ่มเป็น $n - 1$ กลุ่ม เพราะมีกลุ่มที่ได้รวมกันไปแล้ว โดยจะเหลือจำนวนกลุ่มเท่ากับ $G_4(1) = 6, G_4(2) = 2, G_4(3) = 4, G_4(4) = 12$ และทำการคำนวณโดยใช้วิธีการจับกลุ่มที่อธิบายในขั้นตอนของภาพ (ก) อีกครั้ง จนมีจำนวนกลุ่มเหลือเท่ากับ 2 กลุ่ม และขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความเหมาะสมที่สุด ได้ทำการเลือกจากค่า D_n ที่มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่า D_n ในแต่ละรอบที่มีจำนวนกลุ่มของค่าความสว่างเท่ากับ n และนำฟังก์ชันถ่ายโอนที่จำนวนกลุ่มเท่ากับ n ไปแม่ปกับค่าความสว่างเดิมเพื่อให้ได้ค่าความสว่างใหม่ของภาพผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสม และมีลักษณะการกระจายของฮิสโทแกรมที่ต่อเนื่องกัน

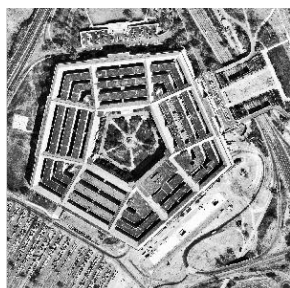
เมื่อนำวิธีการ GLG มาประมวลผลกับภาพโทนสีเทาทั่วไป และภาพถ่ายจอตาโทนสีเทา แสดงภาพผลลัพธ์และฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์ดังภาพประกอบที่ 2-28 และ 2-29 จากผลลัพธ์ของภาพถ่ายจอตาที่ประมวลผลด้วยวิธี GLG นั้นเห็นได้ว่าการขยายสัญญาณรบกวนภายในภาพ ที่ค่าความสว่างในช่วงพื้นหลังของภาพ ทำให้ไม่เหมาะกับการนำมาประมวลผลกับภาพถ่ายจอตา



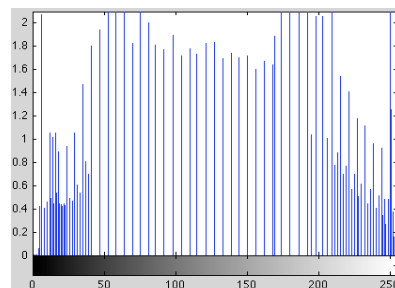
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพต้นฉบับ

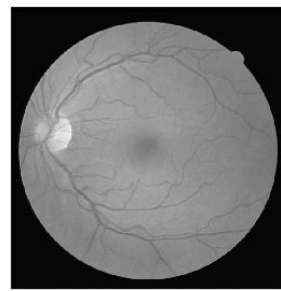


(ค) ภาพผลลัพธ์

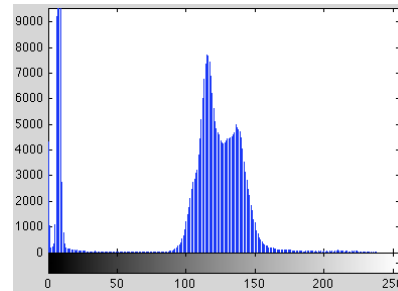


(ง) ฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์

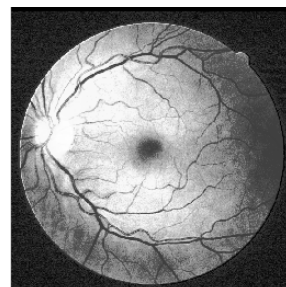
ภาพประกอบที่ 2-28 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ GLG



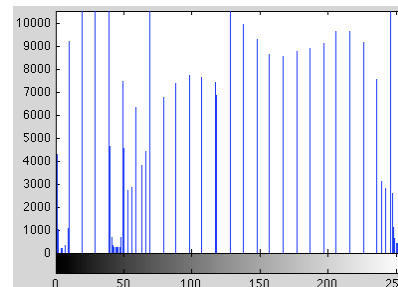
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพต้นฉบับ



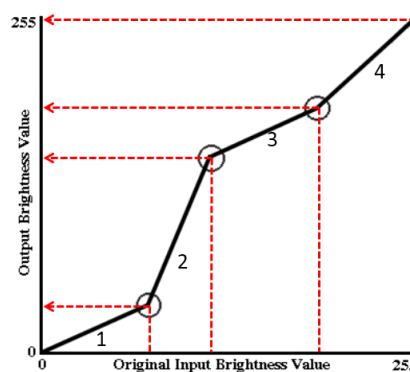
(ค) ภาพผลลัพธ์



(ง) ฮิสโทแกรมของภาพผลลัพธ์

ภาพประกอบที่ 2-29 แสดงภาพก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีการ GLG

2.5.3 Piecewise Linear Contrast Stretch เป็นการเลือกขีดค่าความสว่างของข้อมูลเป็นช่วงที่เฉพาะเจาะจง (Specific portion of data) โดยแต่ละช่วงอาจจะกำหนดพิสัยของการยืดแตกต่างกันไป หลักการคือ พิสัยของระดับค่าความสว่างของข้อมูลเดิมที่ต้องการขยายนั้น จะถูกแบ่งออกเป็นหลายๆช่วง และในแต่ละช่วงของการขยายให้เป็นค่าใดๆก็ได้ตามต้องการ แต่ต้องต่อเนื่องกันไปจนตลอดช่วง 0 – 255 ดังภาพประกอบที่ 2-30 ที่ได้กำหนดแบ่งช่วงของการยืดค่าความสว่างออกเป็น 4 ช่วง



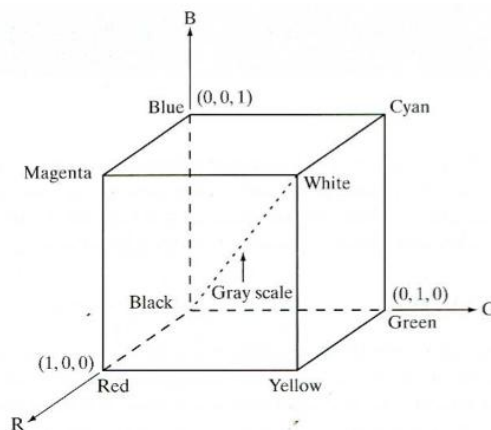
ภาพประกอบที่ 2-30 แสดงการยืดค่าความสว่างแบบ Piecewise ที่กำหนดช่วงของการยืดออกเป็น 4 ช่วง

2.6 ระบบสี RGB และ ระบบสี HSI

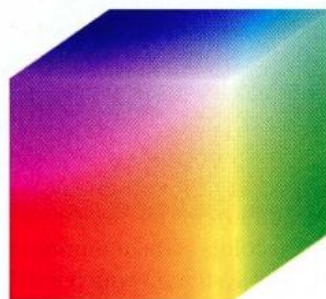
2.6.1 ระบบสี RGB

ระบบสี RGB (Red, Green, Blue) (Gonzalez and Woods, 2009) เป็นระบบสีที่ใช้ในการแสดงผลภาพดิจิทัล โดยมีสีปฐมภูมิ 3 สี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน และมีสีทุติยภูมิ 3 สี คือ สีแดงม่วง (Magenta) สีฟ้าอมเขียว (Cyan) และสีเหลือง (Yellow) ระบบสี RGB สามารถแทนเป็นระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) แสดงด้วยลูกบาศก์หนึ่งหน่วย ดังภาพประกอบที่ 2-31

จากรูปที่ 2-31 สีปฐมภูมิจะอยู่ที่มุมบนแกน ส่วนสีทุติยภูมิจะอยู่ที่มุมระหว่างแกน จุดกำเนิดของลูกบาศก์ $(0, 0, 0)$ แทนด้วย สีดำ และจุดที่อยู่ตรงข้ามกับจุดกำเนิด $(1, 1, 1)$ คือ สีขาว และตำแหน่งที่มีการผสมสีแดง เขียว และน้ำเงิน ในปริมาณที่เท่ากัน จะเรียกว่า Gray scale ซึ่งเป็นเส้นทแยงมุมที่ลากจากสีดำไปยังสีขาว เมื่อนำลูกบาศก์ RGB มาแทนค่าสีจะได้ภาพที่มีลักษณะดังภาพประกอบที่ 2-32



ภาพประกอบที่ 2-31 RGB Model (Gonzalez and Woods, 2009)



ภาพประกอบที่ 2-32 RGB 24-bit color cube (Gonzalez and Woods, 2009)

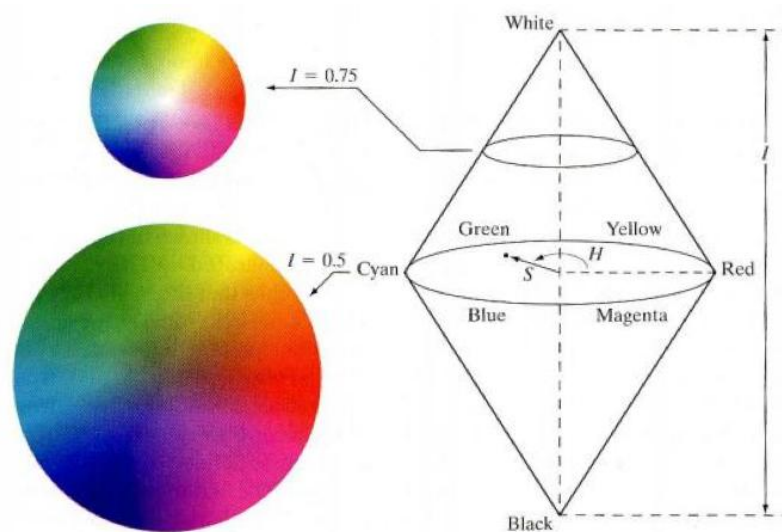
2.6.2 ระบบสี HSI

ระบบสี HSI เป็นการแทนสีในพิกัดเชิงขั้ว (Gonzalez and Woods, 2009) ที่ประกอบไปด้วย เคนสี (Hue) ความอิ่มตัวของสี (Saturation) และ ความสว่างของแสง (Intensity) ดังภาพประกอบที่ 2-33 และสามารถอธิบายแต่ละค่าในระบบสี HSI ได้ดังนี้

1) เคนสี (Hue) เป็นค่ามุม ค่า Hue จะมีค่าระหว่าง $0 - 359^\circ$ เมื่อกำหนดลำดับการเปลี่ยนแปลง จากสีแดง (Hue = 0°) ไปยังสีเขียว (Hue = 120°) และ สีเขียวไปยังสีน้ำเงิน (Hue = 240°)

2) ความอิ่มตัวของสี (Saturation) เป็นค่าระยะทางจากแกนกลางไปยังค่าเคนสี ความอิ่มตัวจะมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้สีที่ได้ใกล้เคียงกับเคนสีที่แท้จริงมากขึ้น ความอิ่มตัวของสีมีค่าไม่เกิน 1 เมื่อความอิ่มตัวเท่ากับ 1 ก็จะกลายเป็นสีที่บริสุทธิ์ของแสง

3) ความสว่างของแสง (Intensity) คือ ค่าที่ระบุว่า สีนั้นมีความสว่างของแสงมากเท่าใด ถ้าค่า ความสว่างแสงมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ค่าเคนสีที่ได้มีส่วนประกอบของสีขาวมากขึ้น ในทางกลับกันถ้ามีค่าน้อยลงก็จะทำให้สีที่ได้มีส่วนประกอบของสีดำมากขึ้นเช่นกัน



ภาพประกอบที่ 2-33 แบบจำลองระบบสี HSI (Gonzalez and Woods, 2009)

2.6.3 การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็นระบบสี HSI

เป็นการแปลงจากระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ไปเป็นระบบเชิงขั้ว การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี HSI มีขั้นตอนการคำนวณค่า Hue ดังสมการที่ (2.7)

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta, & \text{if } B > G \end{cases} \quad (2.7)$$

โดยที่

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{\frac{1}{2}}} \right]$$

ค่า Saturation กำหนดดังสมการที่ (2.8)

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \quad (2.8)$$

ค่า Intensity คำนวณได้จากสมการที่ (2.9)

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (2.9)$$

2.6.4 การแปลงจากระบบสี HSI มาเป็นระบบสี RGB

ในการแปลงจากระบบสี HSI เป็นระบบ RGB จะต้องการค่า RGB ที่สอดคล้องกัน ในช่วงค่าที่เหมือนกัน โดยสมการการแปลงจะขึ้นอยู่กับค่า Hue ว่าอยู่ใน section ใดใน 3 section ที่แบ่งออกเป็นช่วง 120° เท่ากัน

RG sector ($0^\circ \leq H < 120^\circ$)

ถ้าค่า Hue อยู่ใน section นี้ ค่า RGB จะถูกกำหนดด้วยสมการต่อไปนี้

$$B = I(1 - S) \quad (2.10)$$

$$R = I \left[1 + \frac{S \cos(H)}{\cos(60 - H)} \right] \quad (2.11)$$

$$G = 3I - (R + B) \quad (2.12)$$

GB sector ($120^\circ \leq H < 240^\circ$)

ถ้าค่า Hue อยู่ใน section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 120° ก่อนจะหาค่า RGB ตามสมการต่อไปนี้

$$H = H - 120 \quad (2.13)$$

$$R = I(1 - S) \quad (2.14)$$

$$G = I \left[1 + \frac{S \cos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.15)$$

$$B = 3I - (R - G) \quad (2.16)$$

BR sector ($240^\circ \leq H < 360^\circ$)

ถ้าค่า Hue อยู่ใน section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 240° ก่อนจะหาค่า RGB ตามสมการต่อไปนี้

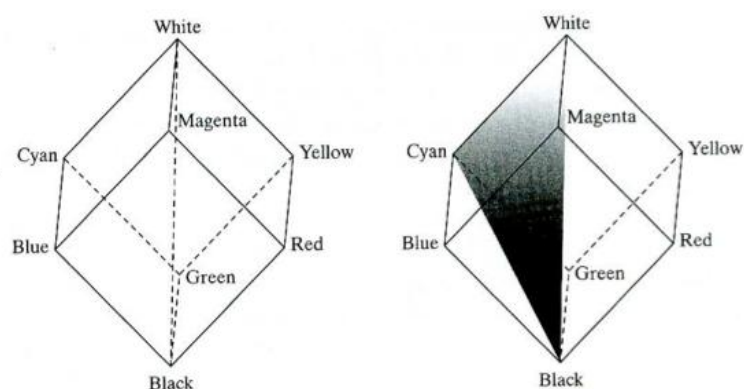
$$H = H - 240 \quad (2.17)$$

$$G = I(1 - S) \quad (2.18)$$

$$B = I \left[1 + \frac{S \cos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.19)$$

$$R = 3I - (G + B) \quad (2.20)$$

ขั้นตอนการแปลงจากระบบสี RGB ไปเป็นระบบสี HSI ตามสมการที่ (2.7)-(2.9) และการแปลงจากระบบสี HSI ให้กลับมาอยู่ในระบบสี RGB ตามสมการที่ (2.10)-(2.20) เป็นการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยการย้ายแกนค่าความสว่างของระบบ RGB ให้อยู่ในแกนตั้ง ดังภาพประกอบที่ 2-34 ซึ่งรูปสามเหลี่ยมจาก Black-White-Cyan จะมีค่า Hue เป็นค่าเดียวกัน เนื่องจากองค์ประกอบของสีขาวและสีดำไม่มีผลต่อค่า Hue ขณะที่ค่า ความอิ่มตัวสี และ ค่าความสว่างของแสง ของแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน

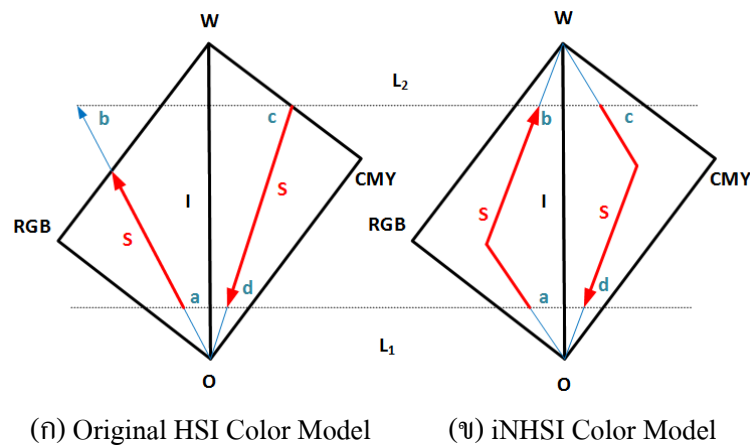


ภาพประกอบที่ 2-34 แนวคิดสัมพันธ์ระหว่างระบบสี RGB และระบบสี HSI

(Gonzalez and Woods, 2009)

2.7 ระบบสี Improved Nonlinear HSI (iNHSI)

เป็นระบบสีที่ปรับปรุงมาจากระบบสี HSI ระบบสี iNHSI (Chien and Tsai, 2014) พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาการเกิด out-of-gamut ของระบบสี HSI เดิม ที่เกิดจากการแปลงค่าสีในระบบ RGB มาเป็นระบบสี HSI เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า I แล้วนำมาแทนกลับเข้าไปในระบบสี HSI พอแปลงกลับมาเป็นระบบสี RGB เพื่อที่จะใช้ในการแสดงผล ทำให้ค่าสีของจุดภาพที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่ามาจากระบบสี HSI มีค่าเกินจากช่วง (out-of-range) ของระบบสี RGB คือมีสีของจุดหนึ่งจุดใดตกอยู่นอกลูกบาศก์สี ซึ่งวิธีแก้ปัญหาของระบบสี HSI เดิมจะทำการปิดค่าที่เกิน (Clipping) ให้เป็นค่าสูงสุด ดังภาพประกอบที่ 2-35 ทำให้ค่าสีที่ได้นั้นไม่ถูกต้อง และทำให้ข้อมูลของภาพนั้นผิดเพี้ยนไปจากเดิม



ภาพประกอบที่ 2-35 แสดงการเกิดปัญหา out-of-gamut (Chien and Tsai, 2014)

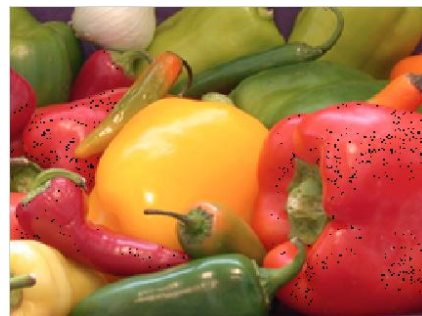
จากภาพประกอบที่ 2-35 ภาพ (ก) เป็นความสัมพันธ์ในระบบสี HSI เดิม สังเกตว่าเมื่อมีการเพิ่มค่า I จากระดับ L_1 ไปยังระดับ L_2 ทำให้จุด a ที่เป็นค่าความอิ่มตัวของความสว่างที่ระดับ L_1 นั้นเปลี่ยนแปลงไปยังจุด b จึงทำให้ค่าสีนั้นออกนอกช่วง ในขณะที่ภาพ (ข) เป็นการแปลงในระบบสี iNHSI ซึ่งจะเป็นการแก้ไขการเกิดการออกนอกช่วงโดยยังคงรักษาความสัมพันธ์ของค่าความสว่างและค่าความอิ่มตัว จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มค่า I จากระดับ L_1 ไปยังระดับ L_2 จะทำให้จุด a ที่เป็นค่าความอิ่มตัวของความสว่างที่ระดับ L_1 นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามระดับค่า I ที่เพิ่มขึ้นไปยังจุด b ซึ่งจะไม่เกิดปัญหาที่จะทำให้ค่าสีนั้นออกนอกช่วง ด้วยการปรับส่วนที่เกินให้กลับเข้ามาอยู่ในลูกบาศก์สี โดยมีแนวคิดในการแบ่งลูกบาศก์สี RGB ออกเป็นสองส่วนคือ H_{lower} และ H_{upper} ดังภาพประกอบที่ 2-36

ตัวอย่างการเกิดปัญหา out-of-gamut จากภาพ 2-35 (ก) จุด a มีค่า $R=102$, $G=25$, $B=25$ เมื่อแปลงจากระบบพิกัดคาร์ทีเซียนมาเป็นพิกัดเชิงขั้วในระบบสี HSI โดยใช้สูตรการแปลง

ตามสมการที่ (2.7)-(2.9) มีค่า $H = 0^\circ$, $s = 0.5$, $I = 0.2$ จากนั้นได้เลื่อนจุด a ไปยังจุด b ซึ่งที่ตำแหน่งนี้มีค่า $I = 0.8$ โดยคงค่าความอิ่มตัว $s = 0.5$ ค่าเฉดสี $H = 0^\circ$ และแปลงค่ากลับจากระบบพิกัดเชิงขั้วในระบบสี HSI ไปยังระบบพิกัดคาร์ทีเซียนในระบบสี RGB โดยใช้สูตรการแปลงตามสมการที่ (2.10)-(2.12) ได้ค่า $R=408$, $G=102$, $B=102$ สังเกตได้ว่าค่าความสว่างในแบนด์สีแดงมีค่าเกินไปจาก 255 ซึ่งเป็นระดับค่าความสว่างสูงสุดของภาพ 8 บิต ที่ต้องมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 0-255 ค่าสีที่เกินออกไปนี้จะถูกตัดค่าส่วนที่เกินออกทำให้ค่าสีนั้นไม่ถูกต้อง ในขณะเดียวกันที่ระบบสี iNHSI ได้มีการแก้ปัญหา out-of-gamut จากภาพ 2-35 (ข) จุด a มีค่า $R=102$, $G=25$, $B=25$ และเมื่อแปลงจากระบบพิกัดคาร์ทีเซียนมาเป็นพิกัดเชิงขั้วในระบบสี iNHSI โดยใช้สูตรการแปลงตามสมการที่ (2.21)-(2.23) มีค่า $H = 0^\circ$, $s = 0.5$, $I = 0.2$ จากนั้นได้เลื่อนจุด a ไปยังจุด b ซึ่งที่ตำแหน่งนี้มีค่า $I = 0.8$ โดยคงค่าความอิ่มตัว $s = 0.5$ ค่าเฉดสี $H = 0^\circ$ และแปลงค่ากลับจากระบบพิกัดเชิงขั้วในระบบสี iNHSI ไปยังระบบพิกัดคาร์ทีเซียนในระบบสี RGB โดยใช้สูตรการแปลงตามสมการที่ (2.42)-(2.45) เมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขของค่าเฉดสี H และค่าความสว่าง I ได้ค่า $R=229$, $G=191$, $B=191$ สังเกตได้ว่าไม่มีปัญหา out-of-gamut และยังคงสัดส่วนของค่าสีไว้ตามแนวลูกบาศก์สี ดังภาพประกอบที่ 2-36 แสดงภาพต้นฉบับและเปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ที่เกิดจากระบบสี HSI และระบบสี iNHSI



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์จากระบบสี HSI



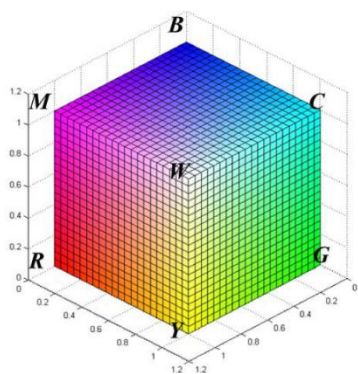
(ค) ภาพผลลัพธ์จากระบบสี iNHSI

ภาพประกอบที่ 2-36 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างระบบสี HSI และระบบสี iNHSI

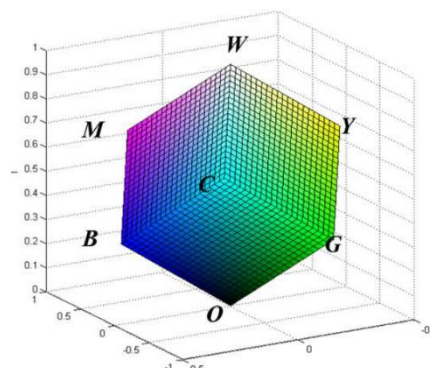
จากภาพประกอบที่ 2-36 ที่เป็นภาพผลลัพธ์จากระบบสี HSI และระบบสี iNHSI นั้นมีการวัดคุณภาพของภาพที่เกิดปัญหา out-of-gamut (ข) และภาพที่ไม่เกิดปัญหา out-of-gamut (ค) โดยใช้การวัดคุณภาพของค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ (Correlation Coefficient) กับภาพต้นฉบับ สังเกตได้ว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของภาพที่ไม่เกิดปัญหา out-of-gamut ของระบบสี iNHSI มีค่ามากกว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของภาพที่เกิดปัญหา out-of-gamut ของระบบสี HSI โดยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์คำนวณได้จากสมการที่ (2.46) แสดงได้ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 แสดงค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของภาพประกอบที่ 2-35

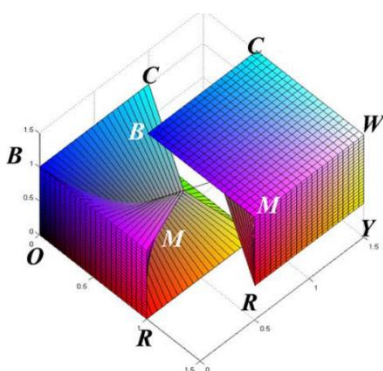
ภาพประกอบที่	ระบบสี	R	G	B	Avg
2-36 (ข)	HSI	0.9914	0.9949	0.9850	0.9904
2-36 (ค)	iNHSI	0.9974	0.9980	0.9896	0.9950



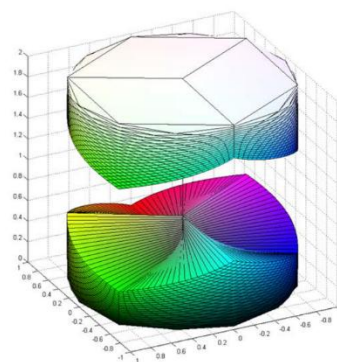
(ก) ลูกบาศก์สี RGB



(ข) แบบจำลอง HSI แบบเชิงเส้นบนพื้นฐานสี RGB



(ค) ลูกบาศก์สีแบ่งออกเป็น 2 ส่วน



(ง) ลูกบาศก์สี RGB (ค) ในแบบจำลอง iNHSI

H_{lower} และ H_{upper}

ภาพประกอบที่ 2-37 แสดงแนวคิดของระบบสี iNHSI และการแบ่งลูกบาศก์สี RGB ออกเป็น 2 ส่วน (Chien and Tsai, 2014)

จากภาพประกอบที่ 2-37 ภาพ (ก) แสดงลูกบาศก์สี RGB และเมื่อนำภาพ 2-37 (ก) มาหมุนให้ตั้งขึ้นในแนวตั้ง โดยหมุนจากสีขาวซึ่งแทนด้วย W ให้ตั้งขึ้น จากนั้นมุมล่างสุดที่เป็นจุดปลายต่ำสุดคือสีดำซึ่งแทนด้วย 0 โดยระยะทางจาก 0 ไปยัง W นั้นจะเป็นค่าความสว่าง I มีค่าอยู่ในช่วง $0-1$ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของระบบสี iNHSI โดยในระบบสี iNHSI ได้ออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหา out-of-gamut เป็นการแบ่งลูกบาศก์สีออกเป็น 2 ส่วนคือ H_{lower} และ H_{upper} ตามระดับค่าความสว่าง I โดย H_{lower} จะแบ่งที่ระดับความสว่าง I เท่ากับ $\frac{1}{3}$ ซึ่งที่ค่าความสว่างนี้เมื่อทำการลากเส้นให้ตั้งฉากกับแกน I นั้นจะเป็นมุมของสีแดงแทนด้วย R มุมของสีเขียวแทนด้วย G และมุมของสีฟ้าแทนด้วย B เพราะที่มุมทั้ง 3 นี้เป็นบริเวณที่มีค่าความอิ่มตัวของสี S สูงที่สุดของค่าความสว่าง I เท่ากับ $\frac{1}{3}$ จากนั้นได้ใช้แนวคิดเดียวกันในการแบ่งส่วนของ H_{upper} โดยจะแบ่งที่ระดับความสว่าง I เท่ากับ $\frac{2}{3}$ ซึ่งที่ค่าความสว่างนี้เมื่อทำการลากเส้นให้ตั้งฉากกับแกน I นั้นจะเป็นมุมของสีฟ้าอมเขียวแทนด้วย C มุมของสีม่วงแดงแทนด้วย M และมุมของสีเหลืองแทนด้วย Y เพราะที่มุมทั้ง 3 นี้เป็นบริเวณที่มีค่าความอิ่มตัวของสี S สูงที่สุด เพราะที่มุมทั้ง 3 นี้เป็นบริเวณที่มีค่าความอิ่มตัวของสี S สูงที่สุดของค่าความสว่าง I เท่ากับ $\frac{2}{3}$ ดังภาพ (ค) ที่แสดงการแบ่งลูกบาศก์สีออกเป็น 2 ส่วน และ ภาพ (ง) แสดงแบบจำลองในระบบสี iNHSI

2.7.1 การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็นระบบ iNHSI

การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี iNHSI มีขั้นตอนการคำนวณค่า Hue ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta, & \text{if } B > G \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{\frac{1}{2}}} \right]$$

ค่า Intensity คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (2.22)$$

ค่า Saturation กำหนดดังสมการ

$$S = \begin{cases} 1 - \frac{3 \times \min(R,G,B)}{R+G+B}, & \text{if } I \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{\text{mod } 120^\circ - 60^\circ}|}{180^\circ}, (H_{\text{lower}}) \\ 1 - \frac{3(1 - \max(R,G,B))}{3 - (R+G+B)}, & \text{if } I > \frac{2}{3} - \frac{|H_{\text{mod } 120^\circ - 60^\circ}|}{180^\circ}, (H_{\text{upper}}) \end{cases} \quad (2.23)$$

2.7.2 การแปลงจากระบบสี iNHSI มาเป็นระบบสี RGB

ในการแปลงจากระบบสี iNHSI เป็นระบบ RGB นั้นจะแบ่งการแปลงออกเป็น 2 ส่วน คือ H_{lower} และ H_{upper} ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

2.7.2.1 การแปลงระบบสี iNHSI เป็นระบบสี RGB ที่จุดสีอยู่ในช่วง

H_{lower}

โดยสมการการแปลงจะขึ้นอยู่กับค่า Intensity และค่า Hue ว่าอยู่ใน section ไດ

RG section ($0^\circ \leq H < 120^\circ$ and $I \leq \frac{2}{3} - \frac{|h-60^\circ|}{180^\circ}$)

ถ้าค่า Hue และ Intensity อยู่ใน section นี้ ค่า RGB จะถูกกำหนดด้วยสมการต่อไปนี้

$$B = I(1 - S) \quad (2.24)$$

$$R = I \left[1 + \frac{S \cos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.25)$$

$$G = 3I - (R + B) \quad (2.26)$$

GB sector ($120^\circ \leq H < 240^\circ$ and $I \leq \frac{2}{3} - \frac{|h-180^\circ|}{180^\circ}$)

ถ้าค่า Hue และ Intensity อยู่ใน section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 120° ก่อนจะหาค่า RGB ดังสมการต่อไปนี้

$$H = H - 120 \quad (2.27)$$

$$R = I(1 - S) \quad (2.28)$$

$$G = I \left[1 + \frac{S \cos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.29)$$

$$B = 3I - (R - G) \quad (2.30)$$

BR sector ($240^\circ \leq H < 360^\circ$ and $I \leq \frac{2}{3} - \frac{|h-300^\circ|}{180^\circ}$)

ถ้าค่า Hue และ Intensity อยู่ใน section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 240° ก่อนจะหาค่า RGB ดังสมการต่อไปนี้

$$H = H - 240 \quad (2.31)$$

$$G = I(1 - S) \quad (2.32)$$

$$B = I \left[1 + \frac{Scos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.33)$$

$$R = 3I - (G + B) \quad (2.34)$$

2.7.2.2 การแปลงระบบสี iNHSI เป็นระบบสี RGB ที่จุดสีอยู่ในช่วง H_{upper}
โดยสมการการแปลงจะขึ้นอยู่กับค่า Intensity และค่า Hue ว่าอยู่ใน section ใด

YC section ($60^\circ \leq H < 180^\circ$ and $I > \frac{1}{3} + \frac{|H-120^\circ|}{180^\circ}$)

ถ้าค่า Hue และ Intensity อยู่ใน section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 240° ก่อนจะหาค่า RGB ดังสมการต่อไปนี้

$$H = H - 240 \quad (2.35)$$

$$G = I(1 - S) + S \quad (2.36)$$

$$B = 1 - (1 - I) \left[1 + \frac{Scos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.37)$$

$$R = 3I - (G + B) \quad (2.38)$$

CM section ($180^\circ \leq H < 300^\circ$ and $I > \frac{1}{3} + \frac{|H-240^\circ|}{180^\circ}$)

ถ้าค่า Hue และ Intensity อยู่ใน section นี้ ค่า RGB จะถูกกำหนดด้วยสมการต่อไปนี้

$$B = I(1 - S) + S \quad (2.39)$$

$$R = 1 - (1 - I) \left[1 + \frac{Scos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.40)$$

$$G = 3I - (B + R) \quad (2.41)$$

MY sector ($300^\circ \leq H < 0^\circ$ and $I > \frac{1}{3} + \frac{|360^\circ-H|}{180^\circ}$) or ($0^\circ \leq H < 60^\circ$ and $I > \frac{1}{3} + \frac{180^\circ}{180^\circ}$)

ถ้าค่า Hue และ Intensity อยู่ใน section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 120° ก่อนจะหาค่า RGB ดังสมการต่อไปนี้

$$H = H - 120 \quad (2.42)$$

$$R = I(1 - S) + S \quad (2.43)$$

$$G = 1 - (1 - I) \left[1 + \frac{Scos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (2.44)$$

$$B = 3I - (R + G) \quad (2.45)$$

2.8 การประมวลผลภาพสี RGB

การประมวลผลภาพสี RGB ที่ประกอบไปด้วยแบนด์ของค่าความสว่างสีแดง (Red :R) แบนด์ค่าความสว่างสีเขียว (Green: G) และแบนด์ค่าความสว่างสีน้ำเงิน (Blue: B) มีเทคนิคการประมวลผลอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของแต่ละบุคคลที่นำมาใช้ในงานแต่ละประเภท ในงานวิจัยนี้ได้อธิบายการประมวลผลภาพสีออกเป็น 2 รูปแบบคือ

2.8.1 การประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างแต่ละแบนด์

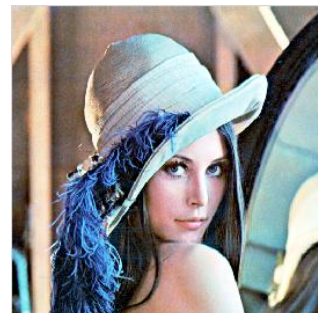
ในการประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างของแต่ละแบนด์ นั้น เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน เป็นการดำเนินการปรับปรุงค่าความสว่างในแต่ละแบนด์สี R, G และ B ที่เป็นอิสระต่อกัน และนำค่าผลลัพธ์ของค่าความสว่างในแต่ละแบนด์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วมารวมกันเป็นภาพสี RGB ดังภาพประกอบที่ 2-38 และ 2-39 แสดงผลลัพธ์เปรียบเทียบการประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลด้วยวิธี Linear Contrast Stretch โดยใช้สูตรคำนวณดังสมการที่ (2.2) และวิธีการ Histogram equalization ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5.2.1 แสดงให้เห็นว่าภาพผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธีนั้น มีสีของภาพที่แตกต่างไปจากภาพต้นฉบับ ซึ่งนั่นคือข้อมูลสีของภาพถูกเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ข้อมูลภาพผิดเพี้ยน



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์จากวิธี



(ค) ภาพผลลัพธ์จากวิธี HE

Linear Contrast stretch

ภาพประกอบที่ 2-38 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างแต่ละแบนด์ของวิธี

Linear Contrast Stretch และวิธี HE



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์จากวิธี



(ค) ภาพผลลัพธ์จากวิธี HE

Linear Contrast stretch

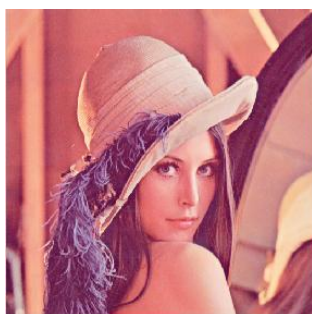
ภาพประกอบที่ 2-39 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างของแต่ละแบนด์ของวิธี

Linear Contrast Stretch และวิธี HE

2.8.2 การประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างในระบบสี

iNHSI

จากการประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างของแต่ละแบนด์นั้นแสดงให้เห็นว่าการประมวลผลด้วยวิธีนี้ทำให้ข้อมูลสีของภาพมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ภาพถ่าย ในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการประมวลผลภาพสี RGB ในระบบสี iNHSI โดยประมวลผลเฉพาะค่าความสว่าง I และยังคงค่าเฉดสี H และค่าความอิ่มตัวสี S ค่าเดิมไว้ จากนั้นแปลงค่าสีจากระบบสี iNHSI มาเป็นระบบสี RGB เพื่อแสดงผล ดังภาพประกอบที่ 2-40 และ 2-41 แสดงผลลัพธ์เปรียบเทียบการประมวลผลภาพสี RGB โดยการประมวลผลด้วยวิธี Linear Contrast Stretch โดยใช้สูตรคำนวณดังสมการที่ (2.2) และวิธีการ Histogram equalization ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5.2.1



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์จากวิธี



(ค) ภาพผลลัพธ์จากวิธี HE

Linear Contrast stretch

ภาพประกอบที่ 2-40 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างในระบบสี iNHSI

โดยวิธี Linear Contrast Stretch และวิธี HE



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์จากวิธี



(ค) ภาพผลลัพธ์จากวิธี HE

Linear Contrast stretch

ภาพประกอบที่ 2-41 แสดงภาพผลลัพธ์ RGB โดยการประมวลผลค่าความสว่างในระบบสี iNHSI โดยวิธี Linear Contrast Stretch และวิธี HE

จากภาพประกอบที่ 2-40 และ 2-41 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลสีเดิมของภาพผลลัพธ์ และภาพต้นฉบับไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยค่าที่เปลี่ยนแปลงคือค่าความสว่างของภาพ จากภาพประกอบที่ 2-41 (ข) และ (ค) ภาพผลลัพธ์มีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น ตัวอย่างการประมวลผลภาพสีที่แสดงไปแล้วนั้น พบว่ามีค่าความสว่างที่มากเกินไป ในงานวิจัยนี้จึงขอเสนอการปรับปรุงค่าความสว่างของภาพถ่ายจอตาที่มีคอนทราสต์น้อยและคอนทราสต์มาก โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

2.9 การวัดและการประเมินคุณภาพ

ในการวัดและการประเมินคุณภาพของภาพที่ถูกปรับปรุงแล้วนั้น จะใช้การวัดข้อมูลภาพโดยใช้เอนโทรปีของข้อมูลและการวัดในเชิงสเปกตรัม จากการศึกษาเบื้องต้นได้ประเมินคุณภาพในเชิงสเปกตรัมด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

2.9.1 การวัดคุณภาพเชิงสเปกตรัม

1) สหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์

การวัดสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson (Pearson, 1895) จะแสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นของสองตัวแปรที่มีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ คือ ถ้าข้อมูลมีความเหมือนกันแต่อยู่ในลักษณะที่สวนทางกันค่าที่ได้จะเข้าใกล้ -1 และถ้าข้อมูลมีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงค่าที่ได้จะเท่ากับ 0 แต่ถ้าค่าระดับความสัมพันธ์เคลื่อนเข้าสู่ 1 แสดงว่าระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลภาพ A กับภาพ B โดยทั้งสองภาพนี้มีขนาดเท่ากันคือ $M \times N$ จุดภาพ เมื่อต้องการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์สีแดง และแบนด์สีเขียวของภาพ A แทนด้วยภาพต้นฉบับ สามารถคำนวณได้ดัง

สมการที่ (2.46) และภาพ B แทนภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงสีแล้ว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.47)

$$CC_{R,G} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (R_{i,j} - \bar{R})(G_{i,j} - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (R_{i,j} - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (G_{i,j} - \bar{G})^2}} \quad (2.46)$$

$$CC_{R',G'} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (R'_{i,j} - \bar{R}')(G'_{i,j} - \bar{G}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (R'_{i,j} - \bar{R}')^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (G'_{i,j} - \bar{G}')^2}} \quad (2.47)$$

โดยที่ \bar{R} และ \bar{G} เป็นค่าเฉลี่ยของแบนด์สีแดง และแบนด์สีเขียวของภาพต้นฉบับที่ต้องการหาค่าความสัมพันธ์ และ \bar{R}' และ \bar{G}' เป็นค่าเฉลี่ยของแบนด์สีแดง และแบนด์สีเขียวของภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงสีแล้ว ตัวแปร $R_{i,j}$ และ $G_{i,j}$ เป็นค่าความสว่างของจุดภาพของแบนด์สีแดง และแบนด์สีเขียว ที่ตำแหน่งพิกัด i และ j ของภาพต้นฉบับ ตัวแปร $R'_{i,j}$ และ $G'_{i,j}$ แสดงถึงค่าความสว่างของจุดภาพของแบนด์สีแดง และแบนด์สีเขียว ที่ตำแหน่งพิกัด i และ j ของภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงสีแล้ว

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของแต่ละคู่ สำหรับแบนด์ R, G, B ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงสีกับแบนด์ที่ได้จากการปรับปรุงสีแล้ว คือ R', G', B' จะสามารถนำมาเปรียบเทียบในแต่ละคู่ดังนี้

$$CC_{R,G}, CC_{R',G'}$$

$$CC_{G,B}, CC_{G',B'}$$

$$CC_{B,R}, CC_{B',R'}$$

ค่าจากการวัดสหสัมพันธ์ด้วยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ ของภาพที่ปรับปรุงแล้วกับแบนด์ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงจะต้องไม่แตกต่างกันมาก เช่น สหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ R กับ G ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคือ $CC_{R,G} = 0.94$ ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างชุดเดียวกันแต่มีการปรับปรุงแล้วคือ $CC_{R',G'} = 0.94$ ด้วยเช่นกัน จึงถือว่ามีคามผิดพลาดเพียงเล็กน้อย

2.9.2 การวัดเอนโทรปีของข้อมูล

เป็นการวัดคอนทราสต์ ของภาพซึ่งถ้าค่าเอนโทรปีของข้อมูลภาพที่วัดได้มีค่าสูง แสดงว่าข้อมูลภาพชุดนั้นมีความต่างของข้อมูล แสดงว่าข้อมูลภาพชุดนั้นประกอบไปด้วยค่าความสว่างที่ต่าง ๆ กัน เมื่อแสดงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบของฮิสโทแกรม ของค่าความสว่างจะเห็นว่าข้อมูลกระจายกันอยู่ในช่วงกว้างๆ ต่อเนื่องกัน ซึ่งค่าเอนโทรปีสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.48)

$$H(I) = -\sum_{i=1}^m P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (2.48)$$

โดยที่ x_i เป็นค่าความสว่างภายในภาพ I และ m เป็นจำนวนค่าความสว่างภายในภาพ และ $P(x_i)$ เป็นค่าความน่าจะเป็นของค่าความสว่าง x_i จากสมการที่ (2.48) การหาค่าเอนโทรปีของข้อมูลพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นของค่าความสว่างของข้อมูลภาพ

2.9.3 การวัดโดย Quaternion Structural Similarity (QSSIM)

QSSIM (Kolaman and Yadid-Pecht, 2012) เป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวัดประเมินคุณภาพของภาพ โดยการวัดคอนทราสต์ของภาพ วัดความเบลอของภาพ และวัดความผิดเพี้ยนของสีในภาพผลลัพธ์เมื่อเทียบกับภาพเดิม ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.49) ตัวอย่าง ภาพประกอบที่ 2-42 แสดงการเปรียบเทียบภาพสีเดิมและภาพสีที่ได้ผ่านกระบวนการลดคุณภาพของภาพเพื่อทำให้ภาพเบลอ ลดคอนทราสต์ของภาพ และลดความอิ่มตัวของสีของภาพ



(ก) ภาพเดิม



(ข) $\sigma_{blur} = 2$
 $saturate \times 1$



(ค) $\sigma_{blur} = 2$
 $saturate \times 0.4$



(ง) $\sigma_{blur} = 2$
 $saturate \times 0.1$



(จ) $\sigma_{blur} = 15$
 $saturate \times 1$



(ฉ) $\sigma_{blur} = 15$
 $saturate \times 0.4$



(ช) $\sigma_{blur} = 15$
 $saturate \times 0.1$

ภาพประกอบที่ 2-42 ภาพเดิมและภาพที่ผ่านการลดคุณภาพ

$$QSSIM_{ref,deg} = \left| \left(\frac{2\mu_{qref} \cdot \mu_{qdeg}}{\mu_{qref}^2 + \mu_{qdeg}^2} \right) \left(\frac{\sigma_{qref,deg}}{\sigma_{qref}^2 + \sigma_{qdeg}^2} \right) \right| \quad (2.49)$$

โดยที่ μ_{qref} และ μ_{qdeg} คือค่าเฉลี่ยของค่าความสว่างของภาพต้นฉบับ และภาพผลลัพธ์ ตามลำดับ σ_{qref} และ σ_{qdeg} คือค่าเฉลี่ยของขนาดของเวกเตอร์ของค่าความสว่างเมื่อวัดจากค่าเฉลี่ยของค่าความสว่างของภาพต้นฉบับ และภาพผลลัพธ์ ตามลำดับ เพื่อใช้ในการวัดความผิดเพี้ยนของสี และวัดคอนทราสต์ของภาพ

จากการใช้วิธีการ QSSIM วัดความเบลอและความผิดเพี้ยนของสีของภาพที่ได้ผ่านกระบวนการลดคุณภาพในภาพประกอบที่ 2-41 แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 แสดงค่าจากการวัดการประเมินด้วยวิธี QSSIM ของภาพที่ลดคุณภาพเทียบกับภาพต้นฉบับ

	2-42 (ข)	2-42 (ค)	2-42 (ง)	2-42 (จ)	2-42 (ฉ)	2-42 (ช)
QSSIM	0.8620	0.8037	0.7547	0.6518	0.5824	0.5323

ค่า QSSIM ที่วัดได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ซึ่งถ้าในกรณีที่ค่าที่วัดได้มีค่าเข้าใกล้ 1 นั้นจะแสดงว่าภาพนั้นมีคุณภาพที่ดี

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2007 Sathit Intajag และคณะ (2008) ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา โดยการวิเคราะห์ฮิสโทแกรม ของภาพและใช้เทคนิคพีชชีเซตในการหาค่าทรซโฮสต์ แบ่งช่วงของฮิสโทแกรม จากนั้นได้พิจารณาค่าความสว่างที่อยู่ในแต่ละช่วงของฮิสโทแกรม ปรับปรุงโดยใช้วิธีการของ S-function ในวิธีการของ S-function นั้นจะมีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของข้อมูลภาพแต่ละภาพ เพื่อนำมาเป็นตำแหน่ง Crossover สำหรับปรับภาพให้มีความคมชัดตามลักษณะของข้อมูลภาพนำเข้า

ในปี ค.ศ. 2011 Saikat Kumar Shome และคณะ (2011) ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตาของผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน โดยใช้วิธีการ Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพในเชิงพื้นที่เพื่อให้ได้รายละเอียดของข้อมูลภาพที่มีความคมชัดขึ้น ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพนั้นจะแบ่งภาพถ่ายจอตาออกเป็นขนาด 2×2 ส่วน ภาพที่ได้แบ่งออกมานั้นจะประมวลผลด้วยวิธี Histogram Equalization แล้วนำมา

รวมเป็นภาพเดียวกัน จากนั้นใช้ตัวกรองสัญญาณแบบมัธยฐาน (Median Filter) เพื่อที่จะทำให้ภาพผลลัพธ์มีความนุ่มนวลขึ้น

ในปี ค.ศ. 2013 Agung W.Setiawan และคณะ (2013) ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา เพื่อที่จะมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มความคมชัดของข้อมูลภาพ เช่น เส้นเลือดภายในจอตา (Blood vessel) โดยใช้วิธีการ Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization ในการปรับปรุงนั้นจะปรับปรุงในโมเดลสี RGB ซึ่งประกอบด้วย 3 แบนด์ คือ แบนด์สีแดง แบนด์สีเขียว และแบนด์สีน้ำเงิน จากนั้นเลือกปรับปรุงเฉพาะแบนด์สีเขียวเพียงแบนด์เดียว โดยยังคงค่าความสว่างของแบนด์สีแดง และสีน้ำเงินไว้ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และต่อมาทำการรวมผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุง โดยรวมกับค่าแบนด์สีแดง และสีน้ำเงิน เพื่อแสดงผลเป็นภาพผลลัพธ์

2.11 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎี หลักการ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในเรื่องของการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตาโดยใช้วิธีการ Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization และวิธีการอื่นๆ ในบทถัดไปจะนำเสนอในส่วนของการวิเคราะห์ ออกแบบและพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้การปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา

บทที่ 3

การวิเคราะห์ออกแบบและพัฒนา

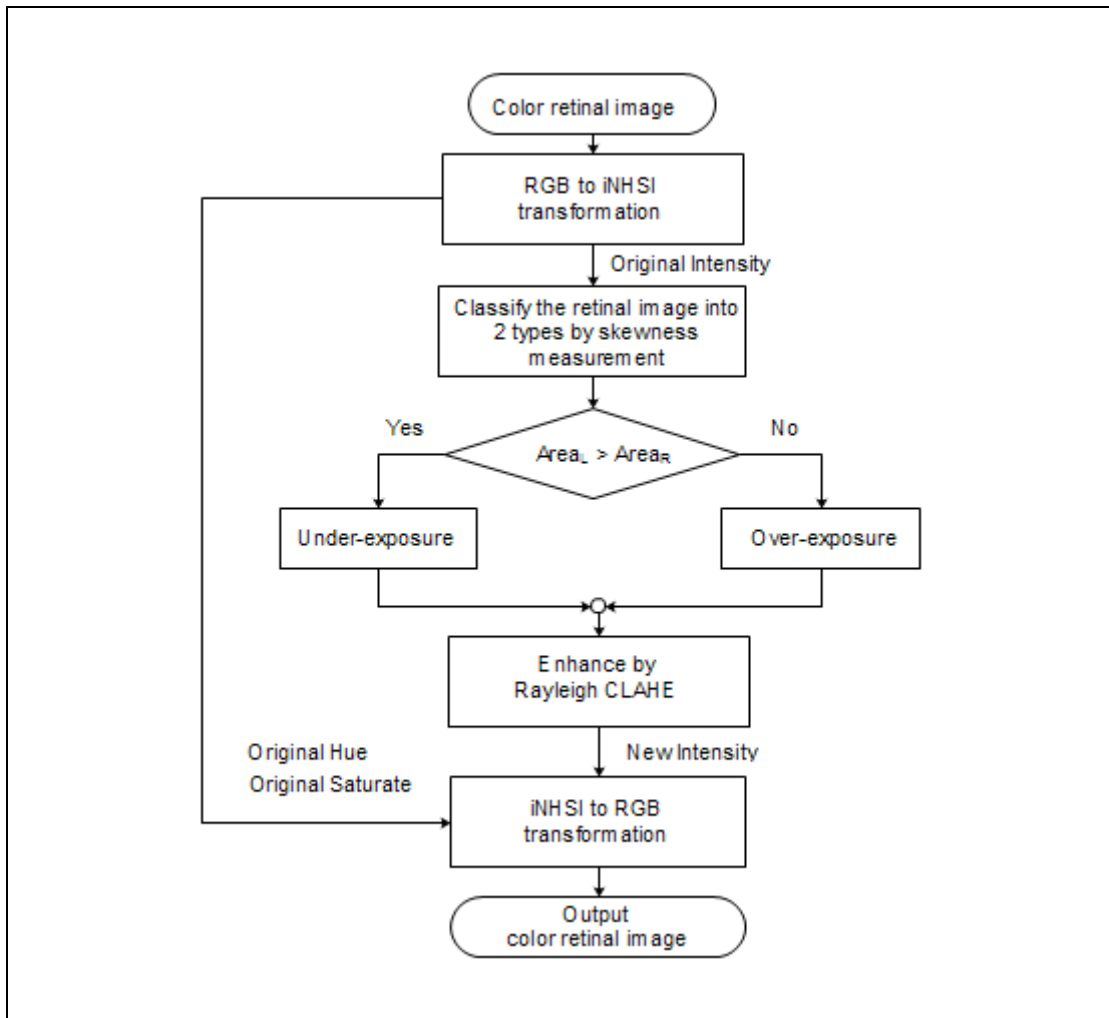
3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพสี โดยข้อมูลภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพคือภาพถ่ายจอตา โดยจะปรับปรุงภาพสีของจอตาให้ภาพมีความคมชัดและแสดงรายละเอียดของภาพให้มีความชัดเจน เพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์โรคต่างๆที่เกิดขึ้นภายในจอตาได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น ภาพที่ได้จากการปรับปรุงจะต้องคงค่าสีเดิมไว้ เนื่องจากสีของจอตาจะเป็นตัวบ่งชี้อย่างหนึ่งในการวินิจฉัยโรคโรคต่างๆ เช่น ผู้ป่วยโรคเบาหวานที่มีอาการไขมันขึ้นจอตา จะปรากฏต่อมไขมันสีเหลืองภายในจอตา และผู้ป่วยโรคจอตาเสื่อม เป็นต้น

การปรับปรุงภาพสีของจอตา ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนที่ 1 การแปลงจากระบบสี RGB ไปเป็นระบบสี iNHSI ขั้นตอนที่ 2 การจำแนกลักษณะของภาพออกเป็น 2 ประเภท คือ Under-exposure และ Over-exposure เพื่อใช้ในการกำหนดค่าตัวแปร *Clip – limit* และค่าตัวแปร α ในการปรับปรุงคุณภาพ ขั้นตอนที่ 3 การปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตาโดยใช้วิธีการ Rayleigh Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization ขั้นตอนที่ 4 การแปลงจากระบบสี iNHSI ไปเป็นระบบสี RGB เพื่อแสดงผล ขั้นตอนวิธีการของการปรับปรุงภาพสีจอตาได้แสดงไว้ ดังภาพประกอบที่ 3-1

3.2 การแปลงจากระบบสี RGB ไปเป็นระบบสี iNHSI

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของภาพสีจอตา ซึ่งเป็นภาพสี RGB โดยจะทำการปรับปรุงในระบบสี iNHSI ที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบ คือ เฉดสี (Hue : H) ค่าความอิ่มตัวของสี (Saturation : S) และ ค่าความสว่าง (Intensity : I) ในขั้นตอนแรกเริ่มจะต้องทำการแปลงค่าสีจากระบบสี RGB ให้มาอยู่ในระบบสี iNHSI โดยสมการการแปลงค่าสี ในส่วนนี้ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.21) – (2.23) การปรับปรุงคุณภาพจะใช้การปรับเฉพาะค่าความสว่าง I โดยยังคงค่าเฉดสี H และค่าความอิ่มตัวของสี S ไว้

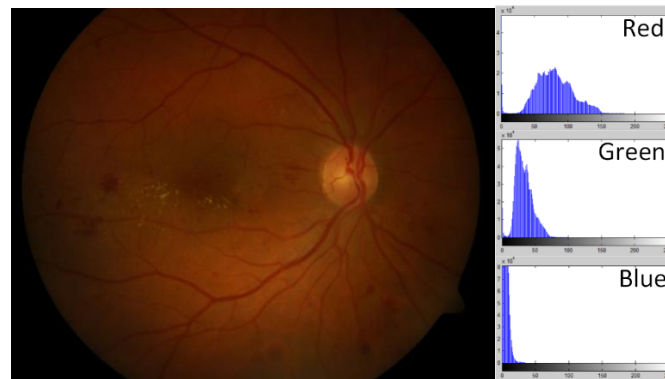


ภาพประกอบที่ 3-1 แสดงผังการทำงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ

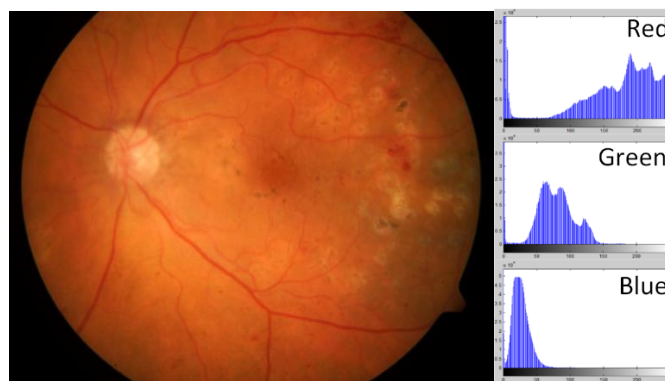
3.3 ขั้นตอนการจำแนกลักษณะของภาพถ่ายจอตา

อุปกรณ์ถ่ายภาพส่วนใหญ่จะมีเซ็นเซอร์ที่เป็นตัวรับแสงหรืออุปกรณ์ที่บังคับให้แสงผ่านเลนส์มากหรือน้อย โดยใช้แผ่นกลีบโลหะซึ่งติดตั้งอยู่ในตัวเลนส์เป็นการกำหนดปริมาณแสงผ่านเลนส์ได้มากหรือน้อย โดยวิธีการเปิดรูเล็กสุด เช่น $f/22$ และค่อยๆ ใหญ่ขึ้นตามลำดับจนกระทั่งเปิดเต็มที่ เช่น $f/1.4$ ในกรณีที่เซ็นเซอร์รับแสงนั้น ได้รับแสงในปริมาณที่น้อยจะทำให้ภาพที่ได้มีดีจึงทำให้รายละเอียดของภาพปรากฏไม่ชัดเจน ซึ่งในกรณีที่ภาพได้รับแสงน้อยจะจัดให้อยู่ในกลุ่ม Under-Exposure ดังภาพประกอบที่ 3-2 (ก) ในทำนองเดียวกันถ้าในกรณีที่เซ็นเซอร์รับแสงนั้น ได้รับแสงในปริมาณมาก จะทำให้ภาพนั้นมีความสว่างมากและด้วยปริมาณแสงที่ปรากฏขึ้นมามากในภาพมาก ก็จะทำให้มองเห็นรายละเอียดของภาพไม่ชัดเจน ซึ่งจะจัดให้ภาพเหล่านั้นอยู่

ในกลุ่ม Over-exposure ค้างภาพประกอบที่ 3-2 (ข) ภาพที่จัดอยู่ใน 2 ประเภทนี้ จะมีความคมชัดค่อนข้างต่ำและแสดงรายละเอียดของภาพออกมาได้ไม่ชัดเจน



(ก) Under-exposure



(ข) Over-exposure

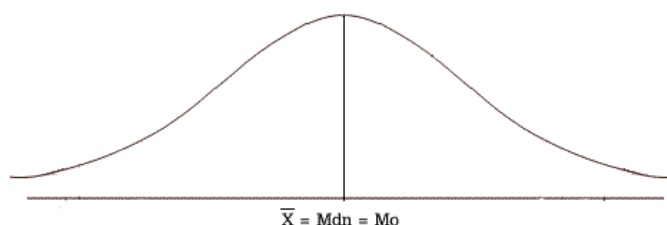
ภาพประกอบที่ 3-2 ภาพ Under-exposure และภาพ Over-exposure

ในการจำแนกภาพถ่ายจอตาที่มีลักษณะเป็น Under-exposure หรือมีลักษณะเป็น Over-exposure นั้น จะจำแนกจากการวิเคราะห์ค่าความสว่าง (Intensity : I) โดยจะใช้การวิเคราะห์ความเบ้ (Skewness) ของฮิสโทแกรม

3.3.1 ความเบ้ (Skewness)

การแจกแจงแบบปกติ ข้อมูลจะมีการแจกแจงลักษณะสมมาตรเป็นรูประฆังคว่ำ หรือเรียกกันว่าโค้งปกติ จะมีค่าเฉลี่ย (\bar{X}) มัชฌิมาน (*Median* : Mdn) และฐานนิยม (*Mode* : Mo)

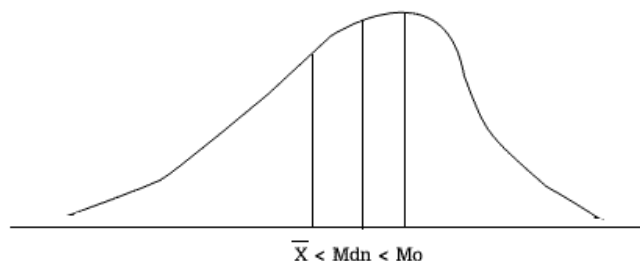
มีค่าเท่ากัน ดังภาพประกอบที่ 3-3 แต่ถ้าข้อมูลไม่สมมาตรก็อาจเป็น โคนึ่งที่มีลักษณะเบ้ซ้าย เบ้ขวา ซึ่งแต่ละลักษณะก็จะมีพื้นที่ โคนึ่งที่มีความหมายต่างกัน สามารถวัดความเบ้ของข้อมูลได้



ภาพประกอบที่ 3-3 โคนึ่งปกติ

1) โคนึ่งที่มีลักษณะเบ้ซ้าย

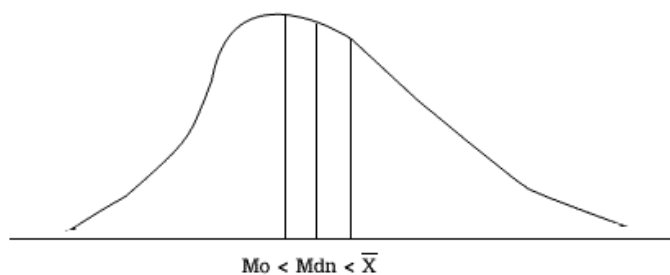
พื้นที่ใต้โคนึ่งทางด้านซ้ายของค่าเฉลี่ย จะมีพื้นที่น้อยกว่าพื้นที่ใต้ โคนึ่งทางด้านขวาของค่าเฉลี่ย ดังภาพประกอบที่ 3-4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแจกแจงไปทางค่าไปความสว่างที่มากนั่นเอง



ภาพประกอบที่ 3-4 โคนึ่งที่มีลักษณะเบ้ซ้าย

2) โคนึ่งที่มีลักษณะเบ้ขวา

พื้นที่ใต้โคนึ่งทางด้านซ้ายของค่าเฉลี่ย จะมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่ใต้ โคนึ่งทางด้านขวาของค่าเฉลี่ย ดังภาพประกอบที่ 3-5 จะเห็นได้ว่าการแจกแจงข้อมูลของค่า ความสว่างส่วนใหญ่ไปทางค่าความสว่างที่น้อย



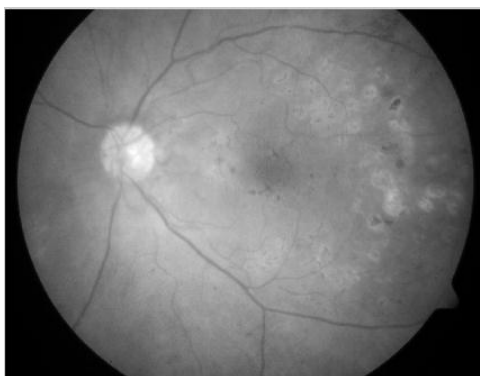
ภาพประกอบที่ 3-5 โค้งที่มีลักษณะเบ้ขวา

3.3.2 การวัดความเบ้ (Skewness measurement)

การวัดความเบ้ของค่าความสว่างข้อมูลภาพถ่ายจอตา นั้น จะใช้วิธีการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของฮิสโทแกรมค่าความสว่าง โดยการคำนวณจากค่าระดับความสว่าง ตามสมการที่ (2.22) ซึ่งเป็นภาพระดับค่าความสว่างของภาพประกอบที่ 3-2(ก) และ (ข) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-6(ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ภาพสีเทา Under-exposure



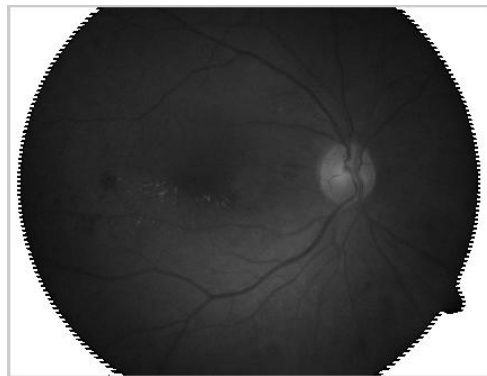
(ข) ภาพสีเทา Over-exposure

ภาพประกอบที่ 3-6 แสดงภาพสีเทา Under-exposure และ Over-exposure

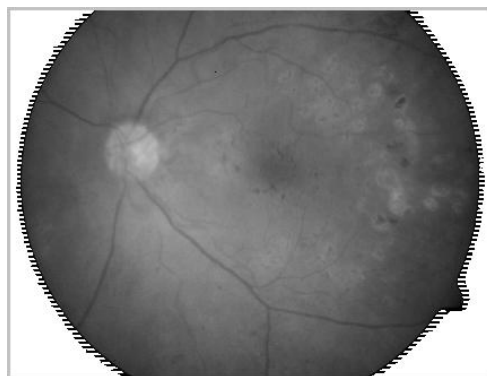
การจำแนกความสว่างของภาพถ่ายจอตา นั้น จะจำแนกโดยการตัดข้อมูลภาพใน ส่วนของพื้นหลังออก และเลือกเฉพาะข้อมูลภาพที่เป็นส่วนของจอตา ที่นำมาใช้ในการคำนวณ เพื่อที่จะกำหนด Under-exposure หรือ Over-exposure ของภาพถ่ายจอตา ซึ่งจะคำนวณได้ตาม ขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

- นำภาพถ่ายจอตามาตัดส่วนที่เป็นพื้นหลังของภาพออกโดยใช้วิธีการของ Otsu (Otsu, 1979) จะเหลือข้อมูลของจอตา เมื่อนำภาพระดับค่าความสว่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 3-6 (ก) และ (ข) มาดึงเอาเฉพาะข้อมูลจอตามาวิเคราะห์หาค่าความเบ้ ก็จะได้ข้อมูลเฉพาะส่วนที่เราสนใจ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-7



(ก) ส่วนของจอตาของภาพสีเทา Under-exposure



(ข) ส่วนของจอตาของภาพสีเทา Over-exposure

ภาพประกอบที่ 3-7 แสดงส่วนของจอตาของภาพสีเทา Under-exposure และ Over-exposure

ขั้นตอนที่ 2

- เมื่อกำหนดให้พื้นที่ที่เราสนใจ ซึ่งเป็นค่าความสว่างของจอตาทั้งหมดอยู่ใน A แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่าความสว่างในพื้นที่นี้โดยใช้ฮิสโทแกรม ก็จะได้ค่า μ_A ดังสมการที่ (3.1) ค่าความสว่างของจุดภาพที่เป็นสมาชิกในพื้นที่ของจอตาทั้งหมด N จุดภาพ ซึ่งแทนด้วยฮิสโทแกรม $A(k) = n_k$ โดยที่ k คือระดับค่าความสว่างในช่วง $[0, L - 1]$ โดยที่ L เป็นจำนวนระดับค่าความสว่างทั้งหมด และ n_k คือจำนวนความถี่สะสมของจุดภาพที่ระดับความสว่างที่ k

$$\mu_A = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} (k \times n_k)}{N} \quad (3.1)$$

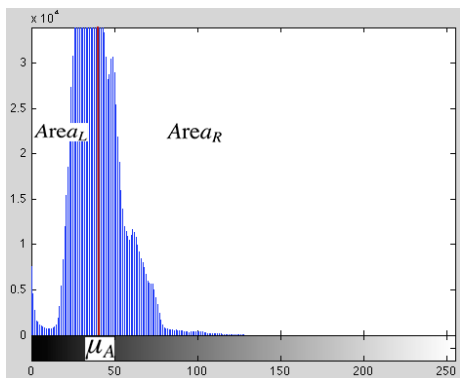
ขั้นตอนที่ 3

- วัดความเบ้ของข้อมูลด้วยการพิจารณาจำนวนข้อมูลที่อยู่ในส่วนใดโดยใช้ค่าเฉลี่ย μ_A เป็นจุดแบ่งฮิสโทแกรมออกเป็น 2 ส่วน คือ จำนวนค่าความสว่างที่อยู่ทางซ้าย ที่มีค่าความสว่างน้อยกว่าค่า μ_A และ ส่วนของค่าความสว่างที่อยู่ทางขวา ที่มีค่าความสว่างมากกว่าค่า μ_A เพื่อที่คำนวณพื้นที่ใต้กราฟ $Area_L$ และ $Area_R$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) ตามลำดับ

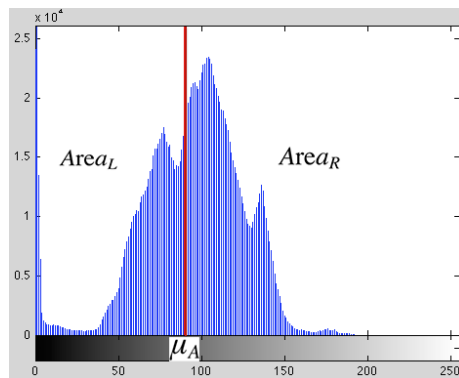
$$Area_L = \sum_{k=0}^{\mu_A} \frac{n_k}{N} \quad (3.2)$$

$$Area_R = \sum_{k=\mu_A+1}^{L-1} \frac{n_k}{N} \quad (3.3)$$

การประเมินความเบ้ของภาพ โดยการเปรียบเทียบจำนวนข้อมูลค่าความสว่างที่อยู่ในพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง $Area_L$ และ $Area_R$ ถ้าค่าของ $Area_L$ มีค่ามากกว่าค่าของ $Area_R$ แสดงว่าภาพนั้นเป็น Under-exposure คือค่าความสว่างของภาพส่วนใหญ่มีค่าต่ำ แต่ถ้าค่าของ $Area_L$ มีค่าน้อยกว่าค่าของ $Area_R$ แสดงว่าภาพนั้นเป็น Over-exposure คือมีค่าความสว่างของภาพส่วนใหญ่มีค่าสูง การวัดความเบ้ทั้งสองกรณีได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-8 (ก) และ 3-8 (ข) ซึ่งเป็นข้อมูลภาพจอตาที่ถ่ายในปริมาณแสงที่น้อยและมากเกินไป ที่ประเมินจากข้อมูลภาพที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-7 (ก) และ 3-7 (ข) ตามลำดับ สำหรับรายละเอียดของการประเมินค่าความเบ้ของภาพจอตาได้แสดงไว้ในตัวอย่างต่อไป



(ก) แสดงสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ
 $Area_L > Area_R$



(ข) แสดงสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ
 $Area_L < Area_R$

ภาพประกอบที่ 3-8 แสดงสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ

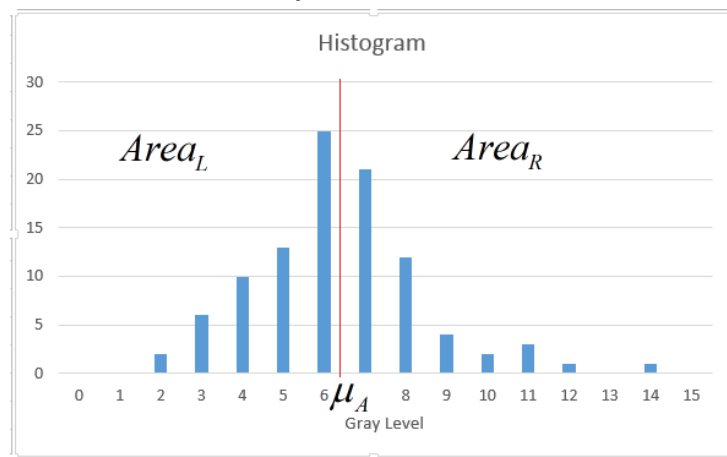
ตัวอย่างการคำนวณ

การวัดความเบ้เพื่อกำหนดว่าภาพใดเป็น Under-exposure หรือ Over-exposure นั้น จะต้องคำนวณจากการกระจายของค่าความสว่างของภาพจอตา จากข้อมูลตัวอย่างที่แสดงในภาพประกอบที่ 3-9 ที่ได้ผ่านกระบวนการตัดส่วนของจุดภาพที่เป็นพื้นหลัง ของภาพถ่ายจอตาดอก โดยใช้วิธีการหาค่าพิสัยแบ่งเทรซโซลด์ในขั้นตอนวิธีของ Otsu จะได้ค่าความสว่างของจุดภาพที่เป็นสมาชิกภายในพื้นที่ของจอตา จากตัวอย่าง กำหนดให้ข้อมูลภาพมีขนาด 4 บิต ทำให้กำหนดระดับค่าความสว่างได้ $2^4 = 16$ มีค่าความเข้มอยู่ในช่วง 0 – 15

	11	4	5	6	6	6	5	3	11	
	3	5	6	6	6	6	6	5	2	
10	4	6	7	7	7	7	7	6	3	11
8	4	8	9	8	7	6	7	6	4	7
7	5	8	9	8	6	5	6	6	4	7
7	5	7	9	8	8	7	6	6	4	7
10	4	7	8	8	8	8	7	5	3	9
14	3	6	7	8	7	7	7	5	2	12
	7	4	6	6	6	6	5	3	6	
		6	4	5	5	5	4	6		

ภาพประกอบที่ 3-9 แสดงข้อมูลค่าความสว่างของจุดภาพภายในพื้นที่ของจอตา

จากภาพประกอบที่ 3-9 จะเห็นว่าสมาชิกในเซต A ที่ประกอบไปด้วยค่าความสว่างของจุดภาพภายในพื้นที่ของจอตา มีจำนวนเท่ากับ 100 จุดภาพ เมื่อนำค่าความสว่างมาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อหาค่า μ_A ตามสมการที่ (3.1) จะได้ค่า $\mu_A = 6.35$ และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลความสว่างของจุดภาพในเซต A จะได้การกระจายของข้อมูล ดังภาพประกอบที่ 3-10



ภาพประกอบที่ 3-10 แสดงฮิสโทแกรมของค่าความสว่างที่เป็นสมาชิกภายในเซต A

โดยพื้นที่ทางด้านซ้ายของค่า μ_A หรือ $Area_L$ ที่คำนวณตามสมการที่ (3.2)

$$\begin{aligned} Area_L &= \frac{2}{100} + \frac{6}{100} + \frac{10}{100} + \frac{13}{100} + \frac{25}{100} \\ &= 0.02 + 0.06 + 0.1 + 0.13 + 0.25 \\ &= 0.56 \end{aligned}$$

โดยพื้นที่ทางด้านขวาของค่า μ_A หรือ $Area_R$ ที่คำนวณตามสมการที่ (3.2)

$$\begin{aligned} Area_R &= \frac{21}{100} + \frac{12}{100} + \frac{4}{100} + \frac{2}{100} + \frac{3}{100} + \frac{1}{100} + \frac{1}{100} \\ &= 0.21 + 0.12 + 0.04 + 0.02 + 0.03 + 0.01 + 0.01 \\ &= 0.44 \end{aligned}$$

จากข้อมูลภาพตัวอย่างจะเห็นว่า $Area_L = 0.56$ มีค่ามากกว่า $Area_R = 0.44$ สรุปได้ว่าภาพตัวอย่างนี้มีลักษณะเป็น Under-exposure

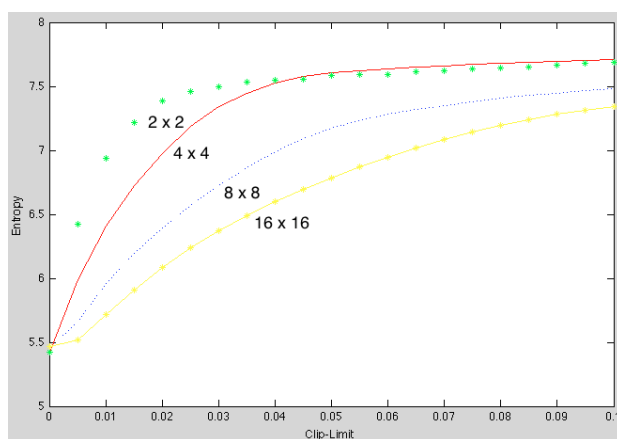
3.4 Rayleigh Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization (Rayleigh CLAHE)

เมื่อกำหนดได้ว่าภาพจอตาที่จะทำการปรับปรุงเป็นภาพ Under-exposure และ Over-exposure ได้แล้ว ก็จะนำมาเป็นเงื่อนไขในการกำหนดตัวแปรสำหรับการปรับปรุงภาพด้วยวิธี Rayleigh CLAHE ซึ่งประกอบด้วย 2 ตัวแปร คือ ค่า $Clip - limit$ และค่า α ซึ่งค่าตัวแปร 2 ค่านี้จะ

มีผลต่อลักษณะของภาพผลลัพธ์ โดยค่า *Clip – limit* นั้นจะเป็นตัวแปรที่กำหนดการเกิด Over-enhancement ซึ่งในวิธีการ CLAHE จะมีการจำกัดการขยายตัวของสัญญาณรบกวน ภายในภาพโดยการกำหนดค่า *Clip – limit* เพื่อเป็นค่าเทรชโฮลด์ ในการตัดฮิสโทแกรม อย่างไรก็ตามค่า *Clip – limit* นั้นจะส่งผลให้ภาพผลลัพธ์ดูนุ่มนวลขึ้นหรือภาพผลลัพธ์มีความคมชัดขึ้นก็ขึ้นอยู่กับระดับค่า *Clip – limit* ที่ผู้ใช้ได้กำหนด

การกำหนดค่าตัวแปร α ในวิธีการ Rayleigh CLAHE จะเป็นการควบคุมลักษณะรูปร่างของ พิงก์ชันถ่ายโอน ของภาพแต่ละพื้นที่ ดังนั้นค่าตัวแปร α เป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพความคมชัดของภาพอย่างมีนัยสำคัญ (Cohen and Whitten, 1988) ค่า α ใช้ในการปรับการกระจายของข้อมูลและสามารถใช้ปีระดับของสัญญาณรบกวนภายในภาพได้เช่นกัน โดยการกำหนดค่าตัวแปร *Clip – limit* และค่า α ในขั้นตอนวิธี Rayleigh CLAHE นั้นได้อธิบายไว้ในส่วนของบทที่ 4 ซึ่งแสดงภาพผลลัพธ์เปรียบเทียบจากการกำหนดค่า *Clip – limit* และค่า α ต่างๆ และการเลือกค่า *Clip – limit* และค่า α ในงานวิจัยนี้

ขั้นตอนวิธีของ CLAHE ขั้นแรกจะทำการแบ่งภาพออกเป็นพื้นที่ย่อย (Region) ที่มีขนาดเท่าๆกัน จำนวนของพื้นที่ จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานกำหนด จากการศึกษาภาพถ่ายจอตา ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของจำนวนพื้นที่ต่อค่าเอนโทรปี (Kim et al., 2013) ดังภาพประกอบที่ 3-11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า *Clip – limit* และ ค่าเอนโทรปี ของการแบ่งภาพขนาด 2×2 , 4×4 , 8×8 และ 16×16



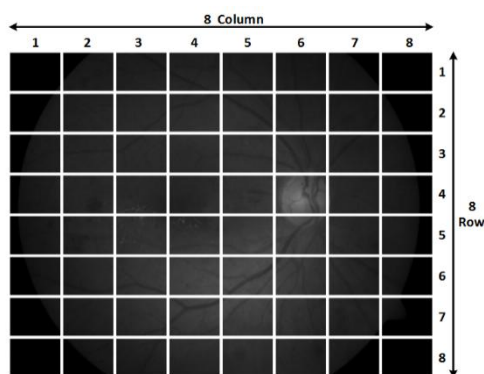
ภาพประกอบที่ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า *Clip – limit* และค่าเอนโทรปี

ในการปรับปรุงภาพถ่ายจอตาในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบ่งภาพออกเป็นขนาด 8×8 เพื่อที่จะยังคงรักษาข้อมูลรายละเอียดของภาพผลลัพธ์ที่ดีกว่าการแบ่งออกเป็นขนาด 2×2 และ

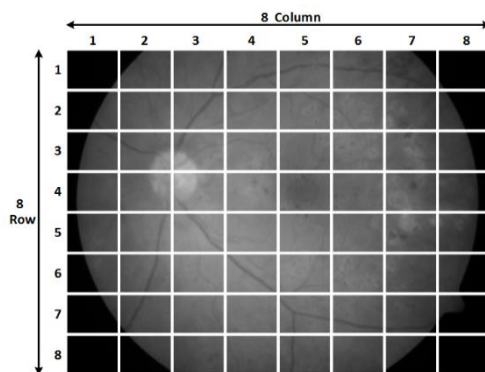
4 × 4 ถึงแม้ว่าจะมีค่าแอนโทรปีที่มีมากกว่าขนาด 8 × 8 ซึ่งการปรับปรุงภาพถ่ายจอตตาโดยวิธีการ Rayleigh CLAHE มีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

- แบ่งภาพถ่ายจอตตาออกเป็นขนาด 8 × 8 ดังภาพประกอบที่ 3-12 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นการแบ่งภาพสี่เทาของภาพประกอบที่ 3-6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ภาพสี่เทามีลักษณะ Under-exposure แบ่งออกเป็นขนาด 8 × 8



(ข) ภาพสี่เทามีลักษณะ Over-exposure แบ่งออกเป็นขนาด 8 × 8

ภาพประกอบที่ 3-12 แสดงการแบ่งภาพสี่เทาออกเป็นขนาด 8 × 8

ขั้นตอนที่ 2

- คำนวณค่าฮิสโทแกรม ของแต่ละพื้นที่

ขั้นตอนที่ 3

- นำฮิสโทแกรม ของแต่ละพื้นที่ มาทำการตัด (Clip Histogram) ด้วยค่า $Clip - limit$ ที่กำหนดโดยผู้ใช้ กฎของการตัดฮิสโทแกรม มีการกำหนดไว้ดังนี้

$$\mathbf{if } H_{region}(i) > N_{clip} \mathbf{ then}$$

$$H_{region_clip}(i) = N_{clip} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{Else if } (H_{region}(i) + N_{avgbin}) > N_{clip} \mathbf{ then}$$

$$H_{region_clip}(i) = N_{clip} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{Else } H_{region_clip}(i) = (H_{region}(i) + N_{avgbin}) \quad (3.6)$$

โดยที่ $H_{region}(i)$ เป็นฮิสโทแกรม ของแต่ละพื้นที่ ที่ตำแหน่งระดับค่าความสว่าง i และ $H_{region_clip}(i)$ เป็นฮิสโทแกรม ของพื้นที่ ที่ได้ทำการตัดแล้ว ส่วน N_{clip} คือค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดฮิสโทแกรม ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.7)

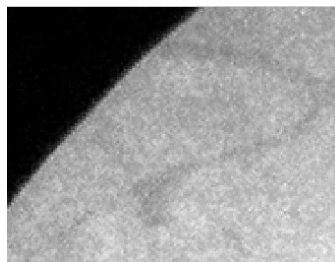
$$N_{clip} = Min_{clip} + round(V_{clip} * (N_{pix} - Min_{clip})) \quad (3.7)$$

โดยที่ V_{clip} เป็นค่า $Clip - limit$ ที่กำหนดโดยผู้ใช้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 สำหรับ N_{pix} คือจำนวนจุดภาพทั้งหมดภายใน Region และ Min_{clip} คือจุดภาพทั้งหมดภายในพื้นที่ต่อระดับค่าความสว่างทั้งหมด N_{bin} ซึ่งค่า Min_{clip} สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.8)

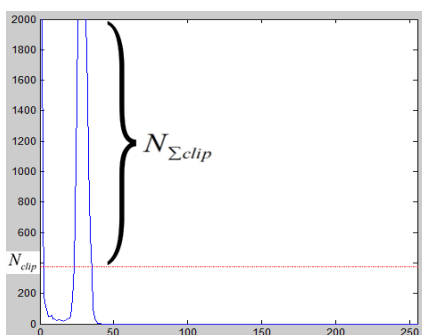
$$Min_{clip} = round\left(\frac{N_{pix}}{N_{bin}}\right) \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) N_{clip} เป็นค่าเทรชโฮลด์ ที่ใช้ในการตัดฮิสโทแกรม ของแต่ละพื้นที่ ดังนั้นความถี่สะสมของจำนวนจุดภาพ ณ ระดับค่าความสว่าง i ที่มีความถี่สะสมสูงกว่าค่า N_{clip} ก็จะถูกตัด แล้วนำไปกระจายให้ค่าความสว่างอันที่มีความถี่สะสมน้อยกว่าค่า N_{clip} เมื่อแทนค่าความถี่สะสมที่มากกว่าค่า N_{clip} ด้วยตัวแปร $N_{\Sigma clip}$ แล้วนำมาเฉลี่ยให้กับค่าความสว่างที่มีความถี่สะสมของจุดภาพน้อยกว่าค่า N_{clip} ก็สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.9) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-13

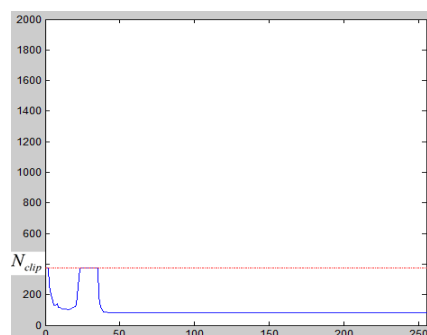
$$N_{avgbin} = \frac{N_{\Sigma clip}}{N_{bin}} \quad (3.9)$$



(ก) พื้นที่ ของภาพประกอบที่ 3-12 (ก) แถวที่ 1 คอลัมน์ที่ 2



(ข) ฮิสโทแกรมของภาพ (ก)



(ค) ฮิสโทแกรมที่ผ่านกระบวนการตัด

ภาพประกอบที่ 3-13 แสดงกระบวนการตัดฮิสโทแกรม ของแต่ละพื้นที่ กำหนด $V_{clip}=0.01$

ขั้นตอนที่ 4

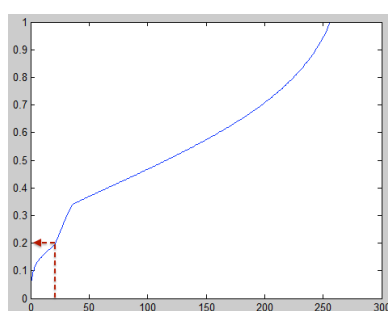
- ค่าความสว่างของแต่ละพื้นที่ย่อยหลังจากที่ตัดค่าฮิสโทแกรมแล้ว จะถูกนำมาแปลงด้วยการแจกแจงแบบ Rayleigh โดยมีฟังก์ชันการแปลงที่กำหนดไว้ดังสมการที่ (3.10)

$$y = y_{min} + [2\alpha^2 \left\{ \frac{1}{1 - P_{input}(x)} \right\}]^{1/2} \quad (3.10)$$

โดยที่ y คือ ระดับค่าความสว่างใหม่ y_{min} คือ ระดับค่าความสว่างต่ำสุด ในที่นี้กำหนดให้ $y_{min} = 0$ สำหรับ α คือ ตัวแปรควบคุมความชันของฟังก์ชันการแปลงแบบ Rayleigh และ $P_{input}(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของภาพย่อยที่ได้ผ่านการตัดฮิสโทแกรมแล้ว ดังนั้นการคำนวณฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบ Rayleigh ของพื้นที่ของภาพผลลัพธ์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.11) (Pratt, 2007)

$$p(y) = \frac{y - y_{min}}{\alpha^2} \exp \left\{ -\frac{(y - y_{min})^2}{2\alpha^2} \right\} \text{ for } y \geq y_{min} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.10) ที่เป็นการคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของการแจกแจง Rayleigh จะเห็นได้ว่าค่าความสว่างในช่วงต่ำ บริเวณช่วงลูกศรสีแดงของเส้นประในภาพประกอบที่ 3-14 มีความชันมาก ทำให้ค่าความสว่างเดิมในช่วงนี้ที่เป็นพื้นหลัง ที่ได้มาจากค่าความเข้มต่ำๆ ของภาพแบนด์สีน้ำเงินสำหรับภาพจอตาแล้ว ข้อมูลภาพในแบนด์สีน้ำเงินจะถูกบีบให้แคบลง (Hubbard et al., 2008) แต่จากภาพประกอบจะเห็นว่าข้อมูลถูกขยายให้กว้างขึ้น ทำให้ปรากฏสัญญาณรบกวนภายในภาพชัดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการบีบการขยายตัวของสัญญาณรบกวนภายในภาพ ด้วยวิธี Linear contrast stretch ในขั้นตอนที่ 5



ภาพประกอบที่ 3-14 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของภาพประกอบที่ 3-13 (ก) กำหนด $\alpha = 0.4$

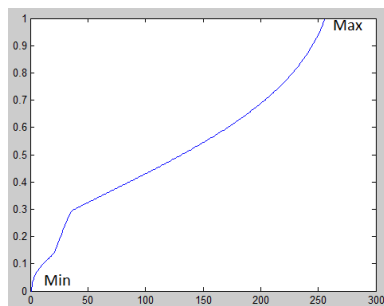
และ $V_{clip}=0.01$

ขั้นตอนที่ 5

- การบีบสัญญาณรบกวน จากผลกระทบดังกล่าวที่เกิดขึ้นจากฟังก์ชันถ่ายโอน ในขั้นตอนที่ 4 ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการลดการกระจายตัวของสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีการ Linear contrast stretch เพื่อปรับสเกลของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยยังคงรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนเดิมไว้ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.12)

$$Z = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \quad (3.12)$$

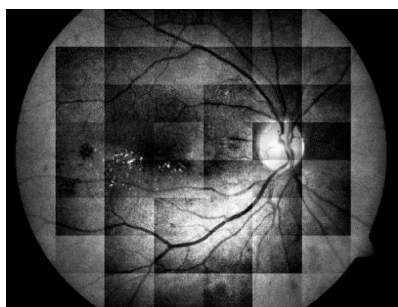
โดยที่ y เป็นค่านำเข้าของฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่ง y_{min} และ y_{max} คือค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของฟังก์ชันถ่ายโอน ภาพประกอบที่ 3-15 แสดง ฟังก์ชันถ่ายโอนในภาพประกอบที่ 3-14 ที่ได้ผ่านกระบวนการสเกลข้อมูลใหม่โดยยังคงรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนเดิมไว้



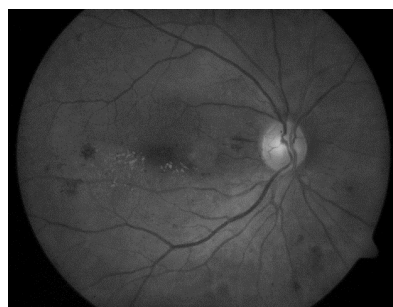
ภาพประกอบที่ 3-15 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนที่ผ่านกระบวนการสเกลจากสมการที่ (3.12)

ขั้นตอนที่ 6

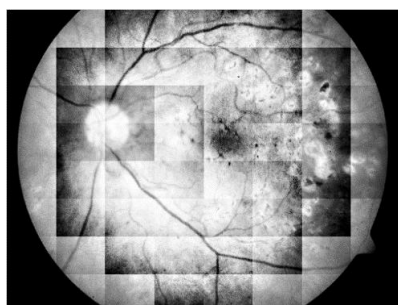
- การรวมผลลัพธ์จากการปรับปรุงข้อมูลภาพย่อยในแต่ละพื้นที่ จากค่าความสว่างที่ปรับปรุงแล้วของแต่ละพื้นที่ นำมารวมเข้าด้วยกันเป็นข้อมูลภาพใหม่ แต่ผลจากการปรับปรุงแต่ละพื้นที่ที่อิสระจากกันทำให้ภาพต่อกันไม่สนิท เพราะความสว่างในแต่ละพื้นที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องแก้ไขข้อมูลให้เป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยวิธีการอินเทอร์โพลेशन (Interpolation) ในที่นี้ ได้ใช้วิธีการอินเทอร์โพลेशनแบบ bilinear เพื่อให้ได้ภาพค่าความสว่างใหม่ ดังภาพประกอบที่ 3-16 แสดงการเปรียบเทียบภาพก่อนและหลังอินเทอร์โพลेशन



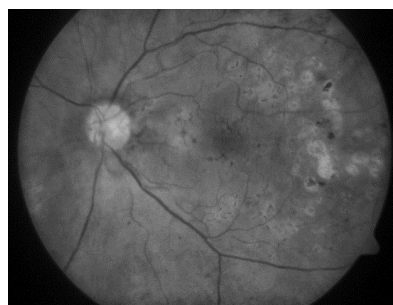
(ก) ภาพผลลัพธ์ Under-exposure
ก่อนอินเทอร์โพลेशन



(ข) ภาพผลลัพธ์ Under-exposure
หลังอินเทอร์โพลेशन



(ค) ภาพผลลัพธ์ Over-exposure
ก่อนอินเทอร์โพลेशन

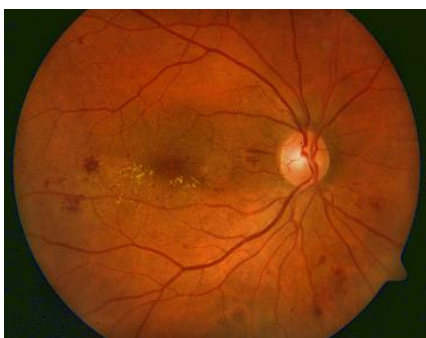


(ง) ภาพผลลัพธ์ Over-exposure
หลังอินเทอร์โพลेशन

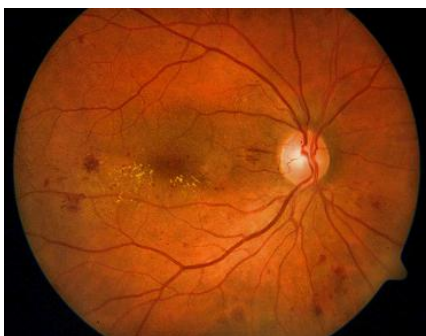
ภาพประกอบที่ 3-16 แสดงภาพผลลัพธ์ ก่อนและหลังอินเทอร์โพลेशन

3.5 การแสดงภาพหลังจากการปรับปรุงแล้ว

ภาพระดับค่าความสว่างที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว I' จะมีคอนทราสต์ที่ดี ซึ่งสามารถเห็นรายละเอียดต่างๆ ในภาพได้ชัดเจน ภาพจอตาที่มีคอนทราสต์ที่ดีจะต้องเห็นเส้นเลือดชัดเจน เห็นบริเวณรอยร้าวของเส้นเลือดหรือรอยร้าวของไขมัน ดังนั้นเมื่อได้ค่า I' ที่มีคอนทราสต์ที่ดี และนำไปรวมกับค่าเฉลี่ย H และค่าความอิ่มตัวสี S และแปลงกลับเป็นข้อมูลภาพ RGB ก็จะได้ภาพสีจอตา ที่นำไปวินิจฉัยโรคได้ดี ดังภาพประกอบที่ 3-17 และ ภาพประกอบที่ 3-18 แสดงเปรียบเทียบภาพ Under-exposure และ Over-exposure หลังจากปรับปรุงด้วยสมการที่ (3.11) และหลังจากสเกลข้อมูลด้วยสมการที่ (3.12)



(ก) ภาพสี RGB มีลักษณะ Under-exposure จากการปรับปรุงด้วยสมการที่ (3.10)



(ข) ภาพสี Under-exposure จากการปรับปรุงด้วยสมการที่ (3.10) และสเกลข้อมูลด้วยสมการที่ (3.12)

ภาพประกอบที่ 3-17 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ภาพ Under-exposure จากสมการที่ (3.10) และสเกลข้อมูลด้วยสมการที่ (3.12)



(ก) ภาพสี RGB มีลักษณะ Over-exposure จากการปรับปรุงด้วยสมการที่ (3.10)



(ข) ภาพสี Over-exposure จากการปรับปรุงด้วยสมการที่ (3.11) และสเกลข้อมูลด้วยสมการที่ (3.12)

ภาพประกอบที่ 3-18 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ภาพ Over-exposure จากสมการที่ (3.10) และสเกลข้อมูลด้วยสมการที่ (3.12)

3.6 สรุป

จากการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพสีจอตา ก่อนทำการปรับปรุงภาพถ่ายจอตา ข้อมูลภาพถูกนำมาวิเคราะห์ว่าภาพนั้นๆ มีระดับการส่องสว่างที่เหมาะสมหรือไม่ โดยจำแนกภาพที่มีค่าการส่องสว่างที่ไม่เหมาะสมออกเป็น 2 ลักษณะ คือ Under-exposure และ Over-exposure เพื่อนำไปสู่การกำหนดค่าตัวแปร *Clip – limit* และตัวแปร α ในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพ สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงภาพ เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพในเชิงพื้นที่ (Local Enhancement) ด้วยขั้นตอนวิธี Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization ซึ่งได้ใช้การแจกแจง Rayleigh ในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอน และทำการสเกลฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อบีบสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ Linear Contrast Stretch และเพิ่มความคมชัดในส่วน of รายละเอียดภายในภาพ โดยยังคงข้อมูลสีเดิมของภาพไว้

บทที่ 4

ผลการทดลองและบทวิจารณ์

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการปรับปรุงภาพสี โดยการวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา ในการปรับปรุงคุณภาพจะเพิ่มคอนทราสต์ให้กับภาพถ่ายจอตาที่มีลักษณะคอนทราสต์ต่ำ และจะปรับคอนทราสต์ให้เหมาะสมสำหรับภาพที่มีคอนทราสต์สูงเกินไป เพื่อให้ภาพที่ผ่านการปรับปรุงแล้วมีคอนทราสต์ที่เหมาะสม มีการแสดงรายละเอียดของข้อมูลในภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ในส่วนแรกจะกล่าวถึง ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง ต่อมาจะกล่าวถึงวิธีการจำแนกภาพตามความสว่าง ออกเป็น 2 ลักษณะคือ Under-exposure และ Over-exposure เพื่อกำหนดค่าตัวแปร *Clip – limit* และค่าตัวแปร α ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตาโดยวิธีการ Rayleigh CLAHE และหลังจากนั้นเป็นการกล่าวถึงการวัด การประเมินประสิทธิภาพและเปรียบเทียบกับวิธีการ HE กับวิธีการ CLAHE ที่ใช้ในการปรับปรุงภาพถ่ายจอตาเฉพาะแบนด์สีเขียว โดยมีรายละเอียดตามลำดับดังต่อไปนี้

4.2 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

จากขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น ได้มีการนำมาทดสอบกับภาพถ่ายจอตาที่ลักษณะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นภาพที่มีความสว่างของแสงมากเกินไปจนทำให้มองไม่เห็นรายละเอียดของภาพ ดังภาพประกอบที่ 4-1 (ก) หรือภาพที่มีความสว่างของแสงน้อยเกินไปจนทำให้รายละเอียดของภาพโดนซ่อนภายใต้สภาพความสว่างที่ไม่เพียงพอ ดังภาพประกอบที่ 4-1 (ข) และรวมทั้งภาพถ่ายจอตาที่มีความปกติ ดังภาพประกอบที่ 4-1 (ค) และภาพถ่ายจอตาของคนที่มีลักษณะเป็นโรคเบาหวาน ดังภาพประกอบที่ 4-1 (ง) (Standard Diabetic Retinopathy Database, 2006) ซึ่งผู้วิจัยได้ทดสอบกับชุดข้อมูลภาพถ่ายจอตา DIARETDB (Standard Diabetic Retinopathy Database, 2006) โดยเป็นชุดข้อมูลภาพถ่ายจอตาที่ใช้ในการตรวจค้นหาและเปรียบเทียบผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานและมีอาการไขมันแสดงในจอตา และชุดข้อมูลภาพถ่ายจอตา STARE (Structured Analysis of the Retina, 1996) เป็นฐานข้อมูลภาพถ่ายจอตาอีกชุดหนึ่ง ที่มีการจำแนกพยาธิสภาพของภาพจอตา



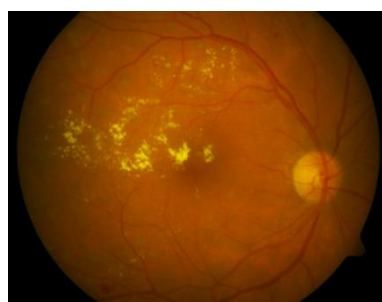
(ก) Over-exposure



(ข) Under-exposure



(ค) Normal eye



(ง) Diabetic retinopathy

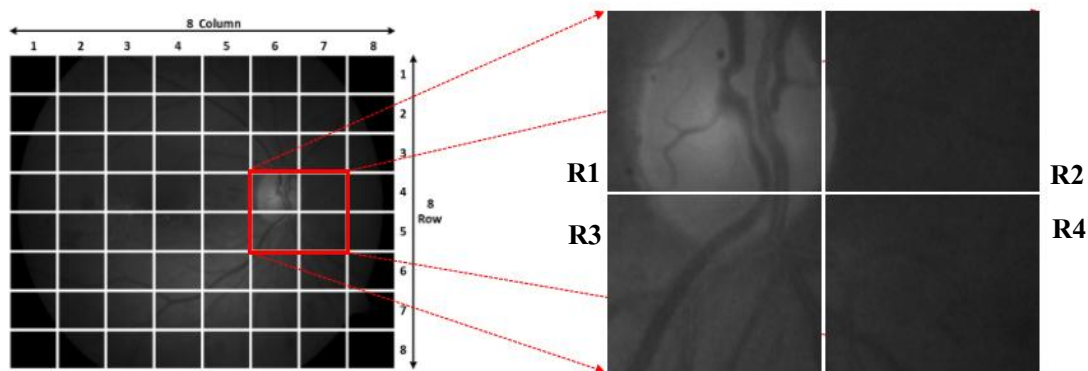
(Structured Analysis of the Retina, 1996) (Standard Diabetic Retinopathy Database, 2006)

ภาพประกอบที่ 4-1 ภาพจอตา

4.3 การกำหนดตัวแปร *Clip – limit* และค่า α ในขั้นตอนวิธี Rayleigh CLAHE

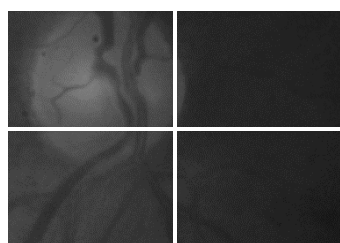
จากขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตาโดยวิธี Rayleigh CLAHE นั้น มีตัวแปร 2 ตัวแปรที่มีความสำคัญในการควบคุมคุณภาพของภาพผลลัพธ์ ซึ่งก็คือ การกำหนดค่าตัวแปร *Clip – limit* และค่าตัวแปร α โดยค่าตัวแปร *Clip – limit* นั้นมีหน้าที่ในการเพิ่มความคมชัดของภาพและลดการกระจายของสัญญาณรบกวนภายในภาพ ซึ่งเป็นการทำให้ภาพนั้น คุมความนุ่มนวลขึ้น *Clip – limit* ที่มีค่าในช่วง 0 ถึง 1 ถูกกำหนดโดยผู้ใช้เพื่อนำไปตัดฮิสโทแกรมของภาพในแต่ละพื้นที่ แล้วนำไปคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อทำการแมปข้อมูลค่าความสว่างเดิมไปยังค่าความสว่างใหม่ โดยค่าเริ่มต้น (Default) *Clip – limit* = 0.01 และ $\alpha = 0.4$ ซึ่งค่า *Clip – limit* ยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าเทรชโฮลด์ ที่ใช้ในการตัดฮิสโทแกรม มีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ข้อมูลจุดภาพที่ถูกตัดออกไปมีจำนวนน้อย ทำให้ค่าความสว่างที่จะนำไปกระจายมีไม่มาก ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนไม่ลู่เข้าสู่การแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform distribution)

ตัวอย่างจากภาพต้นฉบับดังภาพประกอบที่ 4-2 เป็นภาพจอตาที่ได้มีการแบ่งพื้นที่ ออกเป็นขนาด 8×8 เพื่อนำมาปรับปรุงในวิธีการ Rayleigh CLAHE จากตัวอย่าง จะดึงข้อมูลภาพ มา 4 พื้นที่ เพื่อเปรียบเทียบภาพผลลัพธ์จากการกำหนดค่าตัวแปร *Clip - limit* ที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบที่ 4-2 แสดงการแบ่งภาพจอตาออกเป็นขนาด 8×8 และเลือกข้อมูลภาพจอตา 4 พื้นที่

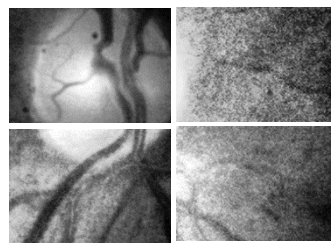
จากภาพประกอบที่ 4-2 ข้อมูลภาพจอตา 4 พื้นที่ ที่เลือกมาประมวลผลด้วยการ ตัดฮิสโทแกรม จากการกำหนดค่า *Clip - limit* ที่เท่ากับ 0.1, 0.01 และ 0.001 ผลลัพธ์แสดงได้ดัง ภาพประกอบที่ 4-3



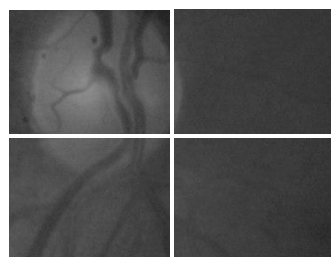
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ค) กำหนด *Clip - limit* = 0.01



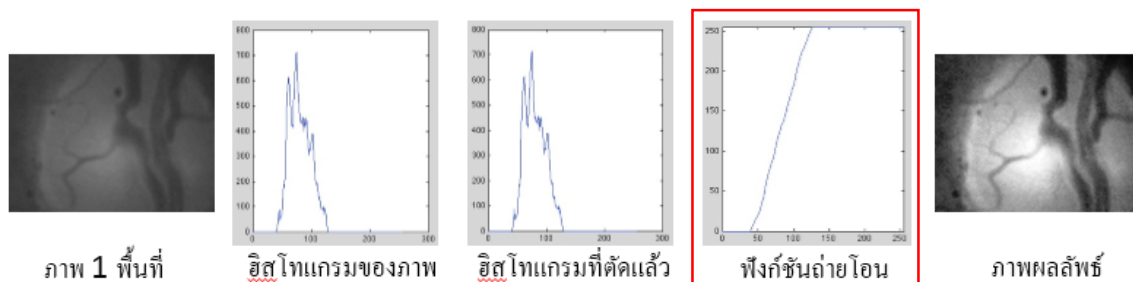
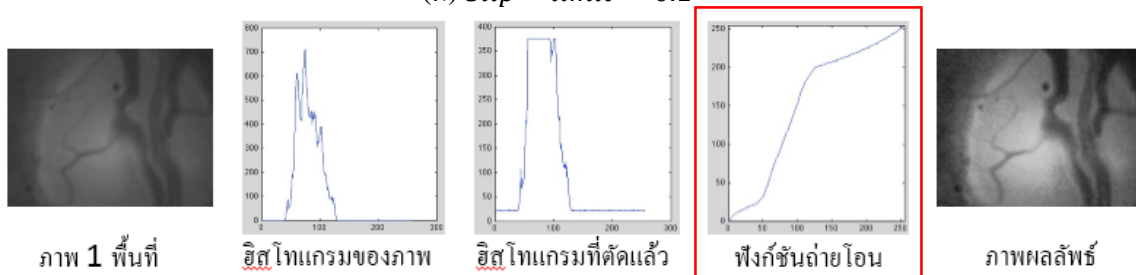
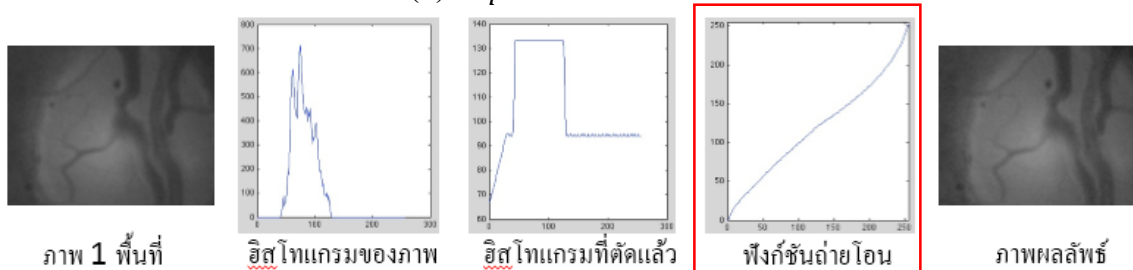
(ข) กำหนด *Clip - limit* = 0.1



(ง) กำหนด *Clip - limit* = 0.001

ภาพประกอบที่ 4-3 แสดงภาพผลลัพธ์จากการกำหนดค่า *Clip - limit* ที่แตกต่างกัน

จากภาพประกอบที่ 4-3 ที่ได้ทำการปรับปรุงค่าความสว่างในวิธีการ Rayleigh CLAHE โดยการกำหนดค่า $Clip - limit$ ที่แตกต่างกัน ทำให้ภาพผลลัพธ์มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ตามลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนที่เปลี่ยนไปตามค่า $Clip - limit$ ดังภาพประกอบที่ 4-4 ที่แสดงลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนจากภาพย่อย R1

(ก) $Clip - limit = 0.1$ (ข) $Clip - limit = 0.01$ (ค) $Clip - limit = 0.001$

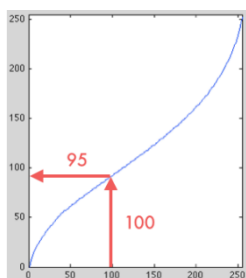
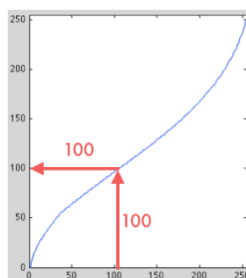
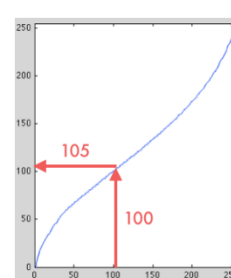
ภาพประกอบที่ 4-4 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอน และเปรียบเทียบภาพผลลัพธ์จากการกำหนดค่า

$$Clip - limit = 0.1, 0.01 \text{ และ } 0.001$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนในภาพประกอบที่ 4-4 ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปตามค่า $Clip - limit$ ภาพ (ก) $Clip - limit = 0.1$ เมื่อคำนวณค่า N_{clip} ตามสมการที่ (3.7) เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดฮิสโทแกรม จะได้ค่า $N_{clip} = 2803$ เป็นค่าเทรชโฮลด์ เมื่อนำมาตัดฮิสโทแกรมของพื้นที่นั้น ไม่มีค่าความถี่สะสมของค่าความสว่างใดมากกว่าค่า N_{clip} ดังนั้นจึงไม่มีการตัดฮิสโทแกรม และเมื่อนำมาคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอน จะมีความชันที่สูงมาก เมื่อแม้ค่าความสว่างจะทำให้

ภาพเกิด Over-enhancement เมื่อลดค่า $Clip - limit = 0.01$ ในภาพ (ข) จะได้ค่า $N_{clip} = 376$ เป็นค่าทรซโฮลด์ เมื่อนำมาตัดฮิสโทแกรมของพื้นที่นั้น ข้อมูลจุดภาพที่ถูกตัดถูกนำไปกระจายให้กับค่าความสว่างที่มีค่าความถี่สะสมน้อยกว่าค่า N_{clip} ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนมีความชันที่ลดลงและมีลักษณะที่ต่อเนื่องกว่าฟังก์ชันถ่ายโอนในภาพ (ก) ทำให้เกิดปัญหา Over-enhancement น้อยลงกว่าภาพ (ก) ในภาพ (ค) เป็นการกำหนดค่า $Clip - limit = 0.001$ จะได้ค่า $N_{clip} = 133$ เป็นค่าทรซโฮลด์ เมื่อนำมาตัดฮิสโทแกรม ข้อมูลจุดภาพที่ถูกตัดมีจำนวนมาก ทำให้ค่าความสว่างที่จะนำไปกระจายมีมากพอ ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนเข้าสู่การแจกแจงแบบเอกรูป และไม่เกิด Over-enhancement ในภาพผลลัพธ์ ทำให้รายละเอียดของภาพผลลัพธ์มีความนุ่มนวล เนื่องจากมีโทนสีมากพอ และทำให้ส่วนที่เป็นพยาธิสภาพ หรือส่วนที่มีความผิดปกติ แตกต่างจากพื้นหลัง ทำให้สังเกตเห็นสิ่งผิดปกติเหล่านี้ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า $Clip - limit = 0.001$

ตัวแปร α มีความสำคัญในการควบคุมลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอน เพื่อนำไปสู่การมีค่าความสว่างเดิมไปยังค่าความสว่างใหม่ ค่าของตัวแปร α นั้นสามารถควบคุมลักษณะของความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน ส่งผลให้ค่าความสว่างใหม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของความชัน จากการจำแนกตามความสว่างของภาพถ่ายจอตตา เป็น 2 ประเภทคือ Under-exposure และ Over-exposure ภาพที่มีลักษณะ Under-exposure จะมีระดับความสว่างของภาพอยู่ในระดับที่ต่ำเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจะต้องเพิ่มค่า α จากค่า 0.4 ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.42 เพื่อเพิ่มระดับความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน และทำให้ภาพสว่างขึ้น สำหรับภาพที่มีลักษณะ Over-exposure จะมีฮิสโทแกรมของค่าความสว่างของภาพ กระจายอยู่ในบริเวณที่ค่าความสว่างที่สูงเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจะต้องลดค่า α จากค่าเริ่มต้น 0.4 ให้มีค่าลดน้อยลง โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.38 เพื่อลดระดับความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน ทำให้ค่าความสว่างเดิมเมื่อมีค่าไปยังฟังก์ชันถ่ายโอน จะมีค่าความสว่างที่ลดน้อยลง ภาพประกอบที่ 4-5 (ก) แสดงฟังก์ชันถ่ายโอน เมื่อกำหนดค่า $\alpha = 0.38, Clip - limit = 0.001$ (ข) แสดงฟังก์ชันถ่ายโอน เมื่อกำหนดค่า $\alpha = 0.40, Clip - limit = 0.001$ (ค) แสดงฟังก์ชันถ่ายโอน เมื่อกำหนดค่า $\alpha = 0.42, Clip - limit = 0.001$

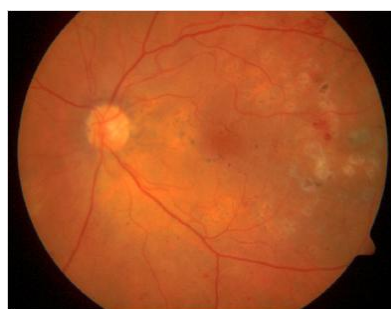
(ก) $\alpha = 0.38$ (ข) $\alpha = 0.40$ (ค) $\alpha = 0.42$

ภาพประกอบที่ 4-5 ฟังก์ชันถ่ายโอนเมื่อกำหนดค่า α ที่ต่างกัน

จากรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน ที่มีความชันเปลี่ยนไปตามค่า α เมื่อเมื่อค่าความสว่างเดิมไปยังค่าความสว่างใหม่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่เห็นในภาพประกอบที่ 4-5 ภาพ (ก) (ข) และ (ค) มีการกำหนดค่า α ที่ต่างกัน จะได้ค่าผลลัพธ์ของค่าความสว่างใหม่ที่แตกต่างกันไป นั่นคือ ภาพ (ก) ที่ระดับค่าความสว่างเดิมเท่ากับ 100 เมื่อกำหนดค่า $\alpha = 0.38$ จะได้ระดับค่าความสว่างใหม่เท่ากับ 95 ภาพ (ข) ที่ระดับค่าความสว่างเดิมเท่ากับ 100 เมื่อกำหนดค่า $\alpha = 0.4$ จะได้ระดับค่าความสว่างใหม่เท่ากับ 100 ภาพ (ค) ที่ระดับค่าความสว่างเดิมเท่ากับ 100 เมื่อกำหนดค่า $\alpha = 0.42$ จะได้ระดับค่าความสว่างใหม่เท่ากับ 105 ดังนั้นสรุปได้ว่าภาพถ่ายจอตาที่จัดอยู่ในประเภท Over-exposure ควรมีการกำหนดค่า α ให้มีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น $\alpha = 0.4$ ไปเป็นค่า $\alpha = 0.38$ ดังภาพประกอบที่ 4-6 แสดงผลลัพธ์จากภาพประกอบที่ 4-1 (ก) เป็นภาพที่จัดอยู่ในประเภท Over-exposure และในทำนองเดียวกันภาพถ่ายจอตาที่ได้จัดอยู่ในประเภท Under-exposure ควรมีการกำหนดค่า α ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น $\alpha = 0.4$ ไปเป็นค่า $\alpha = 0.42$ ดังภาพประกอบที่ 4-7 แสดงผลลัพธ์จากภาพประกอบที่ 4-1 (ข) เป็นภาพที่จัดอยู่ในประเภท Under-exposure



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์

กำหนดค่า $Clip - limit = 0.001$ และ $\alpha = 0.38$

ภาพประกอบที่ 4-6 ผลลัพธ์ภาพ Over-exposure



(ก) ภาพต้นฉบับ



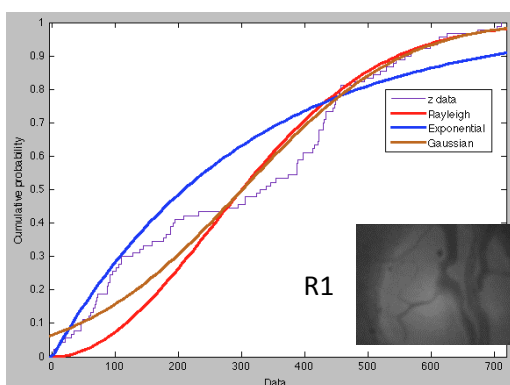
(ข) ภาพผลลัพธ์

กำหนดค่า $Clip - limit = 0.001$ และ $\alpha = 0.42$

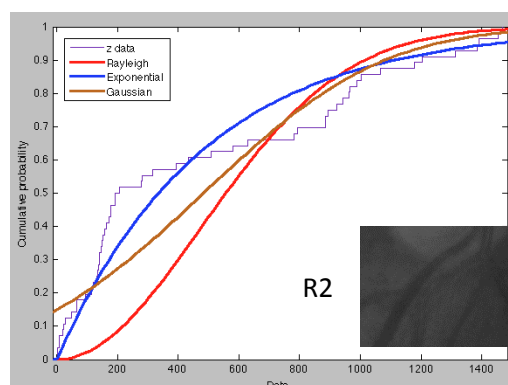
ภาพประกอบที่ 4-7 ผลลัพธ์ภาพ Under-exposure

4.4 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Rayleigh กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Gaussian และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Exponential ในวิธีการ CLAHE

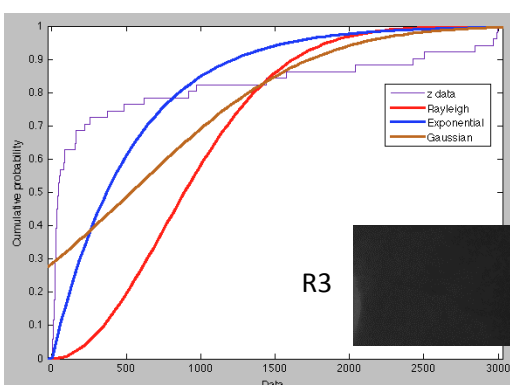
ในขั้นตอนวิธี CLAHE สามารถเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนได้หลายฟังก์ชัน สำหรับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอได้เลือกใช้ Rayleigh ทั้งนี้เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันอื่นๆ เช่น Gaussian และ Exponential แล้ว Rayleigh มีความเหมาะสมที่จะใช้กับภาพจอตามากกว่า ดังตัวอย่างการเลือกรูปแบบกราฟของแต่ละการแจกแจงให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลภาพจอต ในภาพประกอบที่ 4-8 เป็นการเลือกข้อมูลภาพจอตมา 4 พื้นที่ จากภาพประกอบที่ 4-2 จากนั้นแสดงกราฟฟังก์ชันถ่ายโอนของแต่ละการแจกแจง สีแดง คือการแจกแจงแบบ Rayleigh สีน้ำเงิน คือการแจกแจงแบบ Exponential สีน้ำตาล คือการแจกแจงแบบ Gaussian และเส้นหยัก คือค่าความถี่สะสมของข้อมูลภาพย่อย



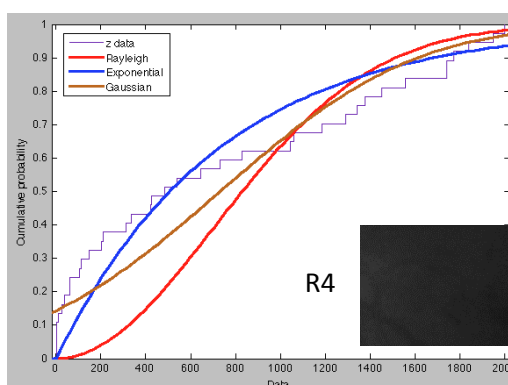
(ก) กราฟของการแจกแจงพื้นที่ R1



(ข) กราฟของการแจกแจงพื้นที่ R2



(ค) กราฟของการแจกแจงพื้นที่ R3

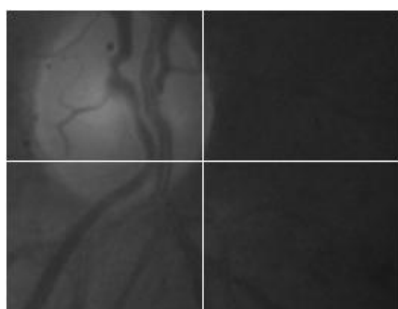


(ง) กราฟของการแจกแจงพื้นที่ R4

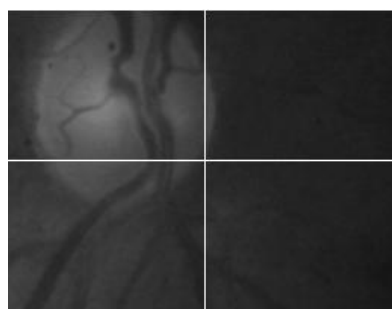
ภาพประกอบที่ 4-8 กราฟค่าความน่าจะเป็นจะเป็นสะสม ในพื้นที่ R1, R2, R3 และ R4

จากภาพประกอบที่ 4-2

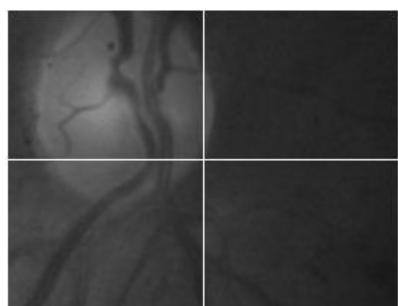
จากภาพประกอบที่ 4-8 แสดงกราฟค่าความน่าจะเป็นสะสมในแต่ละพื้นที่ที่มีลักษณะค่าความสว่างที่แตกต่างกัน สรุปได้ว่าเส้นโค้งของการแจกแจงแบบ Gaussian มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด เพราะโค้งมีลักษณะแนบชิดกับข้อมูลมากที่สุด ต่อมาคือการแจกแจงแบบ Rayleigh และ exponential ตามลำดับ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การแจกแจงแบบ Rayleigh เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนใน CLAHE เพราะฟังก์ชันนี้สามารถกดหรือบีบส่วนของข้อมูลภาพจอต่าที่มีความสว่างต่ำๆ และสามารถลดการเพิ่มค่าที่มากเกินไปในช่วงที่มีค่าความเข้มสูงๆ ดังภาพประกอบที่ 4-9



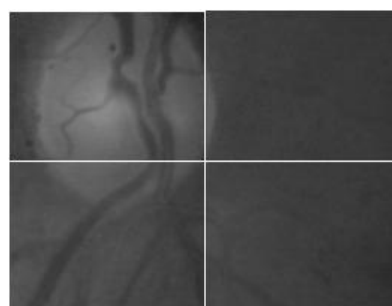
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากการแจกแจงแบบ Exponential



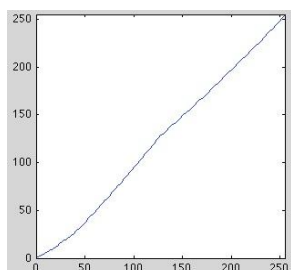
(ค) ผลลัพธ์จากการแจกแจงแบบ Gaussian



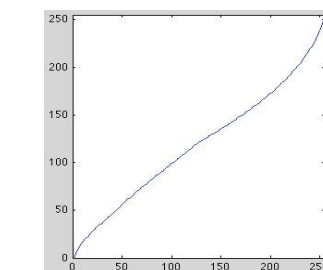
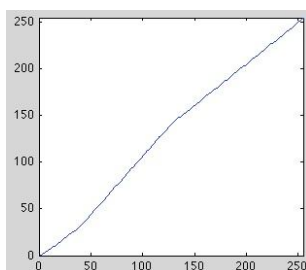
(ง) ผลลัพธ์จากการแจกแจงแบบ Rayleigh

ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงผลลัพธ์ของแต่ละการแจกแจงในขั้นตอนวิธี CLAHE

จากผลลัพธ์ในภาพประกอบที่ 4-9 ได้มีการกำหนดค่า $Clip - limit = 0.001$ ในทุกๆ การแจกแจง ตามลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4-10



(ก) ฟังก์ชันถ่ายโอน Exponential



(ค) ฟังก์ชันถ่ายโอน Rayleigh

ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละการกระจายของภาพประกอบที่ 4-8



จากลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ค่า $Clip - limit = 0.001$ ในทุกๆการแจกแจง จะสังเกตได้ว่าค่าความสว่างของภาพผลลัพธ์ในภาพประกอบที่ 4-9 (ง) ที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนในภาพประกอบที่ 4-10 (ค) ที่มีช่วงของความชันเพิ่มขึ้นในค่าความสว่างที่ต่ำ เพื่อเพิ่มค่าความสว่างให้กับข้อมูลภาพ และแสดงสารสนเทศของภาพได้ชัดเจนขึ้น และช่วงของความชันเริ่มลดลงในค่าความสว่างที่สูง เพื่อลดการตัวของข้อมูลภาพในช่วงค่าความเข้มที่สูง ไม่ให้มีแสงจ้าจนเกินไป และเพื่อลดการเกิด Over-enhancement ในภาพผลลัพธ์

4.5 การวัดและการประเมินประสิทธิภาพ











การวัดและการประเมินคุณภาพนั้น ใช้การวัดข้อมูลของภาพโดยใช้เอนโทรปีของข้อมูล สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.45) แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4-2 การวัดความเบลอของภาพ การวัดคอนทราสต์ของภาพ และการวัดการบิดเบี้ยวของสี โดยใช้วิธี Quaternion Structural Similarity (QSSIM) แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4-4 และการวัดในเชิงสเปกตรัม จากการศึกษาเบื้องต้นได้ใช้วิธีการประเมินคุณภาพในเชิงสเปกตรัมด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 และสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.44) โดยจะคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของภาพ เพื่อแสดงระดับความสัมพันธ์ของภาพเดิมและภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอ แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าต่างๆของ ภาพต้นฉบับ และภาพผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ และแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนด ในขั้นตอนวิธี Rayleigh CLAHE

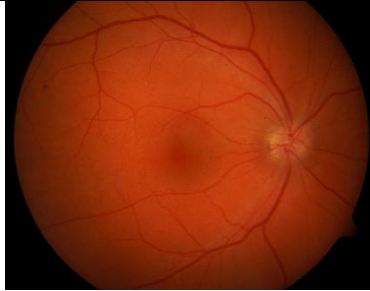
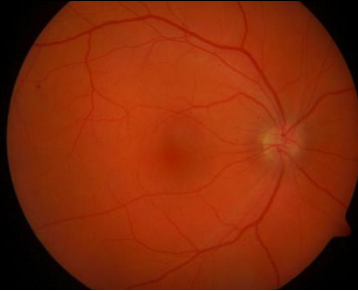

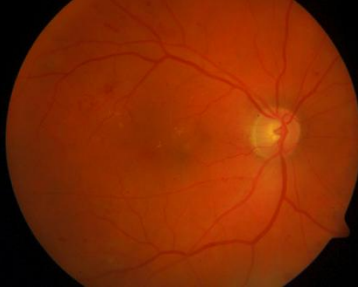


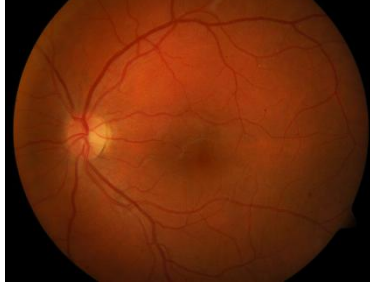

ตารางที่ 4-1 แสดงภาพต้นฉบับ ภาพผลลัพธ์ และค่าต่างๆ

รูปภาพต้นฉบับ	ค่าต่างๆ	รูปภาพผลลัพธ์						
	$Area_L = 0.4717$ $Area_R = 0.5283$ $Type = Over - exposure$ $Clip - limit = 0.001$ $\alpha = 0.38$ $QSSIM = 0.9515$ $Entropy_{original} = 6.6261$ $Entropy_{output} = 6.4168$ CC <table border="1" data-bbox="715 1883 1031 1962"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9809</td> <td>0.9805</td> <td>0.7509</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9809	0.9805	0.7509	
R	G	B						
0.9809	0.9805	0.7509						

ตารางที่ 4-1 แสดงภาพต้นฉบับ ภาพผลลัพธ์ และค่าต่างๆ (ต่อ)

รูปภาพต้นฉบับ	ค่าต่างๆ	รูปภาพผลลัพธ์						
	<p> $Area_L = 0.5029$ $Area_R = 0.4971$ $Type = Under - exposure$ $Clip - limit = 0.001$ $\alpha = 0.42$ $QSSIM = 0.9472$ $Entropy_{original} = 5.9322$ $Entropy_{output} = 6.1065$ CC </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9756</td> <td>0.9769</td> <td>0.9669</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9756	0.9769	0.9669	
R	G	B						
0.9756	0.9769	0.9669						
	<p> $Area_L = 0.4949$ $Area_R = 0.5051$ $Type = Over - exposure$ $Clip - limit = 0.001$ $\alpha = 0.38$ $QSSIM = 0.9706$ $Entropy_{original} = 6.0196$ $Entropy_{output} = 6.1062$ CC </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9813</td> <td>0.9771</td> <td>0.9469</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9813	0.9771	0.9469	
R	G	B						
0.9813	0.9771	0.9469						
	<p> $Area_L = 0.5254$ $Area_R = 0.4746$ $Type = Under - exposure$ $Clip - limit = 0.001$ $\alpha = 0.42$ $QSSIM = 0.9721$ $Entropy_{original} = 5.3867$ $Entropy_{output} = 5.7181$ CC </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9887</td> <td>0.9841</td> <td>0.9487</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9887	0.9841	0.9487	
R	G	B						
0.9887	0.9841	0.9487						
	<p> $Area_L = 0.4818$ $Area_R = 0.5182$ $Type = Over - exposure$ $Clip - limit = 0.001$ $\alpha = 0.38$ $QSSIM = 0.9839$ $Entropy_{original} = 4.9734$ $Entropy_{output} = 5.3450$ CC </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9934</td> <td>0.9889</td> <td>0.9477</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9934	0.9889	0.9477	
R	G	B						
0.9934	0.9889	0.9477						
	<p> $Area_L = 0.5188$ $Area_R = 0.4812$ $Type = Under - exposure$ $Clip - limit = 0.001$ $\alpha = 0.42$ $QSSIM = 0.9510$ $Entropy_{original} = 5.9120$ $Entropy_{output} = 6.0527$ CC </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9801</td> <td>0.9753</td> <td>0.9087</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9801	0.9753	0.9087	
R	G	B						
0.9801	0.9753	0.9087						

ตารางที่ 4-1 แสดงภาพต้นฉบับ ภาพผลลัพธ์ และค่าต่างๆ (ต่อ)

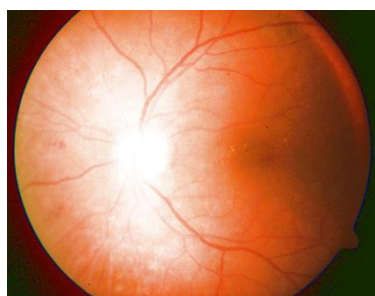
รูปภาพต้นฉบับ	ค่าต่างๆ	รูปภาพผลลัพธ์						
	<p> $Area_L = 0.4669$ $Area_R = 0.5331$ <i>Type</i> = Over – exposure <i>Clip – limit</i> = 0.001 $\alpha = 0.38$ <i>QSSIM</i> = 0.9545 <i>Entropy_{original}</i> = 6.1047 <i>Entropy_{output}</i> = 6.1863 CC </p> <table border="1" data-bbox="715 618 1035 701"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9782</td> <td>0.9814</td> <td>0.9774</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9782	0.9814	0.9774	
R	G	B						
0.9782	0.9814	0.9774						
	<p> $Area_L = 0.5173$ $Area_R = 0.4827$ <i>Type</i> = Under – exposure <i>Clip – limit</i> = 0.001 $\alpha = 0.42$ <i>QSSIM</i> = 0.9331 <i>Entropy_{original}</i> = 5.9864 <i>Entropy_{output}</i> = 6.1004 CC </p> <table border="1" data-bbox="715 916 1035 999"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9746</td> <td>0.9749</td> <td>0.9332</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9746	0.9749	0.9332	
R	G	B						
0.9746	0.9749	0.9332						
	<p> $Area_L = 0.4233$ $Area_R = 0.5767$ <i>Type</i> = Over – exposure <i>Clip – limit</i> = 0.001 $\alpha = 0.38$ <i>Window size</i> = 0.9487 <i>Entropy_{original}</i> = 6.2066 <i>Entropy_{output}</i> = 6.2018 CC </p> <table border="1" data-bbox="715 1216 1035 1299"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9839</td> <td>0.9832</td> <td>0.9580</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9839	0.9832	0.9580	
R	G	B						
0.9839	0.9832	0.9580						
	<p> $Area_L = 0.5088$ $Area_R = 0.4912$ <i>Type</i> = Under – exposure <i>Clip – limit</i> = 0.001 $\alpha = 0.42$ <i>QSSIM</i> = 0.9452 <i>Entropy_{original}</i> = 6.0293 <i>Entropy_{output}</i> = 6.1694 CC </p> <table border="1" data-bbox="715 1514 1035 1597"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>G</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.9786</td> <td>0.9752</td> <td>0.9583</td> </tr> </tbody> </table>	R	G	B	0.9786	0.9752	0.9583	
R	G	B						
0.9786	0.9752	0.9583						

4.6 ผลการทดลองและการเปรียบเทียบ

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอ นั้น ได้เปรียบเทียบกับวิธี HE โดยทั่วไปดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนของบทที่ 2 และเปรียบเทียบกับวิธีการ CLAHE ที่ได้มีการนำปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในขั้นตอนวิธีการ CLAHE ซึ่งเป็นการปรับปรุงภาพสี RGB ในระบบสี RGB โดยตรง และเลือกปรับปรุงเฉพาะแบนด์สีเขียว (CLAHE Green) โดยยังคงค่าความสว่างของแบนด์สีแดงและสีน้ำเงินไว้ (Setiawan et al., 2013) ภาพจอตาที่มีคอนทราสต์ที่ดีจะต้องเห็นเส้นเลือดชัดเจน เห็นบริเวณรอยร้าวของเส้นเลือดหรือรอยร้าวของไขมัน และเห็นรายละเอียดขององค์ประกอบข้อมูลในภาพได้ชัดเจน โดยสีของผลลัพธ์ของภาพจอตานั้นต้องไม่ผิดเพี้ยนไปจากสีเดิมจากภาพต้นฉบับ ซึ่งสีโดยเฉพาะสีเหลืองเป็นปัจจัยในการใช้วิเคราะห์ผู้ป่วยโรคเบาหวานที่มีอาการไขมันขึ้นจอตา ภาพผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับภาพผลลัพธ์ของวิธี HE และ CLAHE green แสดงในภาพประกอบที่ 4-6 จนถึงภาพประกอบที่ 4-15



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green

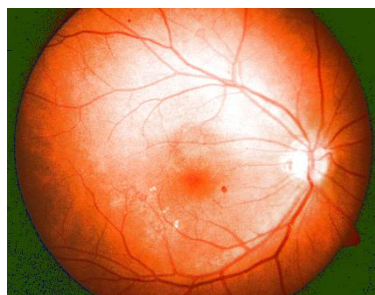


(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-11 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green

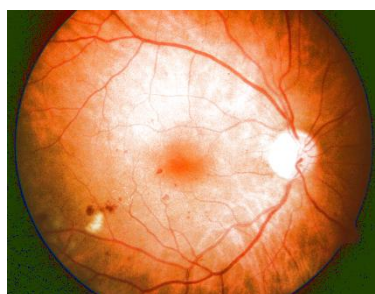


(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-12 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green



(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-13 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



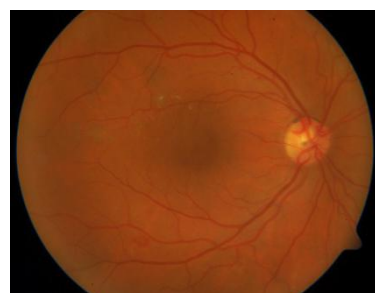
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green

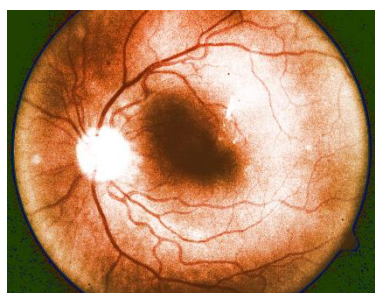


(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-14 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



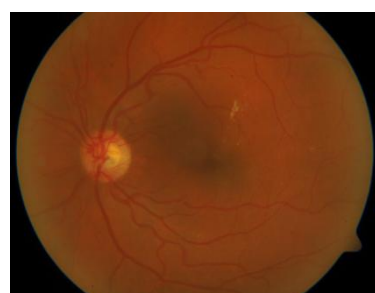
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green



(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-15 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green

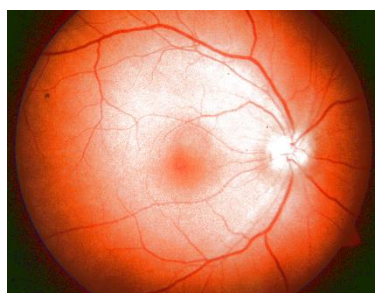


(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

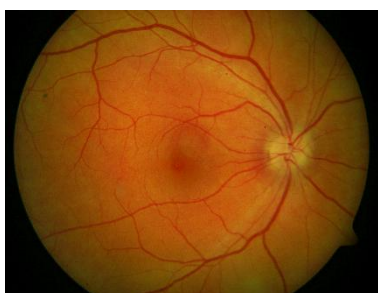
ภาพประกอบที่ 4-16 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE

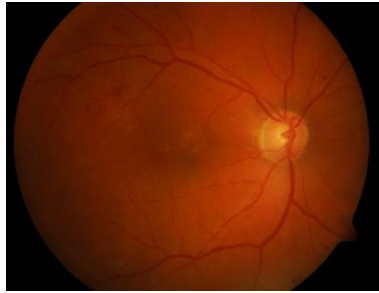


(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green

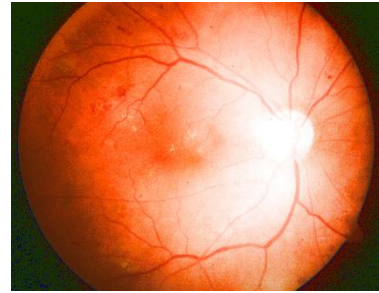


(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-17 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green



(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-18 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE

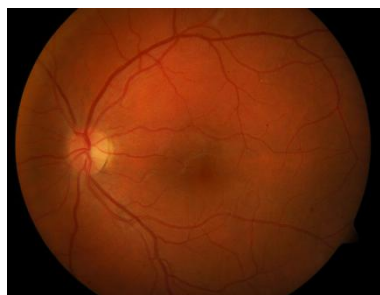


(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green

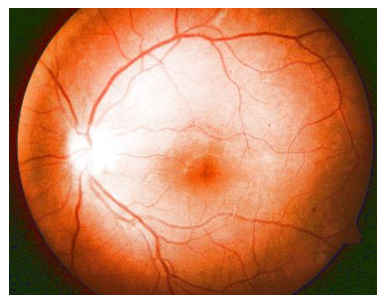


(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-19 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ผลลัพธ์จากวิธี HE



(ค) ผลลัพธ์จากวิธี CLAHE Green



(ง) ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ

ภาพประกอบที่ 4-20 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ

ตารางที่ 4-2 แสดงค่า Entropy ของภาพต้นฉบับและภาพผลลัพธ์จากวิธีการต่างๆ

	Original (ก)	HE (ข)	CLAHE Green (ค)	Proposed (ง)
ภาพประกอบที่ 4-12	6.6261	5.9812	6.6516	6.4168
ภาพประกอบที่ 4-12	5.9322	5.6992	6.0543	6.1065
ภาพประกอบที่ 4-13	6.0196	5.8227	6.0908	6.1062
ภาพประกอบที่ 4-14	5.3867	5.3462	5.5581	5.7181
ภาพประกอบที่ 4-15	4.9734	4.9859	5.1698	5.3450
ภาพประกอบที่ 4-16	5.9120	5.7320	6.0378	6.0527
ภาพประกอบที่ 4-17	6.1047	5.9040	6.2462	6.1863
ภาพประกอบที่ 4-18	5.9864	5.7327	6.0908	6.1004
ภาพประกอบที่ 4-19	6.2066	5.9106	6.3103	6.2018
ภาพประกอบที่ 4-20	6.0293	5.8775	6.1494	6.1694

ตารางที่ 4-3 แสดงค่า CC ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพผลลัพธ์จากวิธีการต่างๆ

ภาพประกอบที่	วิธีการ	R	G	B	Avg
4-11 (ข)	HE	0.9372	0.9569	0.7791	0.8911
4-11 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9552	1.0000	0.9850
4-11 (ง)	Proposed	0.9809	0.9805	0.7509	0.9041
4-12 (ข)	HE	0.9384	0.8610	0.7534	0.8448
4-12 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9612	1.0000	0.9870
4-12 (ง)	Proposed	0.9756	0.9769	0.9669	0.9731
4-13 (ข)	HE	0.9557	0.8609	0.7225	0.8463
4-13 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9667	1.0000	0.9889
4-13 (ง)	Proposed	0.9813	0.9771	0.9469	0.9684
4-14 (ข)	HE	0.9344	0.7248	0.6984	0.7858
4-14 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9847	1.0000	0.9949
4-14 (ง)	Proposed	0.9887	0.9841	0.9487	0.9738
4-15 (ข)	HE	0.9167	0.6498	0.5700	0.7121
4-15 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9836	1.0000	0.9945
4-15 (ง)	Proposed	0.9934	0.9889	0.9477	0.9766
4-16 (ข)	HE	0.9201	0.8324	0.6222	0.7915
4-16 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9660	1.0000	0.9887
4-16 (ง)	Proposed	0.9801	0.9753	0.9087	0.9547
4-17 (ข)	HE	0.9509	0.9240	0.8278	0.9009
4-17 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.95ค	1.0000	0.9859
4-17 (ง)	Proposed	0.9782	0.9814	0.9774	0.9790
4-18 (ข)	HE	0.9125	0.8734	0.4200	0.7353
4-18 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9563	1.0000	0.9854

ตารางที่ 4-3 แสดงค่า CC ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพผลลัพธ์จากวิธีการต่างๆ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	วิธีการ	R	G	B	Avg
4-18 (ง)	Proposed	0.9746	0.9749	0.9332	0.9609
4-19 (ข)	HE	0.9683	0.9252	0.8206	0.9047
4-19 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9665	1.0000	0.9888
4-19 (ง)	Proposed	0.9839	0.9832	0.9580	0.9750
4-20 (ข)	HE	0.9388	0.8790	0.7791	0.8656
4-20 (ค)	CLAHE Green	1.0000	0.9673	1.0000	0.9891
4-20 (ง)	Proposed	0.9786	0.9752	0.9583	0.9707

ตารางที่ 4-4 แสดงค่า QSSIM ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพผลลัพธ์จากวิธีการต่างๆ

	HE (ข)	CLAHE Green (ค)	Proposed (ง)
ภาพประกอบที่ 4-11	0.6361	0.9593	0.9515
ภาพประกอบที่ 4-12	0.4651	0.9435	0.9472
ภาพประกอบที่ 4-13	0.5100	0.9496	0.9706
ภาพประกอบที่ 4-14	0.3957	0.9485	0.9721
ภาพประกอบที่ 4-15	0.3355	0.9666	0.9839
ภาพประกอบที่ 4-16	0.4680	0.9511	0.9510
ภาพประกอบที่ 4-17	0.5455	0.9449	0.9545
ภาพประกอบที่ 4-18	0.4892	0.9490	0.9331
ภาพประกอบที่ 4-19	0.5956	0.9495	0.9487
ภาพประกอบที่ 4-20	0.4899	0.9414	0.9452

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองของวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตาที่ได้นำเสนอ จากนั้นทำการวัดและประเมินประสิทธิภาพด้วยการประเมินจากการมองเห็น Visual Analysis ซึ่งผลที่ได้คือ ภาพที่ปรับปรุงด้วยวิธี HE มีการกระจายของ Noise หรือสัญญาณรบกวนค่อนข้างมากและมีความสว่างมากเกินไปในบริเวณ Optic disk ทำให้ข้อมูลโครงสร้างรายละเอียดภายในภาพแสดงออกมาไม่ชัดเจน ต่อมาคือภาพที่ปรับปรุงโดยวิธีการ CLAHE โดยปรับปรุงเฉพาะแบนด์สีเขียว ภาพผลลัพธ์มีการแสดงรายละเอียดออกมาได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเทียบกับภาพต้นฉบับ เช่น ความคมชัดของเส้นเลือดภายในจอตา แต่สีของภาพผลลัพธ์ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนั้นได้มีการคงค่าสีเดิมของภาพไว้และทำการปรับปรุงความคมชัดโดยรวมของภาพ จากนั้นทำการประเมินด้วยการวัดค่า Entropy เพื่อวัดสารสนเทศของข้อมูลภาพ ซึ่งค่าจากการวัดของวิธีการที่นำเสนอนั้นเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นแล้วจะมีค่าสูงกว่าหรืออาจจะมีค่าน้อยกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับวิธี CLAHE Green และการวัดความเบลอของภาพ การวัดคอนทราสต์ของภาพ และการวัดการผิดเพี้ยนของสี โดยใช้วิธี QSSIM ต่อมาได้มีการวัดค่าสัมสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ ค่าที่วัดได้เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยจะมากกว่าวิธีการ HE แต่น้อยกว่าวิธีการ CLAHE Green เนื่องจากวิธีการดังกล่าวไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าในแบนด์สีแดง และแบนด์สีน้ำเงิน

บทที่ 5

สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

สำหรับบทนี้จะกล่าวสรุปงานวิจัยและผลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัย สุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงข้อเสนอแนะให้แก่ผู้สนใจที่จะนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อไป

5.2 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพสี โดยนำไปใช้กับภาพถ่ายจอตา ซึ่งจากปัญหาโดยทั่วไปในการได้มาซึ่งภาพถ่ายจอตา ภาพดิจิทัลของภาพจอตาที่ใช้จัดระดับของโรคจอตาเสื่อม (Age-related macular degeneration: AMD) พบว่า 50% จะต้องนำไปปรับปรุง และพบว่ามียอยู่ 10% เป็นภาพที่มีความสว่างน้อยเกินไป 19% เป็นภาพที่มีความสว่างมากจนเกิดการอิมสี นอกจากนี้ยังพบว่าภาพจอตาที่ถ่ายกับกล้องดิจิทัลจะมีคอนทราสต์ของสีเขียวค่อนข้างต่ำ ทำให้เห็นรายละเอียดในส่วนของจอตาน้อยลง (Hubbard et al., 2008) ขั้นตอนวิธีที่นำมาเสนอนั้นได้มาจากการศึกษา วิเคราะห์ขั้นตอนวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพสีเทาและภาพสี RGB ที่ได้มีการพัฒนากันมาแล้วในอดีต และนำมาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับขั้นตอนวิธีเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา

การเพิ่มประสิทธิภาพของภาพถ่ายจอตา ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเพิ่มคุณภาพโดยการเน้นไปที่การปรับปรุงองค์ประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งภายในภาพ เช่น การทำให้เส้นเลือดภายในภาพถ่ายจอประสาทตามีความคมชัดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากการปรับปรุงโดยมุ่งเน้นไปที่องค์ประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งของภาพถ่ายจอตานั้น อาจส่งผลกระทบต่อข้อมูลหรือส่วนประกอบอื่นๆภายในภาพถ่ายจอตาเปลี่ยนไปจากเดิม เช่น ทำให้ข้อมูลสีของภาพมีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อนำภาพถ่ายจอตาวิเคราะห์อาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้ เพราะข้อมูลสีของภาพถ่ายจอตานั้นเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ผู้ป่วย เช่น โรคเบาหวานที่มีอาการไขมันปรากฏขึ้นภายในจอตา ดังนั้นจึงได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตา โดยในการปรับปรุงนั้นจะเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบโดยรวมภายในภาพ ซึ่งเป็นการปรับปรุงในเชิงพื้นที่เพื่อเน้นรายละเอียดของภาพได้มากขึ้น

การนำเสนอขั้นตอนวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตานั้น ผู้วิจัยได้แบ่งแยกประเภทของภาพถ่ายจอตออกเป็น 2 ประเภท คือ Under-exposure และ Over-exposure ซึ่งเป็นการแยกเพื่อแบ่งกลุ่มตามลักษณะของความสว่างภายในภาพ โดยภาพที่มีลักษณะ Under-exposure นั้นจะจัดเป็นภาพที่มีความสว่างน้อย จึงทำให้ข้อมูลภาพบางส่วน โคนซ่อนและแสดงออกมาไม่ชัดเจน และภาพที่มีลักษณะ Over-exposure นั้นจะจัดเป็นภาพที่มีความสว่างมาก จึงทำให้ข้อมูลภายในภาพแสดงออกมาไม่ชัดเจนเพราะมีแสงสว่างจ้าเกินไป โดยในการจำแนกประเภทของภาพถ่ายจอตานั้น นำเสนอวิธีการ Skewness เพื่อวิเคราะห์ความเบ้ของฮิสโทแกรม ของค่าความสว่างของภาพถ่ายจอต ซึ่งจุดประสงค์ในการจำแนกภาพถ่ายจอตออกเป็น 2 ประเภท นั้นคือเพื่อใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ค่า *Clip - limit* และค่า α ในขั้นตอนวิธี Rayleigh Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (Rayleigh CLAHE) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอต

ขั้นตอนวิธี Rayleigh CLAHE เป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอต ซึ่งเป็นการปรับปรุงในเชิงพื้นที่ (Local Enhancement) โดยจะแบ่งภาพออกเป็นหลายๆ ส่วนๆ แต่ละส่วนมีขนาดเท่าๆกัน จากการศึกษาได้แบ่งภาพออกเป็นขนาด 8×8 เพราะจากการทดลองจะทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่ดีกว่าขนาดอื่นๆเมื่อผ่านการประเมินด้วยตา ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตได้ทำการปรับปรุงโดยการแปลงค่าสีในระบบสี RGB มาเป็นระบบสี iNHSI ซึ่งเป็นระบบสีที่ได้มีการพัฒนาจากระบบสี HSI ที่ประกอบไปด้วย (Hue, Saturation และ Intensity) โดยระบบสี iNHSI ได้ปรับปรุงขึ้นมาเพื่อลดการเกิดปัญหา Out-of-Gamut ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าในองค์ประกอบสีแล้วทำให้ การแปลงค่ากลับเป็นสี RGB แล้วมีบางค่าสีมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดของสีนั้นๆ จากนั้นในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอต จะนำค่าความสว่าง (Intensity : I) ไปทำการปรับปรุงภาพ จากนั้นนำค่าความสว่างที่ได้ผ่านการปรับปรุง (I') ในขั้นตอน Rayleigh CLAHE นำมารวมกับค่าเฉดสี และค่าความอิ่มตัวเดิม เพื่อนำไปแปลงค่ากลับเป็นโมเดลสี RGB เพื่อแสดงผล

ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอตนั้นผู้วิจัยได้แบ่งการประเมินออกเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนของการประเมินคุณภาพด้วยตา (Visual Analysis) และการประเมินคุณภาพในเชิงปริมาณ โดยใช้การวัด Entropy ของข้อมูล การวัดความเบลอของภาพ การวัดคอนทราสต์ของภาพ และการวัดการผิดเพี้ยนของสี โดยใช้วิธี Quaternion Structural Similarity (QSSIM) และตัวที่ใช้วัดความผิดเพี้ยนของสีคือ ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ ที่จะแสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นของสองตัวแปรที่มีค่าอยู่ในช่วง $[-1,1]$ ซึ่งถ้าระดับความสัมพันธ์เคลื่อนเข้าสู่ 1 แสดงว่าระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ นั่นคือข้อมูลมีความคล้ายคลึงกัน แต่ถ้าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กันเลย ค่าที่ได้

จะเคลื่อนเข้าสู่ 0 แต่ถ้าข้อมูลมีความคล้ายคลึงกันแต่สวนไปคนละทางซึ่งตรงข้ามกัน ค่าจะเคลื่อนเข้าสู่ -1 ในการวัดนั้นจะใช้การวัดความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของภาพผลลัพธ์และภาพต้นฉบับ เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูลหลังจากได้มีการแปลงค่าสีจากระบบสี RGB ไปยังระบบสี iNHSI เพื่อปรับปรุงคุณภาพ และแปลงค่ากลับไปยังระบบสี RGB เพื่อแสดงผล

5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

5.3.1 เนื่องจากการศึกษาและการเรียนรู้เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำวิจัยค่อนข้างที่จะใช้ความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติเป็นส่วนใหญ่ ผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องใช้เวลานานในการศึกษาเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และตีความหมายข้อมูล

5.3.2 เนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพสีนั้นมีมากมายหลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป ทำให้ใช้เวลาในการศึกษารายละเอียดแต่ละเทคนิคเป็นเวลานาน

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ในการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้วิธีการ Rayleigh CLAHE นั้นจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ค่า *Clip – limit* และค่า α ซึ่งมีผลต่อผลลัพธ์ โดยเทคนิคในการกำหนดค่า α นั้น โดยแรกเริ่มโปรแกรมจะตั้งค่าเริ่มต้นให้ $\alpha = 0.4$ จากนั้นการเพิ่มค่า α ใช้สำหรับภาพถ่ายจอตามีลักษณะ Under-exposure และการลดค่า α ใช้สำหรับภาพถ่ายจอตามีลักษณะ Over-exposure ดังนั้นหากมีผู้สนใจนำไปพัฒนาต่อ สามารถพัฒนาการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติในการแทนค่าลงไปวิธีการ Rayleigh CLAHE

บรรณานุกรม

- สมพงษ์ เลียงโรคาพาธ. 2552. สำนักกิจการอวกาศแห่งชาติ. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.space.mict.go.th/knowledge.php?id=rs3> (วันที่สืบค้น 25 มิถุนายน 2557)
- Rafael C. Gonzalez., and Richard E. Woods. 2009. Digital Image Processing, 3rd Edition. Prentice Hall: New Jersey.
- Intajag, S., Laohasongkram, P., and Chatree, P. 2008. Retinal image enhancement by indices fuzziness. International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology. University of Electro-Communication, August 20-22, 2008. pp. 3168-3173.
- Stephen M. Pizer., E. Philip Amburn., and John D. Austin. 1987. Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. Computer vision, Graphic, And Image Processing, Vol. 39, pp. 355 - 368
- Zuiderveld Karel. 1994. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. Graphic Gems IV. San Diego: Academic Press Professional, pp. 474-485
- Chun-Kiang Chien., and Wen-Hsiang Tsai. 2014. Image Fusion With No Gamut Problem by Improved Non-linear IHS Transforms for Remote Sensing. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transaction on (Volume: 52, Issue: 1), pp. 651-663
- Karl Peason. 1895. Notes on Regression and Inheritance in The Case of Two Parent. Proceeding of the Royal Society of London, pp. 240-242.
- Saikat Kumar Shome., and Siva Ram Krishna Vadali. 2011. Enhancement of Diabetic Retinopathy Imagery Using Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 2 no.6, pp. 2694-2699.
- Agung W. Setiawan., Tati R. Mengko., and Oerip S. Santoso. 2013. Color Retinal Image Enhancement using CLAHE. International Conference on ICT for Smart Society. Jakarta, June 13-14, 2013. pp. 1-3.
- N. Otsu. 1979. A Threshold Selection Method From Gray level Histogram. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66.
- C. Cohen., and B. J. Whitten. 1988. Parameter Estimation in Reliability and Life Span Models. Marcel Dekker: New York.
- DIARETDB Standard Diabetic Retinopathy Database Calibration Level 1. 2006. <http://www.it.lut.fi/project/imageret/diaretdb0/>.

- STARE Structured Analysis of the Retina. 1996. <http://www.ces.clemson.edu/~ahoover/stare/>
- Seung Jong Kim., Byong Seok Min., and Dong Kyum Lim. 2013. Determining Parameters in Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. Proceedings of the 7th International Conference on Information Security and Assurance. Waterfront Airport Hotel and Casino, April 26-28, 2013. pp. 204-207
- ZhiYu Chen., Bisma R. Abidi., and David L. Page. 2006. Gray-Level Grouping (GLG): An Automatic Method for Optimized Image Contrast Enhancement-Part I: The Basic Method. Image Processing, IEEE Transaction, Vol. 15, Issue.8, Aug. 2006, pp. 2290-2302
- Amir Kolaman., and Orly Yadid-Pecht. 2012. Quaternion Structural Similarity: A New Quality Index for Color Images. Image Processing, IEEE Transaction, Vol. 21, No. 4, April. 2012, pp. 1526-1536
- Larry D. Hubbard., Ronald P. Danis., Michael W. Neider., Dennis W. Thayer., Hugh D. Wabers., James K. White., Anthony J. Pugliese., and Michael F. Pugliese. 2008. Brightness, Contrast, and Color Balance of Digital versus Film Retinal Images in the Age-Related Eye Disease Study 2. Invest Ophthalmol Vis Sci. Vol. 49, No. 8, Aug. 2008, pp. 3269-3282
- William K. Pratt. 2007. Digital image processing, PIKS Scientific Inside, 4th edition. New York: Wiley. 656p.

ภาคผนวก**ผลงานตีพิมพ์**

เรื่อง	Color Retinal Image Enhancement by Rayleigh Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization
Conference	2014 14 th International Conference on Control, Automation and Systems
สถานที่	Gyeonggi-do, Korea.
วันที่	Oct. 22-25, 2014.

Color Retinal Image Enhancement by Rayleigh Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization

Thani Jintasuttisak¹ and Sathit Intajag^{2*}

Artificial Intelligence Research Laboratory
Department of Computer Science, Faculty of Science
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand

¹ (thani.jin@gmail.com)

² (sathit.i@psu.ac.th) * Corresponding author

Abstract: Retinal fundus image is important for ophthalmologist to identify and detect many vision-related diseases, such as diabetes and hypertension. From an acquisition process, retinal images often have low gray level contrast and low dynamic range. This paper proposes a method using improved nonlinear hue-saturation-intensity color model (iNHSI) to preserve color information of the retinal images. The intensity component is enhanced by Rayleigh transformation in contrast-limited adaptive histogram equalization (Rayleigh CLAHE) algorithm. This algorithm help to increase the contrast and improve the overall appearance. The proposed algorithm was tested by using standard public database for benchmarking diabetic retinopathy detection from digital image. The proposed method can preserve the original hue component unchanged; because, the hue information of the input images is important to ophthalmologist in diagnosis process.

Keywords: Gamut problem, improved nonlinear HSI color model (iNHSI), Rayleigh Contrast-limited Adaptive Histogram Equalization (Rayleigh CLAHE).

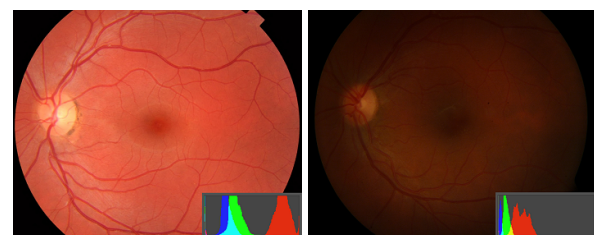
1. INTRODUCTION

Digital color fundus imaging in ophthalmology plays an important role in medical diagnosis of several pathologies, for example, hypertension, diabetes, and cardiovascular disease [1]. Computer-aided image analysis of the fundus image or retinal image is widely used as a diagnostic tool for gathering important information from patient with retinopathy. The retinal image is very important for the doctors to be able to clearly detect and recognize the lesions among the numerous capillary vessels and optic nerve presented in the images. However, some retinal images acquired from a fundus camera often have low grey level contrast and low dynamic range as shown in Fig. 1.

Contrast enhancement is a technique applied to a digital image to qualitatively improve the contrast of image. This technique allows modified manipulation of the dynamic range such that the results are more informative for human eye. The classical contrast enhancement is Histogram Equalization (HE) [2] which has good performance in ordinary images, such as human portraits or natural images. However, HE is not a good choice for the retinal images due to its amplification of the noise and the absence of some brightness levels after enhancement [3]. HE has been generalized to a local histogram equalization which is known as adaptive histogram equalization (AHE) [2]. AHE is based on HE that the adaptive method formulates each histogram of sub-image to redistribute the brightness values of the images. AHE is therefore suitable for improving the local contrast of an image and bringing out more details. However, The problem remain

the same with the global histogram equalization because of amplifying noise in relatively homogeneous regions. In order to overcome this problem, contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) was proposed [4].

CLAHE based enhancement was used to improve a retinal image. Shome and Vadali [5] engaged CLAHE to enhance the diabetic retinopathy image; however, their methods had to remove noise by median filter. Setiawan et al. [6] proposed a method to improve the contrast of color retinal image by enhancing green channel in red-green-blue (RGB) color model by using CLAHE. The effect of enhancing only the green band made the results more greenness and destroyed the chromatic information.



(a) Normal eye

(b) Poor quality

Fig. 1 Retinal images.

Considering a diagnosis of a color retinal image, chromatic information provides a major factor to identify the lesions of the retinopathy images. This paper proposes a method to preserve the chromatic information and to improve contrast of color retinal image. The proposed method keeps the chromatic data by operating the images in improved nonlinear hue-saturation-intensity (iNHSI)

color model [7]. The intensity component was selected to enhance by Rayleigh transformation [8] based on CLAHE method to increase the contrast and to improve the overall appearance. In our algorithm, the input image was analysed the exposure status to declare some parameters of CLAHE. On the other hand, the noise in the background image was suppressed by a linear contrast stretch of the transfer function of Rayleigh-CLAHE.

The organization of this paper is as follows. Section 2 describes the proposed algorithm to enhance the color retinal image. The experimental results are presented in Section 3. The conclusions are discussed in Section 4.

2. PROPOSED ALGORITHM

An algorithm to enhance a color medical image has to preserve the chromatic information to support the correct decision of a doctor in the image diagnosis step. In our algorithm, color model no gamut problem, iNHSI, is provided to keep the chromatic information. To improve the contrast of the color retinal image, the intensity component is employed to enhance by using Rayleigh CLAHE.

The proposed algorithm is illustrated in Fig. 2. In the algorithm, a color retinal image is transformed from RGB to iNHSI color model. The chromatic data(hue and saturation) are preserved and the intensity component, I , is employed to enhance the contrast of the color retinal images. The intensity, I , is the analysed brightness levels which are classified into two categories of exposure levels: under-exposure, and over-exposure. The exposure levels are used to declare a set of paraments of CLAHE that consist of clip-limit value and α value in Rayleigh distribution. Finally, new intensity, I' , which was enhanced, is provided to combine with the hue and saturation components to invert the transformation to RGB color model.

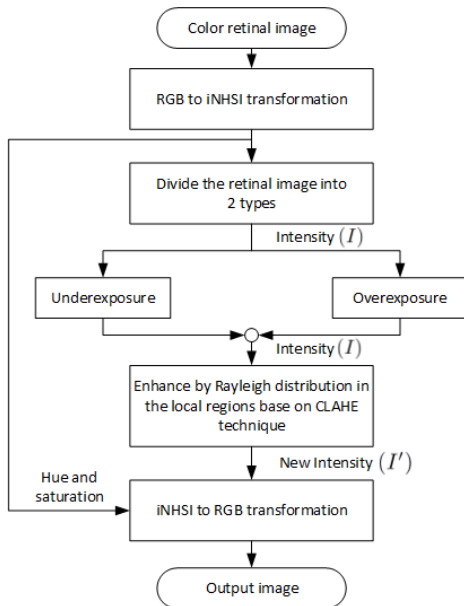


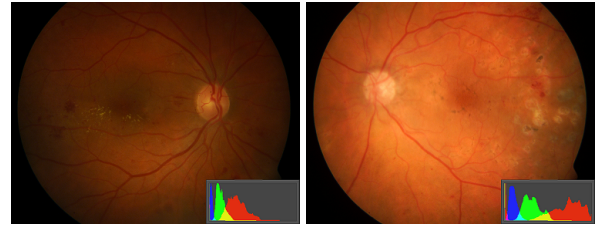
Fig. 2 Flow Chart of the proposed algorithm.

2.1 Nonlinear HSI color model

A perceptual color model, HSI(Hue, Saturation, Intensity), is widely used in color image processing [9]. In our color image enhancement, the intensity values are modified. When HSI is transformed back to RGB color model for displaying, out-of-gamut problem is usually occurred because some color pixel values are out-of-range of the RGB color space. To avoid this problem, iNHSI color model [7] is provided to preserve the color information of the retinal images.

2.2 Color Retinal Image Exposure

An image capturing device is sensitive to light. If the light is less than necessary, the image will be under-exposure; vice versa, if the light is more than necessary, the image will be over-exposure. Fig. 3 illustrates two color retinal images, which represent the under and over exposure as shown in the figures (a) and (b), respectively. As seen in the histograms of the images, the red band of the color retinal images usually has higher intensity levels than the others. The under-exposure image does not have an effect of out-of-gamut. However, the over-exposure has this effect by the red band.



(a) Under-exposure (b) Over-exposure

Fig. 3 Color retinal images.

According to both the cases of over and under exposure, an image will have low contrast. In the color retinal images, the intensity component is provided to measure the exposure situation by analysing skewness of the intensity histogram. The skewness is calculated in the region of interest(ROI), which consists of the retinal area. Thus, the retinal image is identified by the exposure status as the following steps.

Step 1: Select the ROI from the intensity component by using a threshold value of Otsu method [10]. Fig. 4 shows ROI of the intensity component of Fig. 3.

Step 2: Calculate mean of the ROI data in set $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ of n elements that is given by

$$\mu_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

Step 3: Identify the skewness of ROI to define the exposure stage of each input image. The identification method is provided by calculating two regions of set A . The region, $Area_L$, consists of the intensity values less than μ_A . Otherwise, $Area_R$ region has intensity values

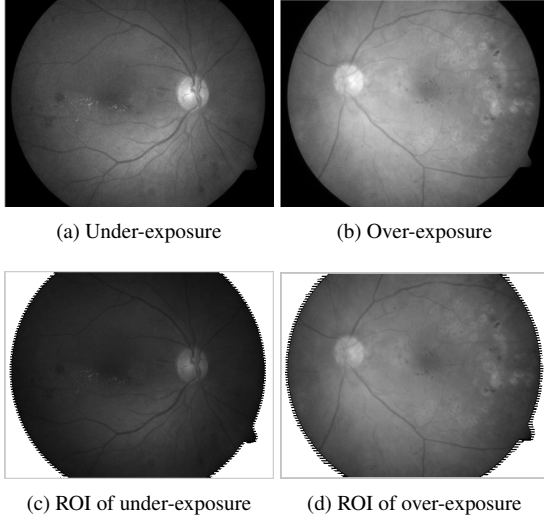


Fig. 4 ROI of the intensity components.

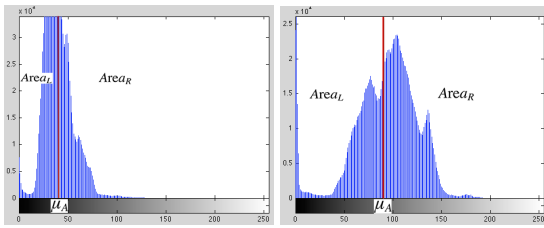
more than μ_A .

$$Area_L = \sum_{k=0}^{\mu_A} \frac{n_k}{n} \quad (2)$$

$$Area_R = \sum_{k=\mu_A+1}^{L-1} \frac{n_k}{n} \quad (3)$$

where n_k is a number of pixels in set A having gray level k in the range $[0, L - 1]$ and L is total number of gray levels.

The skewness of ROI is evaluated by comparing the parameters, $Area_L$, and $Area_R$. If $Area_L$ is more than $Area_R$, it means that the input image has majority of under-exposure; vice versa, if $Area_R$ is more than $Area_L$, then input image has majority of over-exposure. Fig. 5 (a) and (b) show histogram of ROI from Fig. 4(c), 4(d) which are defined as under-exposure and over-exposure, respectively.



(a) Skewness measurement of Fig. 4(a), $Area_L > Area_R$, which obtains under-exposure (b) Skewness measurement of Fig. 4(b), $Area_L < Area_R$, which obtains over-exposure

Fig. 5 Exposure measurement.

2.3 Rayleigh CLAHE

In our algorithm, two parameters of Rayleigh CLAHE: $clip - limit$ and α value are declared depending on an input data. Clip-limit value is used to protect the over-enhancement. CLAHE method restricts the amplification by clipping the histogram at a user-defined value called

clip-limit. The clipping level determines how much noise in the histogram. It should be smoothed and hence how much the contrast should be enhanced.

α parameter in Rayleigh distribution is provided to control the designation of the transfer functions in each region. Generally, the parameter α endows to control a shape Rayleigh distribution [11]. The parameter value will result in more significant contrast enhancement in the image while increasing saturation and noise levels. Although the proposed parameter may generate continuous local transformation under the proper conditions by assigning carefully the parameter to an individual image, the continuity cannot be proved and is not guaranteed. If there are big changes between nearby local histograms, the local intensity level transformation will be changed abruptly. To reduce this effect, the output from transfer function of Rayleigh transform is re-scaled using linear contrast stretch.

In CLAHE technique, an input image is divided into non-overlapping contextual regions called *tiles*. A number of *tiles* depend on the other parameters of CLAHE. If the number of *tiles* is small, the clip-limit should be quite small [12]. From our studies on the retinal images, 8×8 is a good value to preserve the chromatic data.

The Rayleigh CLAHE to enhance the color retinal images consists of the following by step:

Step 1: Dividing the intensity image into non-overlapping contextual regions. In Fig. 6, intensity components of Fig. 4(a) and 4(b) are partitioned into 8×8 non-overlapping contextual regions.

Step 2: Calculating the histogram of each region.

Step 3: Clipping the histogram of each region by the clip-limit value. The clipping rule is given by the following statements:

if $H_{region}(i) > N_{clip}$ **then**

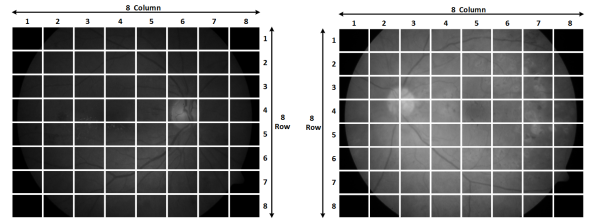
$$H_{region_clip}(i) = N_{clip} \quad (4)$$

Else if $(H_{region}(i) + N_{avgbin}) > N_{clip}$ **then**

$$H_{region_clip}(i) = N_{clip} \quad (5)$$

Else $H_{region_clip}(i) = (H_{region}(i) + N_{avgbin})$ **(6)**

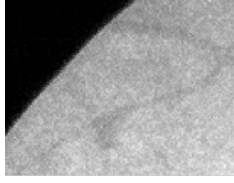
where $H_{region}(i)$ is a local histogram of each region at i -th gray level. $H_{region_clip}(i)$ represents clipped histogram of the region, N_{clip} denotes the actual clip-limit which is defined by



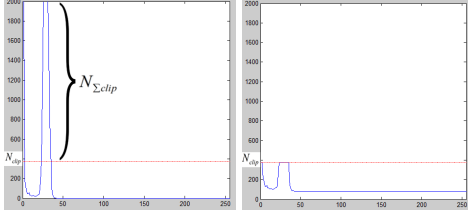
(a) Under-exposure

(b) Over-exposure

Fig. 6 Non-overlapping contextual regions.



(a) Sub-image at index row 1, column 2 of Fig. 6(a)



(b) Histogram of the region (c) Clipped histogram

Fig. 7 Histogram clipping process.

$$N_{clip} = Min_{clip} + \text{round}(V_{clip} * (N_{pix} - Min_{clip})) \quad (7)$$

where V_{clip} is clip-limit value in the range $[0, 1]$ defined by the user. N_{pix} denotes the total number of pixels in the region. Min_{clip} is the minimum average of total pixels, N_{pix} , per total bins, N_{bin} , in the local histogram. Min_{clip} is defined by:

$$Min_{clip} = \text{round}\left(\frac{N_{pix}}{N_{bin}}\right). \quad (8)$$

From eq. (4) and (5), N_{clip} is provided to threshold each of the local histogram. Thus, the total number of pixels, $N_{\Sigma clip}$, denotes the remain pixels from the clipped histogram as illustrated in Fig. 7(b). The average of the remain pixels to redistribute to each bin is calculated by

$$N_{avgbin} = \frac{N_{\Sigma clip}}{N_{bin}} \quad (9)$$

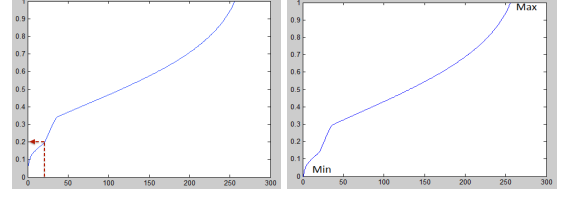
The clipped local histogram at 1st row and 2nd column has been demonstrated in Fig. 7.

Step 4: Enhancing intensity values in each region by Rayleigh transform. The clipped histogram, H_{region_clip} , is transformed to cumulative probability, $P_{input}(x)$, which is provided to create transfer function. Rayleigh forward transform is given by

$$y = y_{min} + \sqrt{2\alpha^2 \ln\left(\frac{1}{1 - P_{input}(x)}\right)} \quad (10)$$

where y_{min} is the lower bound of the intensity value. α is a scaling parameter of Rayleigh distribution that is defined depending on each input image. The output probability density of each intensity value, y , can be derived as

$$p(y) = \frac{y - y_{min}}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{(y - y_{min})^2}{2\alpha^2}\right) \text{ for } y \geq y_{min}. \quad (11)$$



(a) Transfer function of eq. (11) (b) Modify transfer function of eq. (12)

Fig. 8 Transfer function set parameter $\alpha = 0.4$ and $V_{clip} = 0.01$.

A higher α value will result in more significant contrast enhancement in the image meanwhile increasing saturation value and amplify noise levels. Fig. 8(a) shows the Rayleigh transfer function from the clipped histogram of Fig. 7(c).

Eq. (11) is used as a transfer function of CLAHE based on Rayleigh distribution as shown in Fig. 8(a). This equation will modify a gray-level value. If it abruptly changes in the low values, it will amplify a noise background of the retinal image as shown in the Fig. 8(a) when the gray-level range of 0 to 0.2 approximately.

Step 5: Reducing abruptly changing effect, the output from the transfer function in eq. (11) is re-scaled using linear contrast stretch. The re-scale function still keeps the original shape of the transfer function to compress noise background and to design the color of output continuously. The linear contrast stretch is calculated by

$$y = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (12)$$

where x is the input value from the transfer function, x_{min} and x_{max} denotes the minimum and maximum value of the transfer function.

Step 6: Interpolating by using bilinear of the neighboring sample points from the center pixel of contextual regions to form the enhanced in each region for the whole image as the new intensity, I' . New intensity image, I' , from the output of Rayleigh CLAHE is combined with the hue and saturation components becoming to HSI model. Finally, HSI is transformed to RGB color model by iNHSI algorithm [7]. Fig. 9 shows the enhanced results from our algorithm by the input images from Fig. 3(a) and (b). In Fig. 9, we compare the efficiency of eq. (11) as observed from the figure (a) and (b), for the figure (c) and (d) are the results from eq. (12).

3. EXPERIMENTAL RESULTS

Our algorithm is tested by using the public retinal image datasets which are DIARETDB (Standard Diabetic Retinopathy Database) [13]. This database was provided for benchmarking diabetic retinopathy detection from digital images. The proposed method is compared with the global and local histogram equalization techniques that consist of HE method [2] and color retinal image en-

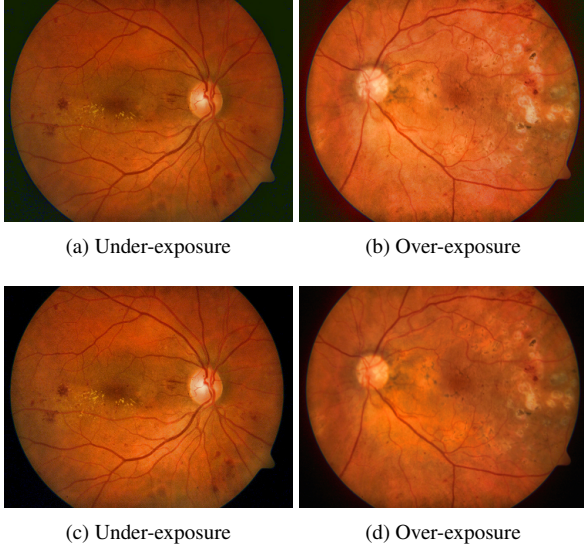


Fig. 9 Color retinal image enhancement of the proposed algorithm by parameters $\alpha = 0.4$ and $V_{clip} = 0.01$.

hancement using CLAHE in green channel in RGB color model [6], respectively.

3.1 Visual Analysis

The experimental results in Fig. 10 and 11 which are illustrated for visual comparison to the proposed method. The results from the proposed method give better visual quality of the enhanced image. It keeps a good contrast of retinal structures and preserved chromatic information of the input images. HE results are amplified background noises and cannot preserve the overall appearance of retinal structures. For example, in the optic disk and retinopathy, it degrades the information detail by having gamut problem of the red band of image as shown in Fig. 10(b) and 11(b). Fig. 10(c) and 11(c) show the results in the local image enhancement from CLAHE method by using green channel of RGB color model [6]. The results have a good contrast of blood vessels; however, this method does not preserve the chromatic information. As seen from the results, they have much of greenness. Our proposed algorithm could preserve the color data and improve overall contrast in the output images as shown in Fig. 10(d) and 11(d). The parameter values are $\alpha = 0.5$, $V_{clip} = 0.01$, and 8×8 blocks for Fig. 10(d) and for Fig. 11(d) consisting of $\alpha = 0.37$, $V_{clip} = 0.0075$, and 8×8 blocks.

3.2 Quantitative comparison

In quantitative comparison, correlation coefficient(CC) is used to measure the chromatic information, and entropy is provided to inspect the contrast properties. CC measures the strength of the linear association between two images A and B . CC value ranges between -1 to 1 depending on the similarity of A and B . If they similar and go in the same directions, CC will approach to 1. If

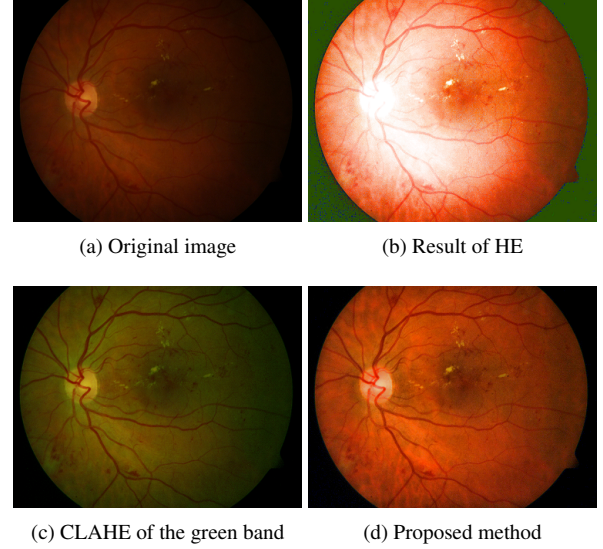


Fig. 10 Visual comparisons.

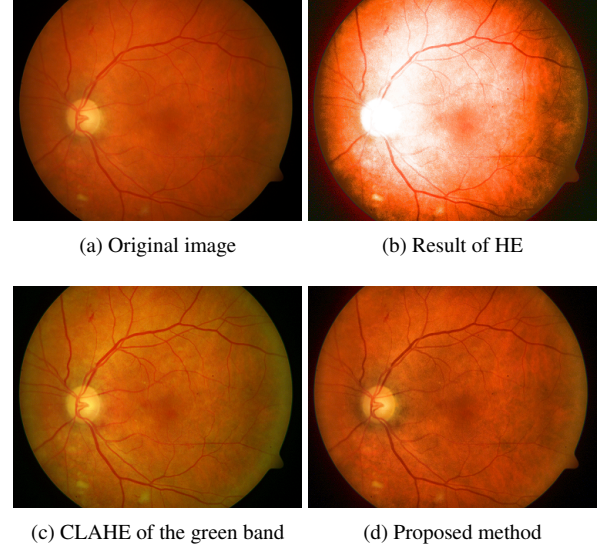


Fig. 11 Visual comparisons.

CC approaches to -1, it indicates that A and B are having similarity, but they are in an opposite direction. On the other hand, if they are not the same, CC will go to zero. CC is given as:

$$CC_{A,B} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A_{i,j} - \bar{A})(B_{i,j} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A_{i,j} - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (B_{i,j} - \bar{B})^2}} \quad (13)$$

where M and N denote image size, \bar{A} and \bar{B} are mean values of A and B , respectively.

Entropy measures the content of an image, with higher values indicating more detailed in the images. With the image, I , the entropy is defined by

$$H(I) = - \sum_{i=1}^m P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (14)$$

where x_i is an intensity value of I . m denotes the total number of the intensity values. $P(x_i)$ is the probability function of x_i .

The Quantitative comparisons are illustrated in Table 1 and 2, which formulate from the under and over exposure image of Fig. 10 and 11.

Table 1 CC values between the original input images and the enhanced results.

Fig	Method	R	G	B	Avg
10(b)	HE	0.8855	0.8693	0.4398	0.7315
10(c)	CLAHE	1.0000	0.9535	1.0000	0.9845
10(d)	Proposed	0.9450	0.9641	0.9227	0.9439
11(b)	HE	0.9458	0.8895	0.5854	0.8069
11(c)	CLAHE	1.0000	0.9687	1.0000	0.9895
11(d)	Proposed	0.9591	0.9678	0.9569	0.9646

Table 2 Entropy values of the enhanced results from Fig. 10 and 11.

	Original	HE	CLAHE	Proposed
Fig.10	5.5161	5.4455	5.798	5.9846
Fig.11	6.1775	5.9750	6.1516	6.1790

4. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

This paper was presented the color retinal enhancement method in the iNHSI color model to preserve the color information for visual diagnosis. The intensity component was enhanced by using the Rayleigh Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization. In our algorithm, the intensity component was analysed to classify the exposure levels: under- and over-exposure. The exposure levels were used to declare the set of parameters of CLAHE that consists of $clip-limit$ and α value in Rayleigh transform. The enhanced results has a good property for visual inspection in diagnosis process. It results provide a good contrast and improve the overall appearance of the color retinal images. From the quantitative comparison, the proposed algorithm offers high values of CC that is the enhancement method can preserve the chromatic information; however, CC values of our method are lower than CLAHE. Because the green band of CLAHE causes the red and blue band to be unmodified. On the other hand, enhancing only one band of RGB causes degradation of the color information. The proposed method gives the better visual quality of the enhanced images which represent a good contrast of retinal structures when considering the entropy values as shown in Table 2.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Assist. Prof. Patama Bhurayanontachai at Retina Unit, Department of Ophthalmology, Faculty of Medicine, Prince of Songkla Uni-

versity for suggestion and criticism in the experimental result phase of this work. In addition, we are grateful Sunida Ratanothayanon for consultation and all her help.

REFERENCES

- [1] J.J. Kanski, *Clinical Ophthalmology: A Systematic Approach*, London, U.K.: Butterworth-Heinemann, 1989.
- [2] J.B. Zimmerman and S.M. Pizer, "An evaluation of the effectiveness of adaptive histogram equalization for contrast enhancement," *IEEE Trans Med. Imaging*, Vol. 7, No. 4, pp. 304-312, 1988.
- [3] S. Intajag, P. Laohasongkram and P. Chatree, "Retinal image enhancement by indices fuzziness," *SICE Annual Conference, 2008*, pp. 3168-3173, 2008.
- [4] Stephen M. Pizer, E. Philip Amburn and John D. Austin, "Adaptive Histogram Equalization and Its Variations," *Computer vision, Graphic, And Image Processing*, Vol. 39, pp. 355-368, 1987.
- [5] Saikat Kumar Shome and Siva Ram Krishna Vadali, "Enhancement of Diabetic Retinopathy Imagery Using Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization," *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 2 no. 6, pp. 2694-2699, 2011.
- [6] Agung W. Setiawan, Tati R. Mengko, and Oerip S. Santoso, "Color Retinal Image Enhancement using CLAHE," *ICISS International Conference, 2013*, pp. 1-3, 2013.
- [7] Chun-Liang Chien and Wen-Hsiang Tsai, "Image Fusion With No Gamut Problem by Improved Non-linear IHS Transforms for Remote Sensing," *IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing*, Vol. 52, No. 1, pp. 651-662, 2014.
- [8] W. K. Pratt, *Digital Image Processing* 4th ed., John Wiley and Sons, USA: New Jersey, 2007.
- [9] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd Edition, Pearson, 2009.
- [10] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histogram," *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 6266, 1979.
- [11] C. Cohen and B. J. Whitten, *Parameter Estimation in Reliability and Life Span Models*. New York: Marcel Dekker, 1988.
- [12] Seung Jong Kim, Byong Seok Min and Dong Kyun Lim, "Determining Parameters in Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization," *SERSC International Conference, 2013*, Vol. 21, pp. 204-207, 2013.
- [13] DIARETDB Standard Diabetic Retinopathy Database Calibration Level 1. 2006. <http://www.it.lut.fi/project/imageret/diaretdb0/>.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายธานี จินตสุทธิศักดิ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5510220048	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสาร)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2557 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ทุนนราชนิเทศศาสตร์ ประจำปีการศึกษา 2555

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Jintasuttisak, T., and Intajag, S. 2014. Color Retinal Image Enhancement by Rayleigh Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization. 14th International Conference on Control, Automation and Systems. KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 22-25, 2014.