

논문 2012-49SP-2-1

# LCybCrg 색 공간에서 분류맵을 이용한 바랜 색 보정

## ( Faded Color Correction using Classification Map in LCybCrg Color Space )

경 왕 준\*, 김 대 철\*, 이 철 희\*\*, 하 영 호\*\*\*

( Wang-Jun Kyung, Dae-Chul Kim, Cheol-Hee Lee, and Yeong-Ho Ha )

### 요 약

일반적으로 바랜 영상 보정 방법들은 색 바램의 현상은 광원의 효과로서, Gray World Assumption 또는 White Patch Retinex와 같은 광원 추정 알고리즘을 사용한다. 그러나 이러한 방법들은 염료의 특성, 온도, 습도, 광원 등에 따라 다르게 바랜 색에 대한 보정은 부정확함을 나타냈다. 본 논문에서는 LCybCrg 색 공간에서의 분류맵을 이용한 바랜 색 보정 방법을 제안한다. 먼저 입력의 색 바랜 영상은 LCybCrg의 보색 공간의 색도를 기반으로 하여 분류되었다. 그리고 RGB 색 공간에서 Gray World Assumption을 기반으로 하여 바랜 색도를 보정하였다. 또한 CybCrg 값으로부터 계산된 가중치는 각각의 영역에서 발생 할 수 있는 윤곽효과를 줄이기 위해 적용되었다. 그 결과 제안한 방법은 바랜 영상에 대해 이전 방법들 보다 더 나은 보정 성능을 보였다.

### Abstract

Generally, correction methods for faded images use illuminant estimation algorithms, such as the gray world assumption and white patch Retinex methods, as the phenomenon of color fading is regarded as an illuminant effect. However, this induces inaccurate faded color correction, as images fade at different rates according to the ink property, temperature, humidity, and illuminant. Therefore, this paper presents a color correction method for faded images using classification in LCybCrg color space. The input faded image is first separated according to the chromaticity based on LCybCrg opponent color space. The faded color correction is then performed based on the gray world assumption in RGB color space. Thereafter, weights calculated from CybCrg values are applied to reduce contour artifacts. As a result, the proposed method provides better color correction for faded images than previous methods.

**Keywords :** Faded photo correction, Gray world assumption, LCybCrg color space, Classification map

## I. 서 론

일반적으로 사진, 문서, 인쇄물과 같은 출력된 매체는 오랜 시간 보관할 때에 각각의 환경에 따라 매체가 가진 특성이 변하여 색이 바래진다. 특히 오래된 사진은

오랜 시간 빛에 노출되거나 습도가 높은 경우 붉거나 노란 형태의 색상으로 바랜다. 이러한 색 바램 현상을 Franziska<sup>[1]</sup>와 Henry<sup>[2]</sup>는 다양한 실험을 통해 분석했다. Franziska는 온도와 습도에 대한 인쇄물의 색 바램 현상을 실험하였다<sup>[1]</sup>. 실험 결과 온도와 습도가 높을수록 CMY 염료의 밀도가 더 빨리 낮아지는 결과를 보였다. 또한 Henry는 종이에 CMY 각각의 패치와 회색 계조를 인쇄하고 여러 종류의 광원에 노출 시켜 염료의 물리적인 변화를 살폈다<sup>[2]</sup>. 위 실험들을 통해 실제 바랜 영상의 경우 색 또는 영역에 따라 색 바랜 정도가 다르다는 것을 알 수 있다. 또한, 색 바램 현상의 물리적 모

\* 학생회원, \*\*\* 정회원, 경북대학교 전자공학부  
(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

\*\* 정회원, 안동대학교 컴퓨터공학과  
(Computer Engineering, Andong National University)

접수일자: 2011년11월1일, 수정완료일: 2012년1월31일

델링을 통해 디지털 이미지로 변환된 색 바랜 영상의 복원은 제약이 따른다는 것을 알 수 있다.

한편, 색 바랜 영상의 보정을 위하여 칼라 항상성 기반의 광원 추정 방법들이 적용되어 왔다<sup>[3-4]</sup>. 이러한 방법들은 색 바랜 현상과 광원에 의한 색도 변화 현상이 동일하다는 가정을 기반으로 한다. 일반적으로 광원 추정 알고리즘들은 인간 시각 시스템이 인지하는 색은 광원과 물체의 반사율의 곱으로 표현되며, 인지되는 색으로부터 광원의 색을 추정하여 물체의 반사율을 구할 수 있다는 가정을 기반으로 한다<sup>[3]</sup>. 이들 방법 중 대표적인 것으로서, GWA(Gray World Assumption)와 WR(White Patch Retinex)이 있다. GWA는 영상의 각 채널별 평균 색도 값은 회색이라는 가정을 기반으로 하여 영상의 색도를 보정하며, WR은 영상의 최대 밝기 값을 가지는 픽셀의 RGB 값을 광원의 색도 값으로 가정하고 이를 이용하여 보정한다. 최근에 Edmund는 CGWR(Combining Gray world and White patch Retinex)을 제안했다<sup>[4]</sup>. CGWR은 GWA와 WR이 가지는 가정을 동시에 만족하도록 하는 방정식을 모델링 하고, 그 계수를 구하여 영상을 보정한다. 그 결과, CGWR은 GWA 및 WR 보다 색 보정에 높은 성능을 보이며, 2차 함수 형태의 보정 함수로써 대비 향상의 효과도 나타냈다. 그러나 이러한 방법들은 전역 보정 함수이므로, 색 바랜 영상의 지역적 색상 변화에 대해 보정하지 못한다.

본 논문에서는 색 바랜 사진의 보정을 위하여 LCybCrg 보색 공간을 이용한 분리적인 색도 추정을 통한 바랜 색 보정 방법을 제안한다. 제안한 방법은 LCybCrg 색 공간을 이용해 분류 맵을 생성하고, 각 영역에 따른 색도 보정을 수행하여 바랜 색을 보정하였다. 또한 분리적인 바랜 색도 보정에 발생하는 컨투어 현상을 줄이기 위해 CybCrg 값을 이용한 가중치를 적용하였다. 실험 및 평가로서 입력 색 바랜 영상과 결과 영상 사이의 바랜 색 보정 정도에 대한 주관적인 평가를 통한 Z-score<sup>[5]</sup>를 계산했다.

II절에서는 IMSR 알고리즘과 색상의 왜곡 현상을 설명 하고, IMSR에서 나타나는 현상을 개선하기 위해 제안한 알고리즘은 III절에서 설명한다. IV절에서는 MSR과 IMSR과의 실험 및 결과를 비교하며, V절에서 결론을 맺는다.

## II. 기존의 색 보정 방법

일반적인 색 균형(color balance) 또는 색 보정 기법들은 컬러 획득 과정을 기반으로 한다. 카메라 센서의  $(x, y)$  위치에서 획득된 밝기  $I(x, y)$ 에 대하여 다음과 같이 간단한 모델로 나타낼 수 있다.

$$I_i(x, y) = R_i(x, y)L_i(x, y) \quad (1)$$

수식 (1)에서  $R(x, y)$ 은  $(x, y)$ 에서 물체의 반사율이며  $L(x, y)$ 는 광원을 나타낸다.  $i$ 는 RGB 각 채널을 의미한다. 여기서 카메라의 특성은 항상 일정하다는 가정을 기반으로 한다. 이때 물체의 반사율  $R(x, y)$ 는 획득된 영상과 광원  $L(x, y)$ 을 알면 구할 수 있다. 이러한 이미지 획득 모델은 대부분의 색 보정 방법에 기본 이론으로 사용된다.

Edmund가 제안한 CGWR은 GWA와 WR의 가정을 동시에 만족하도록 하는 함수를 모델링 하였다. 먼저, GWA는 영상의 각 채널 평균이 회색이라는 가정을 기반으로 한다. 수식 (2)는 GWA를 이용한 영상 보정을

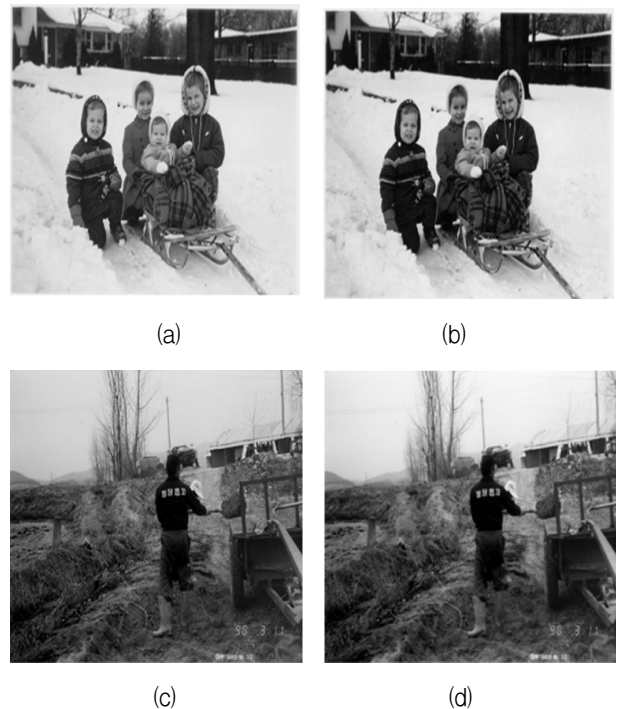


그림 1. CGWR의 결과 영상, (a) 전체적으로 바랜 입력 영상, (b) (a)의 결과영상, (c) 부분적으로 바랜 입력영상, (d) (c)의 결과영상

Fig. 1. Resulting images by CGWR. (a) Wholly faded image, (b) Resulting image from (a), (c) Partially faded image, (d) Resulting image from (c).

나타낸다.

$$\hat{I}_R(x,y) = \hat{\alpha}I_R(x,y), \hat{I}_B(x,y) = \hat{\beta}I_B(x,y) \quad (2)$$

수식 (2)에서 사용된 보정 계수  $\hat{\alpha}$ 와  $\hat{\beta}$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\alpha} = \frac{G_{avg}}{R_{avg}}, \hat{\beta} = \frac{G_{avg}}{B_{avg}} \quad (3)$$

수식 (3)에서  $R_{avg}, G_{avg}, B_{avg}$ 는 각 채널의 평균을 나타낸다. 이때  $G_{avg}$ 는 영상의 밝기 채널로서 사용된다. 이와 같이 영상의 평균이 밝기로 가정하고 있는  $G_{avg}$ 로 보정하기 위한 R 과 B 채널에 보정 계수를 이용하여 영상을 보정한다.

WR은 영상의 가장 밝은 화소를 이용하여 보정계수를 구한다. 즉, 수식 (1)에서 물체의 반사율이 1이 될 경우 획득된 영상의 값은 광원의 값과 같다. 이와 같이 광원에 대한 색도 값을 추정하기 위해 영상의 가장 밝은 화소를 찾고 이를 이용하여 보정을 수행한다. WR에서 사용되는 보정 계수  $\tilde{\alpha}$ 와  $\tilde{\beta}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\tilde{\alpha} = \frac{G_{max}}{R_{max}}, \tilde{\beta} = \frac{G_{max}}{B_{max}} \quad (4)$$

계산된 보정 계수는 영상의 각 화소에 대해 수식 (2)와 동일한 방법으로 보정한다. CGWR은 위의 두 가지 색 보정 기법이 가지는 가정을 모두 만족하는 모델을 아래와 같이 나타내었다.

$$\check{I}_R(x,y) = \mu I_R^2(x,y) + \nu I_R(x,y) \quad (5)$$

수식(5)는 R 채널에 대한 모델을 나타낸다. 2차 방정식의 형태로서, 계수  $\mu$ 와  $\nu$ 는 아래의 행렬 형태로서 계산할 수 있다.

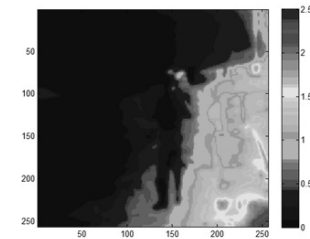
$$\begin{bmatrix} \sum \sum I_R^2(x,y) & \sum \sum I_R(x,y) \\ \max\{I_R^2(x,y)\} & \max\{I_R(x,y)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \sum I_G(x,y) \\ \max\{I_G(x,y)\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

수식 (6)에서 계수  $\mu$ 와  $\nu$ 는 가우시안 소거법 또는 Cramer의 법칙과 같은 방법을 이용하여 구할 수 있다. CGWR은 수식 (5)와 (6)의 과정을 R, B 채널에 적용하여 각 채널을 보정한다. 그림 1의 CGWR의 결과 영상에서 전체적으로 색 바랜 영상의 경우 CGWR이 잘 보

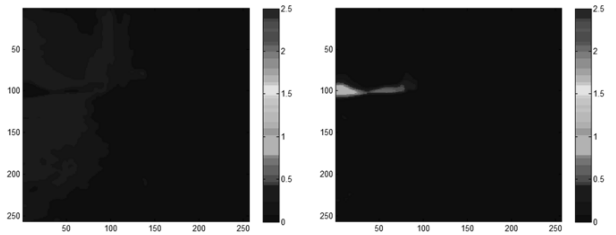


그림 2. 그림 1(c)에 대한 CybCrg 변환 영상 및 분류맵, (a) 분류맵, (b) Cyb 영상, (c) Crg 영상

Fig. 2. LCyBCrg color values from Fig. 1(c). (a) L image, (b) Cyb image, (c) Crg image.



(a)



(b)

(c)

그림 3. 그림 1(c)에 대한 가중치  $w$ , (a) Red, (b) Green, (c) Blue

Fig. 3. Weights  $w$  from Fig. 1(c). (a) Red, (b) Green, (c) Blue.

정됨을 알 수 있다. 그러나 그림 1(d)와 같이 부분적으로 색 바랜 영상의 경우 CGWR을 이용해 추정된 계수가 오른쪽 아래의 붉은 부분을 보정하기 위해 B 채널에 대한 보정 계수가 높아 영상의 왼쪽 부분이 오히려 더 푸르게 나타난다.

색 바랜 영상은 그 원인이 수식 (1)에서 나타나는 영상 획득 모델과 달리 염료 및 종이의 물리적인 요소로서 시간에 따라 각각의 염료 및 종이의 특성과 함께 다르게 변화한다<sup>[1,2]</sup>. 이는 WR이 가지는 가정이 실제 색 바랜 영상에는 맞지 않음을 보인다. 즉, 색 바랜 영상에서 가장 밝은 부분은 염료의 비중이 가장 적기 때문에 색 바랜 현상도 가장 적게 나타난다. 이것으로 인해 WR을 바랜 색 보정에 적용하기에는 적합하지 않다.

### III. 제안한 영역별 바랜 색 보정 방법

본 논문에서는 LCybCrg 색 공간을 이용한 분리적인 색 바랜 영상 보정 방법을 제안한다. LCybCrg 색 공간은 보색 공간으로서 색도에 대한 각각의 축이 완전히 직교하는 공간이다<sup>[6]</sup>. 이를 이용하여 입력 색 바랜 영상에 대한 분류맵을 생성한다. 그리고 분류된 영역별 색도 추정 및 보정을 수행한다.

#### 1. 분류맵의 생성

지역적 바랜 색도 추정을 위해 분류맵을 생성한다. 이는 바랜 영상에서 동일한 색은 물리적으로 동일한 색 바랜 현상이 일어난다는 가정을 기반으로 한다. 그래서 유사한 색을 가지는 영역들을 분리하고 이를 이용해 바랜 색도를 추정하기 위함이다. 분류맵을 생성하기 위해, 먼저 입력 영상이 가지는 노이즈의 영향을 줄이기 위한 RGB 각 채널에 가우시안 필터를 통과한 영상  $R_i$ 를 구한다. 이를 LCybCrg<sup>[6]</sup> 색 공간으로 변환한 후 CybCrg 색 좌표 값을 기준으로 색도 분류 맵을 생성한다. 이때, 각 픽셀에 대해 8bit의 공간을 할당하고 각각의 색도 축에 대한 비트를 할당하여 각각의 픽셀이 어떠한 색도를 가지는지 정의 한다. 표 1에서와 같이 색도 분리 기준으로 분류맵을 생성하고 색도별 영역을 나눈다. 예를 들어, 하나의 화소에 대한 CybCrg 값을 CybCrg 평면에 표현하면 최소 2개의 색 좌표로서 표현된다. 이를 표 1의 8bit에서 해당하는 축에 1로 표시하고 나머지는 0으로 나타내어 분류맵을 생성한다. 이와 같이 분류맵을 생성하면 최대 4개의 색도로 구분 지을 수 있으며, 이는 LCybCrg<sup>[6]</sup> 색 공간이 각각의 축에 대해 완전히 직교하므로 이와 같은 표현이 가능하다. 그림 2(b), (c)는 가우시안 필터 후 CybCrg 변환 영상이며, 그림 2(a)는 색도 분류를 통해 생성된 분류맵이다.

표 1. CybCrg 값에 대한 bit 할당표  
Table 1. Assign bit table for CybCrg color values.

Y	-	B	-	R	-	G	-
1	0	1	0	1	0	1	0

#### 1. 영역에 따른 바랜 색도 추정 및 보정

바랜 색도를 추정하기 위해 분류맵을 통해 분류된 각 영역에 대해 불러된 영상을 이용한다. 이때, 가우시안

필터를 통과한 RGB 영상을 분류맵을 통해 각 영역별, 각 채널별 평균 색도를 계산한다. 이와 같이 평균을 이용한 색도 추정 및 보정은 GWA를 기반으로 하며, 이는 인쇄물의 색 바랜 현상은 WR은 만족할 수 없으나 GWA의 가정은 만족하기 때문이다.

$$I_{i,avg}(n) = \frac{1}{NP_n} \sum_{x=0}^{NP_n} I_i(x,y,n) \quad (7)$$

수식 (7)은 분류맵을 이용한 각 영역별 채널 평균값을 나타낸다.  $i$ 는 RGB 각 채널을 나타내며,  $I_{i,avg}(n)$ 은 분리된 각각의 영역  $n$ 에 대한 채널별 평균을 나타낸다. 그리고  $NP_n$ 은 분리된 영역들에 대해  $n$ 영역에 대한 총 화소수를 나타낸다. 수식 (7)을 통해 획득한 각 영역에 대한 채널 평균을 이용하여 수식 (8)과 같이 바랜 색 보정을 수행한다.

$$I'_i(x,y,n) = w_i(x,y) \frac{I_i(x,y,n)L_{avg}(n)}{I_{i,avg}(n)} \quad (8)$$

수식(8)에서  $I'_i(x,y,n)$ 은 보정된 결과 영상이며  $L_{avg}(n)$ 은 각각의 분리된 영역에 대한 밝기 평균이다. 기존의 CGWR에서는 G 채널을 밝기로서 변하지 않는다는 가정을 하였다. 본 논문에서는 변환된 LCybCrg에서  $L$  값을 밝기로서 보정 기준으로 사용했다. 또한  $w_i(x,y)$ 는 각각의 영역이 분리 적으로 색 보정이 수행되면서 발생하는 윤곽(contour) 현상을 줄이기 위해 사용된다.  $w_i$ 는 변환된 LCybCrg 값에서 Cr, Cg, Cb값을 정규화 한 값으로서 각각의 채널에 대한 가중치로 작용한다. 예를 들어, 붉은 영역에 대한 하나의 화소가 가지는 CybCrg 값은 Crg의 값이 양수로서 Red 값으로 나타나며 값의 크기는 붉은 정도를 의미한다. 이때, 분류맵을 통해 붉게 바랜 영역 내에서 붉은 영역의 정도에 따라 보정량이 달라져야 하므로 가장 붉은 영역은 가중치가 높아 보정 정도가 크고, 적게 바랜 영역은 가중치가 낮아 보정량이 낮게 된다. 그림 3은 각각의 RGB 채널에 대한  $w_i$ 값의 분포를 나타낸다.

### IV. 실험 및 결과

실험을 위하여 전체적으로 바랜 영상과 일부분만 바랜 영상을 사용하였다. 사용된 영상은 실제 사진이 오랜 시간 보관 되면서 색이 바래진 것을 스캔하여 획득



그림 4. 실험을 위한 입력 바랜 영상, (a)-(b) 전체적으로 바랜 입력영상, (c)-(d) 부분적으로 바랜 입력영상

Fig. 4. Input faded images for experiments (a)-(b) Wholly faded image, (c)-(d) Partially faded image.



그림 6. 그림 4(b)에 대한 결과영상, (a) GWA, (b) WR, (c) CGWR, (d) 제안한 방법

Fig. 6. Resulting images from Fig. 4(b). (a) GWA, (b) WR, (c) CGWR, (d) Proposed method.

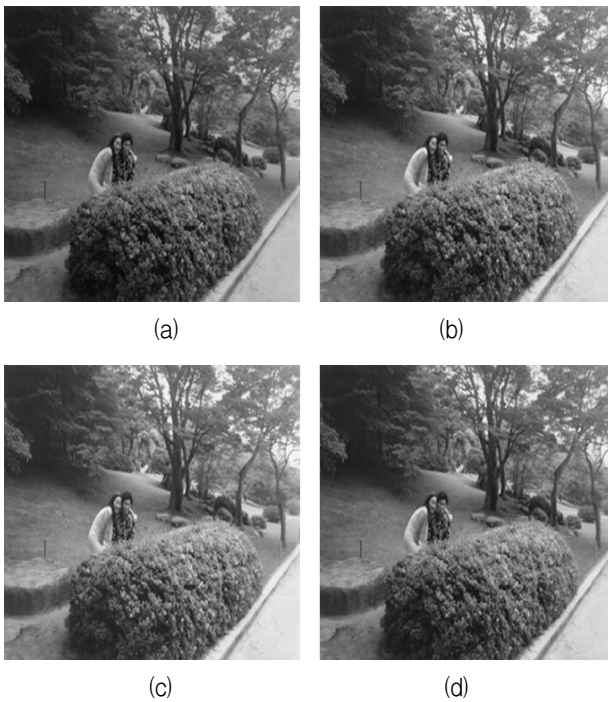


그림 5. 그림 4(a)에 대한 결과영상, (a) GWA, (b) WR, (c) CGWR, (d) 제안한 방법

Fig. 5. Resulting images from Fig. 4(a). (a) GWA, (b) WR, (c) CGWR, (d) Proposed method.

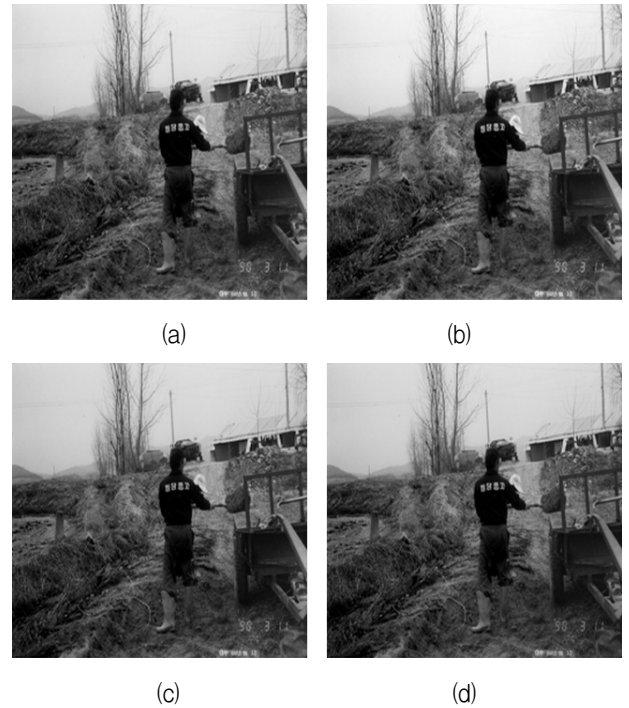


그림 7. 그림 4(c)에 대한 결과영상, (a) GWA, (b) WR, (c) CGWR, (d) 제안한 방법

Fig. 7. Resulting images from Fig. 4(c). (a) GWA, (b) WR, (c) CGWR, (d) Proposed method.

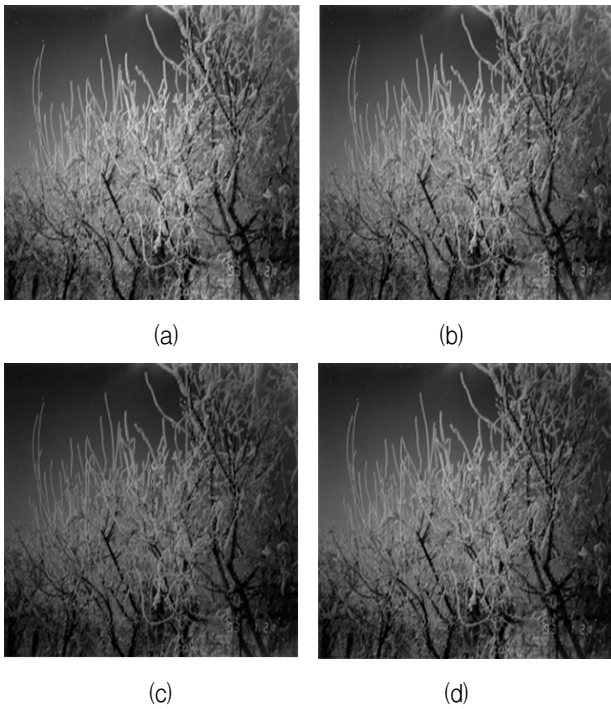


그림 8. 그림 4(d)에 대한 결과영상,  
(a) GWA, (b) WR, (c) CGWR, (d) 제안한 방법  
Fig. 8. Resulting images from Fig. 4(d). (a) GWA,  
(b) WR, (c) CGWR, (d) Proposed method.

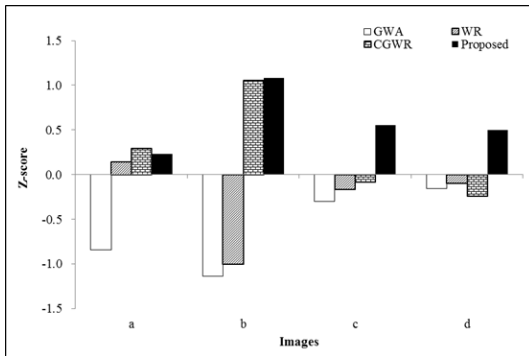


그림 9. 주관적 선호도 평가에 대한 Z-score 결과  
Fig. 9. Resulting z-score for subjective preference test.

한 영상이다. 그림 4는 실험에 사용된 영상을 나타낸다. 그림 5, 6에서 전체적으로 바랜 영상의 결과는 기존의 방법과 유사한 결과를 보인다. 특히 CGWR은 전체적으로 색 바랜 영상에서 다른 방법들에 비해 나은 성능을 보인다. 이에 반해 WR은 실험 영상들에서 정확한 보정 성능을 보이지 못했다. 이는 색 바랜 영상에서 가장 밝은 화소는 색 바랜 현상이 가장 작게 나타나기 때문으로 볼 수 있다. 그림 7, 8에서 지역적으로 색 바랜 영상에서 제안한 방법은 가장 좋은 성능을 보인다. 특히 그림 8에서 그림 4(c)의 입력영상에서 오른쪽에 붉게 나타나는 부분들이

다른 방법들에 비해 크게 개선됨을 보인다. 또한 그림 7(c)의 CGWR 결과에서처럼 영상의 왼쪽 부분이 오히려 더 푸르게 변하는 현상이 나타나지 않는다.

주관적인 선호도 평가를 위해 32명의 관찰자들이 실험에 동원되었다. 참가자들은 여자 8명, 남자 24명으로 24-40의 연령대로 구성되며, 보통의 시력을 가졌다. 또한 이중 8명은 칼라 영상처리에 지식이 있으며 24명은 일반인이다. Dugay<sup>[7]</sup>는 주관적 평가를 위해 모니터와 인쇄물의 2가지 매체를 사용하였으나, 본 실험에서는 모니터만 사용하였다.

Z-score<sup>[5]</sup>를 구하기 위하여 참가자들은 화면에 출력된 하나의 입력 영상과 두개의 결과 영상 쌍을 비교하여 선호 하는 영상에 점수를 주었다. 입력영상과 결과 영상들에 대해 입력영상의 바랜 색이 가장 자연스럽게 보정된 영상을 선택하도록 하였다. 그림 9는 선호도 조사를 통한 Z-score를 계산한 결과이다. 그 결과 전체적으로 색 바랜 영상에 대해서는 CGWR이 높은 선호도를 보임을 알 수 있다. 이것은 CGWR이 색 보정 과정을 수행함과 동시에 2차 함수로서 약간의 대비 향상을 가져왔기 때문이라 볼 수 있다. 또한 지역적으로 색 바랜 영상에 대해서는 제안한 방법이 높은 선호도를 보이는 것을 나타냈다. 제안한 방법의 분류맵을 통한 지역적 색상 보정이 지역적으로 색 바랜 영상에 대해서는 R, B 채널 사이의 이질감을 줄이며 높은 보정 성능을 보였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 색 바랜 영상의 보정을 위하여 LCybCrg 색 공간 기반의 분리적인 색 보정 방법을 제안한다. 색 바랜 영상은 일반적인 영상 획득 모델과 달리 서로 다른 염료의 물리적인 변화로 인해 지역적으로 다르게 변화하게 된다. 제안한 방법은 이러한 지역적 색도 보정을 위해 CybCrg 값을 이용한 분류맵을 생성하고 이를 통해 GWA 이론을 기반으로 하는 영역별 색도 추정 및 보정을 수행한다. 그 결과 전체적으로 색 바랜 영상에서는 기존의 방법과 유사한 결과를 보이며, 지역적으로 색 바랜 영상에서는 높은 보정 성능을 보였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Franziska S. Frey, Rudolf Gschwind, and Lukas Rosenthaler, "Electronic Imaging, a Tool for the Reconstruction of Faded Color Photographs and Motion Pictures," The Fourth Color Imaging Conference, pp. 39-44, 1996.
- [2] Henry Wilhelm, "A Review of Accelerated Test Methods for Predicting the Image Life of Digitally-Printed Photographs - Part II," International Conference on Digital Printing Technologies, pp. 664-669, 2004.
- [3] Marc Ebner, "Color Constancy," Published in Association with the Society for IS&T, 2007.
- [4] Edmund Y. Lam, "Combining Gray World and Retinex Theory for Automatic White Balance in Digital Photography," Proceedings of the 9th International Symposium on Consumer Electronics, pp. 134 - 139., 2005.
- [5] J. Morovic, "Color Gamut Mapping," Published in Association with the Society for IS&T, 2008.
- [6] Margarita Bratkova, Solomon Boulos, and Peter Shirley, "oRGB: A Practical Opponent Color Space for Computer Graphics," IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 29, no. 1, pp. 42-55, 2009.
- [7] Fabienne Duay, Lvar Farup, Jon Y. Hardeberg, "Perceptual Evaluation of Color Gamut Mapping Algorithms," Color Research and Application, vol. 33, no. 6, pp. 470-476, 2008.

## — 저 자 소 개 —

경 왕 준(학생회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 48권 SP 편 제 1호 참조

이 철 희(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 47권 SP 편 제 4호 참조

김 대 철(학생회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 48권 SP 편 제 1호 참조

하 영 호(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 38권 SP 편 제 3호 참조