

Shadow and Highlight Invariant Color Models

이자용*, 강훈**

중앙대학교 공과대학 전자전기공학부

Jayong Lee*, Hoon Kang**

School of Electrical & Electronic Engineering

Chung-Ang University

E-mail : *jalnans@sirius.cie.cau.ac.kr, **hkang@cau.ac.kr

Abstract

The color of objects varies with changes in illuminant color and viewing conditions. As a consequence, color boundaries are influenced by a large variety of imaging variables such as shadows, highlights, illumination, and material changes. Therefore, invariant color models are useful for a large number of applications such as object recognitions, detections, and segmentations.

In this paper, we propose invariant color models. These color models are independent of the object geometry, object pose, and illumination. From these color models, color invariant edges are derived. To show the validity of the proposed invariant color models, some examples are given.

I. 서론

카메라 등의 영상 장치를 이용하여 획득한 영상을 적절한 방식으로 처리하여 원하는 정보만을 추출하는 이미지 프로세싱 기술은 다양한 활용 분야와 탁월한 유용성으로 많은 분야에 사용되고 있다. 특히, 영상에 기반한 물체의 인식 및 추적, 위성이나 항공 사진의 분석, 영상 정보에 기반한 자동화 시스템 등의 최신 분야에서 주요 기술로 활용되고 있으며, 전체 시스템의 성능을 좌우하는 기반 기술로서 중요성이 부각되고 있다.

영상은 다른 어떤 센서값보다 다양한 정보를 제공하지만, 반대로 어떤 센서값보다도 불필요한 정보를 많이 포함하고 있다. 영상의 획득 과정에서 발생한 왜곡이나 그림자, 하이라이트(highlights) 같은 자연적으로 발생하는 장애 요소들은 이미지 프로세싱 과정에서 오차를 발생시키는 주요 원인으로서 반드시 해결해야 할 선행 과제이다. 환경의 변화에 강인하면서 동시에 일반적

으로 이미지 프로세싱에서 많이 사용되는 RGB 모델이나 Gray 모델을 대체할 수 있는 색상 모델이 있다면 전체 시스템의 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

본 논문에서는 색상값에 영향을 주는 카메라, 광원, 물체의 여러 요소를 포함하는 반사 모델로부터 색상 불변 모델의 일반식을 유도하고, 이를 이용하여 새로운 색상 불변 모델을 제안한다.

II. 색상 불변 (Invariant Color) 모델

본 절에서는 반사 모델을 이용하여 카메라의 위치, 물체 표면의 방향, 조명의 방향, 조명의 강도, 하이라이트에 독립적인 색상 모델을 제안한다.

2.1 반사 모델

물체의 색상은 광원에서 발산된 빛이 물체의 표면에 반사되어 카메라나 눈에 비치는 값으로 인지된다. 불투명한 물체의 표면에서 일어나는 반사는 물체 고유의 색을 반영하여 일어나는 반사(body reflection)와 광택이 있는 표면에 의해 일어나는 반사(surface reflection)로 나눌 수 있다.

입사광에 의해 물체의 표면 \vec{x} 에서 반사되는 빛의 강도 (spectral power distribution)을 $E(\vec{x}, \lambda)$ 라 하고, 물체의 기하학적인 위치와 관련된 변수를 $L(\vec{x}, \lambda)$ 라 하며, 빛에 대한 카메라의 민감도를 $F_k(\lambda)$ 라 하면, 카메라에 찍히는 영상의 값은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_k(\vec{x}) &= G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}) \int_{\lambda} E(\vec{x}, \lambda) B(\vec{x}, \lambda) F_k(\lambda) d\lambda \\ &+ G_S(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}, \vec{v}) \int_{\lambda} E(\vec{x}, \lambda) S(\vec{x}, \lambda) F_k(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

$\phi_k(\vec{x})$ 는 실제 카메라에 찍히는 영상의 값을 뜻한다. λ 는 빛의 파장을 나타내고, $B(\vec{x}, \lambda)$ 와 $S(\vec{x}, \lambda)$ 는 각각 표면 \vec{x} 에서의 반사계수(albedo)와 Fresnel 반사계수를 나타낸다. \vec{n} 는 표면의 normal vector 이며, \vec{s} 는 광원의 방향이고, \vec{v} 는 카메라의 방향이다. 물체의 반사와 관련된 기하학적인 변수는 각각 G_B 와 G_S 로 표현된다.

2.1 백색광에서의 반사

반사가 NIR(neutral interface reflection) 모델[Fresnel 반사계수가 빛의 파장에 관계없이 동일한 값을 갖는 모델]과 백색광(White Illumination)에 의해 이루어진다고 가정하면, Fresnel 반사계수와 반사되는 빛의 강도는 $S(\vec{x}, \lambda) = S(\vec{x})$, $E(\vec{x}, \lambda) = E(\vec{x})$ 가 된다. 따라서 식 (1)을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega_k(\vec{x}) &= G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}) E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_k(\lambda) d\lambda \\ &+ G_S(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}, \vec{v}) E(\vec{x}) S(\vec{x}) F \end{aligned} \quad (2)$$

NIR 모델과 백색광에서의 반사 모델인 식(2)를 이용하여 색상 불변(Invariant Color) 모델을 유도할 수 있다.

2.3 색상 불변 모델 [Body Reflectance Invariance]

식(2)에서 물체 고유의 색을 반영하여 일어나는 반사(body reflection) 부분은 다음과 같다.

$$\beta_k(\vec{x}) = G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}) E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_k(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$\beta_k(\vec{x})$ 는 각각의 센서에 의해 카메라에 찍히는 영상의 body reflection 값이며, 일반적으로 R, G, B 같은 값들을 뜻한다. RGB 색상 모델을 식(3)을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$R_b(\vec{x}) = G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}) E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_R(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$G_b(\vec{x}) = G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}) E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_B(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$B_b(\vec{x}) = G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}) E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_B(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

물체 표면의 특정위치 \vec{x} 에서의 반사에 의해 발생하는 body reflection 값을 이용하여 다음과 같이 간단한 식으로 유도할 수 있다.

$$\frac{\beta_i(\vec{x})}{\beta_j(\vec{x})} = \frac{\beta_i}{\beta_j} = \frac{G_B(\vec{n}, \vec{s}) E \int_{\lambda} B(\lambda) F_i(\lambda) d\lambda}{G_B(\vec{n}, \vec{s}) E \int_{\lambda} B(\lambda) F_j(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{\lambda} B(\lambda) F_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} B(\lambda) F_j(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

식(7)에서 유도된 값은 표면의 반사계수와 각 센서의 민감도를 나타내는 계수에만 영향을 받고, 카메라의 방향이나 표면의 normal vector, 광원의 방향, 광원의 강도에는 영향을 받지 않는다. 식(4)~(6)를 식(7)에 적용하여 일반화 시키면 다음과 같은 body reflection에 대한 색상 불변 모델의 일반식을 얻을 수 있다.

$$C(R_b, G_b, B_b) = \frac{\sum_i a_i (R_b)_i^p (G_b)_i^q (B_b)_i^r}{\sum_j b_j (R_b)_j^s (G_b)_j^t (B_b)_j^u} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} p+q+r &= s+t+u & p, q, r, s, t, u &\in \mathfrak{R} \\ i, j &\geq 1 & a_i, b_j &\in \mathfrak{R} \end{aligned}$$

NIR 모델과 백색광에서의 반사라는 가정하에 식(8)의 조건을 만족하는 색상 모델은 카메라의 방향이나 표면의 normal vector, 광원의 방향, 광원의 강도에는 영향을 받지 않는 색상 불변 모델이 된다. 증명은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C(R_b, G_b, B_b) &= \frac{\sum_i a_i (R_b)_i^p (G_b)_i^q (B_b)_i^r}{\sum_j b_j (R_b)_j^s (G_b)_j^t (B_b)_j^u} \\ &= \frac{\sum_i a_i (G_B(\vec{n}, \vec{s}) EK_R(\lambda))_i^p (G_B(\vec{n}, \vec{s}) EK_G(\lambda))_i^q (G_B(\vec{n}, \vec{s}) EK_B(\lambda))_i^r}{\sum_j b_j (G_B(\vec{n}, \vec{s}) EK_R(\lambda))_j^s (G_B(\vec{n}, \vec{s}) EK_G(\lambda))_j^t (G_B(\vec{n}, \vec{s}) EK_B(\lambda))_j^u} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sum_i a_i (G_B(\vec{n}, \vec{s})E)^{p+q+r} (K_R(\lambda))_i^p (K_G(\lambda))_i^q (K_B(\lambda))_i^r}{\sum_j b_j (G_B(\vec{n}, \vec{s})E)^{s+t+u} (K_R(\lambda))_j^s (K_G(\lambda))_j^t (K_B(\lambda))_j^u} \\
 &= \frac{\sum_i a_i (K_R(\lambda))_i^p (K_G(\lambda))_i^q (K_B(\lambda))_i^r}{\sum_j b_j (K_R(\lambda))_j^s (K_G(\lambda))_j^t (K_B(\lambda))_j^u} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$K_C(\lambda) = \int_{\lambda} B(\lambda) F_C(\lambda) d\lambda$$

2.4 색상 불변 모델 [Body & Surface Reflectance Invariance]

2.3 절에서 유도한 색상 불변 모델의 일반식은 body reflection 에 대한 반사만을 고려하고 있다. 2.3 절의 색상 불변 모델은 광택이 있는 표면에서의 반사로 인해 발생하는 하이라이트 같은 효과에는 영향을 받는다.

물체 표면의 특정위치 \vec{x} 에서의 반사 모델을 이용하여 다음과 같이 간단한 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\omega_i(\vec{x}) - \omega_j(\vec{x})}{\omega_k(\vec{x}) - \omega_l(\vec{x})} = \frac{\omega_i - \omega_j}{\omega_k - \omega_l} \quad (\omega_k \neq \omega_l) \quad (10)$$

식(2)를 식(10)에 적용하여 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{(G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_i(\lambda) + G_S(\vec{n}, \vec{s}, \vec{v})ESF) - (G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_j(\lambda) + G_S(\vec{n}, \vec{s}, \vec{v})ESF)}{(G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_k(\lambda) + G_S(\vec{n}, \vec{s}, \vec{v})ESF) - (G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_l(\lambda) + G_S(\vec{n}, \vec{s}, \vec{v})ESF)} \\
 &= \frac{(G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_i(\lambda)) - (G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_j(\lambda))}{(G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_k(\lambda)) - (G_B(\vec{n}, \vec{s})EK_l(\lambda))} \\
 &= \frac{G_B(\vec{n}, \vec{s})E(K_i(\lambda) - K_j(\lambda))}{G_B(\vec{n}, \vec{s})E(K_k(\lambda) - K_l(\lambda))} = \frac{K_i(\lambda) - K_j(\lambda)}{K_k(\lambda) - K_l(\lambda)} \quad (11)
 \end{aligned}$$

식(11)에서 유도된 값은 2.3 절에서 유도한 모델과 마찬가지로 반사계수와 각 센서의 민감도를 나타내는 계수에만 영향을 받고, 카메라의 방향이나 표면의 normal vector, 광원의 방향, 광원의 강도에는 영향을 받지 않는다. 다른 점은 하이라이트 같은 surface reflection 에 의한 영향도 받지 않는다는 점이다.

RGB 색상 모델을 식(2)를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_{\omega}(\vec{x}) &= G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s})E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_R(\lambda) d\lambda \\
 &\quad + G_S(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}, \vec{v})E(\vec{x})S(\vec{x})F \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_{\omega}(\vec{x}) &= G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s})E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_G(\lambda) d\lambda \\
 &\quad + G_S(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}, \vec{v})E(\vec{x})S(\vec{x})F \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{\omega}(\vec{x}) &= G_B(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s})E(\vec{x}) \int_{\lambda} B(\vec{x}, \lambda) F_B(\lambda) d\lambda \\
 &\quad + G_S(\vec{x}, \vec{n}, \vec{s}, \vec{v})E(\vec{x})S(\vec{x})F \quad (14)
 \end{aligned}$$

식(12)~(14)를 이용하여 식(11)을 일반화시키면 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L(R_{\omega}, G_{\omega}, B_{\omega}) &= \frac{\sum_i a_i (R_{\omega} - G_{\omega})_i^p (B_{\omega} - R_{\omega})_i^q (G_{\omega} - B_{\omega})_i^r}{\sum_j b_j (R_{\omega} - G_{\omega})_j^s (B_{\omega} - R_{\omega})_j^t (G_{\omega} - B_{\omega})_j^u} \quad (15) \\
 p+q+r &= s+t+u & p, q, r, s, t, u &\in \mathfrak{R} \\
 i, j &\geq 1 & a_i, b_j &\in \mathfrak{R}
 \end{aligned}$$

NIR 모델과 백색광에서의 반사라는 가정하에 식(15)의 조건을 만족하는 색상 모델은 카메라의 방향이나 표면의 normal vector, 광원의 방향, 광원의 강도에는 영향뿐만 아니라 하이라이트 같은 surface reflection 에 의한 영향도 받지 않는 색상 불변 모델이 된다. 증명은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L(R_{\omega}, G_{\omega}, B_{\omega}) &= \frac{\sum_i a_i (R_{\omega} - G_{\omega})_i^p (B_{\omega} - R_{\omega})_i^q (G_{\omega} - B_{\omega})_i^r}{\sum_j b_j (R_{\omega} - G_{\omega})_j^s (B_{\omega} - R_{\omega})_j^t (G_{\omega} - B_{\omega})_j^u} \\
 &= \frac{\sum_i a_i (G_B(\vec{n}, \vec{s})E)^{p+q+r} (K_R(\lambda) - K_G(\lambda))_i^p (K_B(\lambda) - K_R(\lambda))_i^q (K_G(\lambda) - K_B(\lambda))_i^r}{\sum_j b_j (G_B(\vec{n}, \vec{s})E)^{s+t+u} (K_R(\lambda) - K_G(\lambda))_j^s (K_B(\lambda) - K_R(\lambda))_j^t (K_G(\lambda) - K_B(\lambda))_j^u} \\
 &= \frac{\sum_i a_i (K_R(\lambda) - K_G(\lambda))_i^p (K_B(\lambda) - K_R(\lambda))_i^q (K_G(\lambda) - K_B(\lambda))_i^r}{\sum_j b_j (K_R(\lambda) - K_G(\lambda))_j^s (K_B(\lambda) - K_R(\lambda))_j^t (K_G(\lambda) - K_B(\lambda))_j^u} \quad (16) \\
 K_k(\lambda) &= \int_{\lambda} B(\lambda) F_k(\lambda) d\lambda
 \end{aligned}$$

III. 실험 결과 및 분석

색상 불변 모델의 유용성을 검증하기 위해 일반적으로 폭넓게 사용되는 이미지 프로세싱 기법인 윤곽선

검출(edge detection)을 이용한 실험을 하였다.

실험에 사용된 색상 불변 모델은 2.3 절의 일반식을 만족하는 식(17)과 2.4 절의 일반식을 만족하는 식(18)의 평균값으로 계산하였다.

$$C = \frac{\min(R, G, B)}{R + G + B - \min(R, G, B)} \quad (17)$$

$$L = \frac{\min(|R-G|, |B-R|, |G-B|)}{|R-G| + |B-R| + |G-B| - \min(|R-G|, |B-R|, |G-B|)} \quad (18)$$

$$R_{ICM} = \frac{C + L}{2} \quad (19)$$

윤곽선 검출에는 Laplacian 마스크를 사용하였으며, 색상 불변 모델과 Gray 모델로 변환된 이미지에 각각 윤곽선 검출을 하여 그 결과 영상을 비교해 보았다. 실험 결과는 그림 1~2에 나타내었다.

그림 1은 밝은 조명하에서 그림자와 하이라이트가 모두 발생한 영상을 이용한 결과이다. 색상 불변 모델의 경우에는 물체의 윤곽선이 뚜렷하고 하이라이트의 영향은 줄어든 반면, Gray 모델의 경우에는 윤곽선이 정확하지 않고 하이라이트 부분은 상대적으로 뚜렷이 나타나는 점을 확인할 수 있다.

그림 2는 어두운 조명하에서의 영상을 이용한 결과이다. 그림 1의 경우와 같이 Gray 모델의 경우에는 뚜렷하게 나타난 하이라이트가 색상 불변 모델의 경우에는 거의 제거된 것을 알 수 있다.

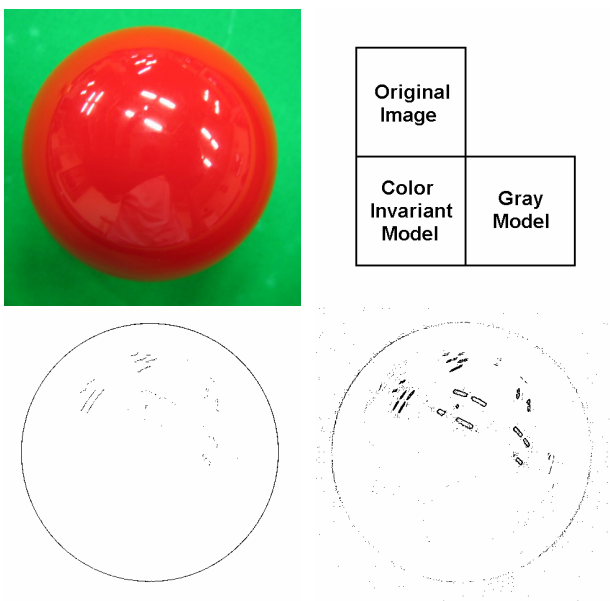


그림 1 Test Images (Red Ball)

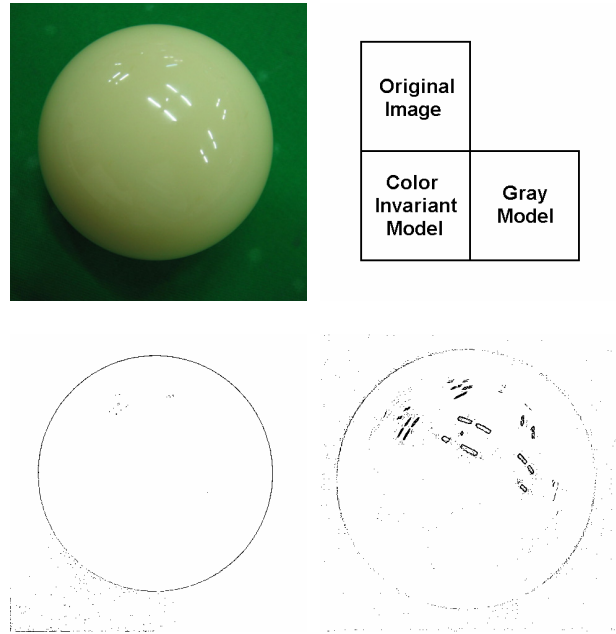


그림 2 Test Images (White Ball)

V. 결론

본 논문에서는 카메라의 방향이나 물체 표면의 normal vector, 광원의 방향, 광원의 강도에 영향을 받지 않는 색상 불변(Invariant Color) 모델을 제안하고 있다. 윤곽선 검출을 이용한 실험에서 제안된 색상 모델이 기존의 색상 모델에 비해 그림자나 하이라이트에 강인하다는 사실을 확인할 수 있다. 색상 불변 모델은 기존의 RGB 모델이나 Gray 모델을 대체하여 이미지 프로세싱 시스템 전체의 성능을 향상시킬 수 있는 획기적인 방법이 될 것이다.

참고문헌

- [1] T. Gevers, "Classifying Color Edges in Video Into Shadow-Geometry, Highlight, or Material Transitions", IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 5, No. 2, June 2003.
- [2] T. Gevers and A. W. M. Smeulders, "PicToSeek: Color and Shape Invariant Features for Image Retrieval", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 9, No. 1, Jan 2000.
- [3] S.A.Shafer, "Using color to separate reflection componts", Color Res. Appl., Vol 10, Mar 1999
- [4] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing. Addison Wesley, 1993.