

論文2001-38SP-4-8

최대 무채색 영역을 이용한 광원의 분광분포 추정

(Estimation of Spectral Distribution of Illumination Using Maximum Achromatic Region)

金煥樹*, 金允泰*, 李澈熙**, 河永浩*

(Hee-Soo Kim, Yun-Tae Kim, Cheol-He Lee, and Yeong-Ho Ha)

요약

본 논문에서는 단일 영상에 포함된 광원의 분광분포를 추정하는 광원추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 광원 추정 방법은 두 단계로 이루어져 있다. 첫째, 변형된 회색계 가정(modified gray world assumption)을 이용하여 부분적으로 광원의 영향을 배제한 후 밝으면서도 무채색에 가까운 최대 무채색 영역을 찾아 그 영역의 표면 분광 반사율을 구한다. 이때 최대 무채색 영역의 표면 분광 반사율은 1269개의 Munsell 색 표본에 대하여 주성분 분석 방법을 이용하여 추정하였다. 둘째, 주어진 Munsell 색 표본과 대표 광원의 조합으로 반사광의 모집단을 만들었다. 다음 최대 무채색 영역의 각 화소와 반사광 모집단과의 색차를 비교하여 최대 무채색 영역과 색차가 가장 적은 반사광 표본을 선택하고 이를 최대 무채색 영역에 대한 반사광의 분광분포로 정의한다. 최종적으로 최대 무채색 영역의 반사광 분광분포를 해당하는 표면 분광반사율로 나누어 줌으로써 영상에 포함된 광원의 분광분포를 추정한다. 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 유색 광원에 조명된 영상에 대한 광원 추정 실험을 하였으며 기존의 방법과 추정된 광원의 분광 분포 비교 및 색차 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다.

Abstract

This paper proposes an illuminant estimation algorithm that estimates the spectral power distribution of an incident light source from a single image. The proposed illumination recovery procedure has two phases. First, the surface spectral reflectances are recovered in the maximum achromatic region (MAR) which is the most achromatic and highly bright region of an image after removing partially the effect of illumination using a modified gray world algorithm. Here, the surface reflectances of MAR are estimated using the principal component analysis method along with a set of given 1269 Munsell samples. Second, the population of reflected lights is determined with 1269 Munsell samples and a set of illuminations then the spectral distribution of reflected lights of MAR is selected from the spectral database. That is, color differences are compared between the reflected lights of the MAR and the spectral database, which is the set of reflected lights built by the given set of Munsell samples and illuminants. Then the closest colors from the spectral database are selected. Finally, the illuminant of an image can be calculated dividing the average spectral distributions of reflected lights of MAR by the average surface reflectances of the MAR. In order to evaluate the proposed algorithm, experiments with artificial scenes, which are exposed to chromatic illuminants, were performed and the spectral distribution of estimated illumination and color difference are compared with results of the conventional method.

* 正會員, 경운대학교 컴퓨터공학부
(Department of Computer Engineering, Kyungwoon Univ.)

(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字:2000年2月14日, 수정완료일:2001年2月23日

** 正會員, 慶北대학교 電子電氣컴퓨터공학부

I. 서론

색 항상성(color constancy)은 주변 조명의 변화에 대하여 독립적으로 물체의 고유색을 인지하는 인간 시각 특성(human visual characteristic)중의 하나이다. 이 특성은 주위 조명색의 변화에 적응적인 인간 시각의 색순응 현상으로 설명될 수 있으며, 이러한 인간의 색 항상성에 대한 초기 연구는 19세기까지 거슬러 올라간다. 색 항상성 현상의 초기 모델로는 von Kries는 coefficient rule^[1]이 있다. Coefficient rule은 광원에 대한 L,M,S 시세포의 독립적인 감도 변화로 설명될 수 있다. 즉 유색 광원에 조명될 경우 유색 광원의 주된 파장에 민감한 시세포의 감도가 다른 시세포에 비해 독립적으로 낮아짐으로 광원의 변화에도 불구하고 동일한 색으로 인지된다는 가설이다.

von Kries의 가설 이후 색 항상성에 대한 주된 연구로는 Land^[2]의 retinex 이론을 들 수 있다. Retinex 이론은 한 장면의 적색, 녹색 및 청색 세 채널의 영상들이 각기 독립적으로 처리되며, 주위 광원은 공간상에서 서서히 변화한다는 가정을 전제로 한다. Land는 광원의 변화에 대한 한 화소의 밝기 값과 각 프레임 밝기 값 평균의 비가 일정하다는 가정을 바탕으로 균일한 광원이 가해졌을 때 경로를 따라 광원에 대한 독립적인 색 기술자(descriptor)를 만들어 밝혀냈다. Land의 retinex이론에서 중요한 것은 경로의 결정으로서 초기 Land의 실험은 표면 반사 계수를 알고 있는 Mondrian patch를 이용하였으므로 경로의 결정이 비교적 용이하였으나, 무수히 많은 표면 반사 계수를 가지는 실 영상에 대해 적용할 경우, 그 경로의 결정이 어려운 단점이 있다.

Retinex이론 이후 물체들의 분광 반사율을 근사화하여 분광 분포에 기반하여 색을 기술 하는 선형 모델이 Cohen^[3], Maloney, Wandell^[4] 등에 의해 제안되었다. 그리고 이 선형 모델은 좀 더 효율적이며 또한 저 차원으로 표면 분광 반사율과 광원의 분광 분포를 표현하기 위해 응용되어 왔다. 이러한 접근의 주요한 방향은 분광 반사율 데이터 집합을 표현하는데 얼마나 많은 기저함수가 필요한지에 대한 해답을 찾는 데 초점을 맞추었으며 많은 연구자에 의해 표면 분광 반사율과 광원을 유한한 개수를 갖는 기저함수의 선형 조합으로 정확하게 나타낼 수 있다고 증명되어졌다.

Maloney와 Wandell^[4]은 선형 모델의 자유도보다 많은 수광체가 있다는 조건하에 영상 안에 있는 표면 분광 반사율을 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 이후 선형 모델은 표면 분광 반사율과 광원의 분광분포의 곱으로 된 색 신호로부터 표면 분광 반사율과 광원의 분광 분포를 분리하는 영역에 응용되어져 왔다. Forsyth^[5]는 Maloney-Wandell 알고리즘의 확장된 개념으로 색 항상성 알고리즘을 개발했는데, 광원의 선형 모델에 사용된 Maloney-Wandell의 수광체 개수로 더 많은 인자를 복원할 수 있다는 것을 보여 주었다. D'Zmura^[6]는 영상 내에 거울 반사가 존재할 때 일정한 색 기술자를 복원하는 방법과 Maloney-Wandell 방법을 기반으로 색을 정확하게 복원할 수 있는 방법을 제안했는데, 하나의 장면에 대해 다른 광원 아래에서 얻은 2개 또는 그 이상의 영상이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 선형 모델을 기반으로 최대 무채색 영역의 표면 분광 반사율과 최대 무채색 영역에서 반사되는 반사광의 분광 분포를 이용하는 효율적인 광원 추정 알고리즘을 제안한다. 최대 무채색 영역을 구하기 위해 변형된 회색계 가정을 사용하고 최대 무채색 영역 내의 화소에 대하여 반사광의 분광분포를 추정한다. 이때 최대 무채색 영역의 표면 분광 반사율은 1269개의 Munsell 색 표본에 대하여 주성분 분석 방법을 이용하여 추정하였다. 다음, 주어진 Munsell 색 표본과 대표 광원의 조합으로 반사광의 모집단을 만든 후 최대 무채색 영역에 해당하는 각 화소와의 색차를 비교하여 최대 무채색 영역과 색차가 가장 적은 반사광 표본을 선택하여 이를 최대 무채색 영역에 대한 반사광으로 정의한다. 최종적으로 광원의 분광 분포는 최대 무채색 영역의 반사광 분광분포를 해당하는 표면 분광반사율로 나누어줌으로써 얻어진다. 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 유색 광원에 조명된 영상에 대한 광원 추정 실험을 하였으며 기존의 방법과 추정된 광원의 분광 분포 비교 및 색차 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다.

결과 제안된 방법이 추정된 분광 분포의 유사도와 색차 비교 모두에서 기존의 방법에 비해 우수함을 확인할 수 있었다.

II. 제안한 광원추정 알고리즘

카메라에 의해 획득된 영상은 물체의 표면 분광 반사율과 주변 광원 그리고 카메라의 전달함수의 곱으로 이루어진다. 이때 물체로부터 반사되는 카메라 입사광의 분광분포는 선형 모델에 의해 식 (1)과 같이 광원 $E(\lambda)$ 와 표면 분광 반사율 $R(\lambda)$ 을 이용하여 표현될 수 있다.

$$L(\lambda) = E(\lambda)R(\lambda) \quad (1)$$

따라서, 광원의 분광분포 추정은 반사광으로부터 파장별로 광원과 표면 분광 반사율을 분리하는 것으로 표현할 수 있다.

Cheng^[7]은 최근 그의 논문에서 두 가지 단계로 광원을 추정하는 방법을 발표했다. 첫째, 식 (2)와 같이 표면 분광 반사율이 최대인 영역으로부터 반사되는 광원은 카메라 혹은 인간의 시각으로 입사되는 최대 입사광이 되며 이러한 영역은 주어진 영상에서 광원에 대한 정보를 가장 많이 포함하고 있다는 것이다.

$$L_{\max}(\lambda) = E(\lambda)R_{\max}(\lambda) \quad (2)$$

따라서 식 (2)의 $R_{\max}(\lambda)$ 와 $L_{\max}(\lambda)$ 를 각각 구하게 되면 임의의 영상에서 광원이 균일하게 입사된다는 가정 하에서 식 (3)과 같이 광원의 분광 분포를 추정할 수 있다.

$$\hat{E}(\lambda) = \frac{L_{\max}(\lambda)}{R_{\max}(\lambda)} \quad (3)$$

이때 Cheng의 경우 $L_{\max}(\lambda)$ 는 입력 영상과 반사광의 모집단으로부터 구한 기저함수의 선형모델로 구해지고 $R_{\max}(\lambda)$ 는 이상적인 백색 가정을 이용하여 계산된다.^[7] 이때 광원의 분광 분포에 대한 정확한 추정을 위해서는 $L_{\max}(\lambda)$ 와 $R_{\max}(\lambda)$ 의 계산이 매우 중요하다. 그런데 Cheng의 경우 $R_{\max}(\lambda)$ 는 최대 삼자극치, $q=[1 \ 1 \ 1]$ 로부터 계산되기 때문에 $R_{\max}(\lambda)$ 는 입력 영상에 상관없이 고정된 값이다. 즉 입력 영상은 이상적인 백색을 가지고 있다는 기본 전제를 가지고 출발하는 것이다. 하지만 입력 영상이 이상적인 백색을 항상 가지고 있는 경우는 매우 드물다. 따라서 이상적인 백색을 가지고 있지 않는 영상에 대해서는 Cheng의 방법이 정확도가 떨어지게 된다.

따라서 본 연구에서는 Cheng의 방법에서 고정된, $R_{\max}(\lambda)$ 의 가정을 영상에 대하여 적응적으로 변화시킴

으로써 이상적인 백색이 없는 경우에도 광원의 분광 분포를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

제안한 방법은 크게 최대 무채색 영역을 이용하여 표면 분광 반사율을 구하는 부분과 반사광의 분광 분포를 구하는 부분으로 나누어 진다.

1. 최대 무채색 영역의 표면 분광 반사율 추정

식 (3)의 조건을 만족시키는 물체색을 영상으로부터 얻기 위한 조건으로서 매우 밝으면서 무채색에 가까운 영역을 찾았다. 즉 Cheng의 가정처럼 완전한 백색이 아니더라도 영상의 광원을 추정하기 위하여 $L_{\max}(\lambda)$ 와 $R_{\max}(\lambda)$ 모두 영상의 동일한 영역으로부터 얻는 방법을 제안하였다. 광원을 모른다는 가정 하에서 표면분광 분포를 얻기 위하여 입력 영상에서 광원의 성분을 어느 정도 제거하기 위한 방법으로 변형된 회색계 가정을 적용하였다. 즉 입력 영상의 각 채널의 평균을 이용하여 원래의 RGB입력값을 나누어 각 채널별로 광원의 변화를 제거하였다. 이때 채널의 평균을 구하는 과정에서 입력 영상의 무채색은 그대로 두고 유채색에 대해서만 회색계 가정^[8]을 사용하였다. 이는 영상이 전체적으로 너무 어두울 경우 작은 평균값으로 인한 색포화도의 저하를 막기 위함이다. 무채색과 유채색을 구분하기 위해서 다른 색 좌표계로 변환하지 않고 입력 영상의 RGB값에서 한 화소의 RGB 각각의 값의 차이가 10 이상 나면 유채색, 그 이하이면 무채색으로 간주하였다.

$$\begin{bmatrix} R'(i, j) \\ G'(i, j) \\ B'(i, j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{gray}}{R_m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{gray}}{G_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{gray}}{B_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(i, j) \\ G(i, j) \\ B(i, j) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$RGB_{gray} = \left(\frac{1}{2}\right) * RGB_{canonical} \quad (5)$$

$$R_m = E\{R(i, j)\}, \quad G_m = E\{G(i, j)\}, \quad B_m = E\{B(i, j)\} \\ \text{if } |C_k(i, j) - C_l(i, j)| \text{ for } k, l = R, G, B \text{ and } k \neq l > 10. \quad (6)$$

여기서, C_k 와 C_l 은 R, G, B 색 성분을 가지고 있는 색 벡터이다.

변형된 회색계 가정으로 입력 영상에 대해 광원의 영향을 어느 정도 배제시킨 후 식 (3)을 만족시키는 $R_{\max}(\lambda)$ 영역을 영상으로부터 찾는다. 즉 $R_{\max}(\lambda)$ 는 영상에서 최대 반사광을 갖는 영역이며 또한 가장 무채색에 가까운 영역이다. 따라서 본 논문에서는 이러한

영역을 최대 무채색 영역이라고 정의했다. 최대 무채색 영역을 찾기 위해 영상의 휘도와 색도를 분리하였다.

$$\begin{aligned} Y &= 0.299 * R' + 0.587 * G' + 0.114 * B' \\ C_b &= 0.577 * (B' - Y) \\ C_r &= 0.730 * (R' - Y) \end{aligned} \quad (7)$$

즉, 식 (7)을 이용하여 YCbCr 값으로 바꾼 다음 그림 1과 같이 7*7 창을 크기로 하여 영상에 대한 2차원 상 승적분을 한 후 색도 성분의 크기가 가장 작은 최대 무채색 영역을 찾는다.

여기서, 최대 무채색 영역이 매우 밝은 영역이 되어야 한다는 초기 가정을 유지하기 위하여 식 (8)과 같이 영상의 전체 휘도의 90%(실험적으로 구한 값)를 문턱치로 사용하였고 색도 성분의 크기가 최소인 영역을 찾는다.

$$\begin{aligned} \text{if } Y(i, j) > \text{Threshold,} \\ C(i, j) = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 C_b(i, j)^2 + C_r(i, j)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

상승 적분시 창의 크기로 7*7 블록을 사용한 이유는 입력 영상에 포함되어 있을 수도 있는 잡음과 거울 반사의 영향을 받지 않게 하기 위해서이다.

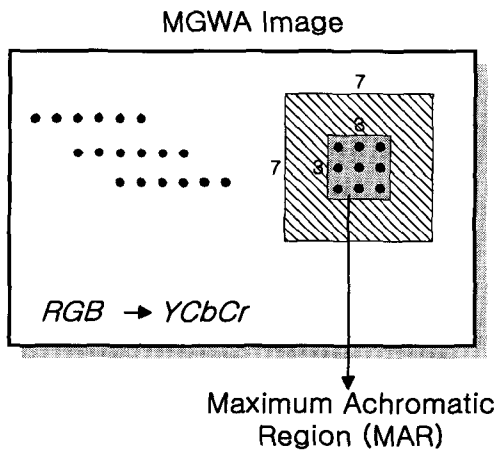


그림 1. 최대 무채색 영역
Fig. 1. Maximum achromatic region.

최대 무채색 영역의 스펙트럼을 추정하기 위해서는 주성분 분석을 이용하였다. 이때 분광분포를 찾는 영역은 7*7 블록에서 중심에 해당하는 3*3 블록에 한정한다. 주성분 분석을 이용한 분광분포 추정을 위해 입력 신호는 식 (9)와 같이 삼자극치로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.588 & 0.179 & 0.183 \\ 0.290 & 0.606 & 0.105 \\ 0.000 & 0.068 & 1.021 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (9)$$

주성분 분석 방법에 의하면 물체의 표면색은 다음과 같이 주성분으로 표현되는 3개의 고유벡터의 선형 조합으로 식 (10)처럼 나타낼 수 있다.

$$R(\lambda) \cong \bar{R}(\lambda) + \sum_{i=1}^3 a_i u_i = \bar{R}(\lambda) + [u_1 \ u_2 \ u_3] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이때 $\bar{R}(\lambda)$ 는 주성분 분석을 위해 사용된 물체색 모집단, 즉 1269 Munsell 표본의 평균 분광 반사율이고, u_i 는 고유벡터, 그리고 a_i 는 고유벡터에 해당하는 고유치이다. 따라서 각 영상의 화소에 대하여 최적 고유치를 찾음으로써 최대 무채색 영역의 9개 화소에 대한 분광 분포를 구할 수 있다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 1269개의 Munsell 색표본에 대한 3개의 주성분 벡터를 나타낸다.

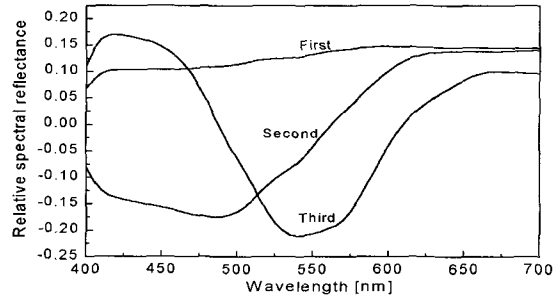


그림 2. 1269 Munsell 색표본에 대한 3개의 주성분 벡터
Fig. 2. Three eigenvectors of 1269 Munsell samples.

식 (10)의 3개 고유치를 얻는 과정은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix}^{-1} \left[\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} \right]. \quad (12)$$

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ 는 Munsell 색표본의 평균 분광분포의 삼자극치이고 X_i, Y_i, Z_i ($i=1,2,3$)는 Munsell 분광 반사율의 3개의 고유벡터에 해당하는 삼자극치이다. 또한 XYZ는 최대 무채색 영역의 9개 화소에 대한 삼자극치이다. 따

라서 식 (11)과 (12)로부터 얻은 고유치 a_1, a_2, a_3 를 식 (10)에 대입하면 최대 무채색 영역의 9개 화소에 대한 분광분포를 구할 수가 있다.

2. 반사광의 분광분포 추정

최대 무채색 영역에 대한 표면 분광 반사율을 구했으므로 반사광의 분광분포를 구하면 입력 영상의 광원을 추정할 수가 있다. 반사광의 분광분포를 얻는 과정은 반사광의 분광분포에 대한 모집단을 만든 후 이 모집단에서 최대 무채색 영역의 9개 화소에 대한 색차를 비교하여 가장 가까운 모집단의 표본을 선택하는 방법을 제안하였다. 식 (3)에서 $L_{max}(\lambda)$ 는 최대 무채색 영역에서 반사되는 반사광으로 추정되어지므로 물체색의 분광분포와 광원의 분광분포의 곱으로 모집단을 만들고 최대 무채색 영역과 색차 비교를 하여 가장 작은 색차를 가지는 표본을 선택하는 것이 바로 최대 무채색 영역에 대한 반사광의 분광분포를 추정하는 것이 된다.

표면 분광 반사율에 대한 모집단으로는 최대 무채색 영역의 표면 분광 반사율을 추정할 때와 동일한 Munsell 색표본 1269개를 사용하였고, 광원의 모집단으로는 국제 조명 학회에서 제안한 광원(A, C, D65, D50)과 임의로 생성한 광원(Green, Yellow)을 합쳐서 6개를 사용하였다. 그림 3은 실험에 사용된 6개의 광원의 분광전력분포를 보여주고 있다.

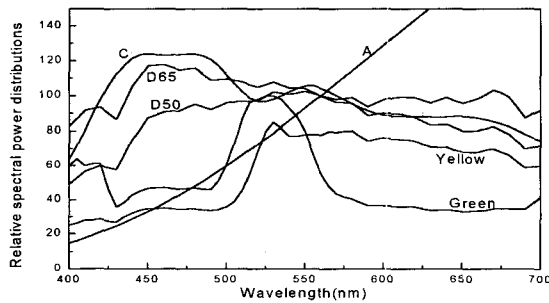


그림 3. 실험에 사용된 광원의 분광전력분포
Fig. 3. Spectral power distribution of chromatic illuminants.

최종적으로 구성된 반사광의 모집단은 1269개의 Munsell 색표본과 6개의 광원을 파장별로 곱하여 7614개의 반사광 분광분포를 구성하였다.

또한 색차 비교를 위해서는 균등 색공간인 CIELAB를 이용하였다. 모집단의 분광 데이터로부터 CIELAB

공간의 $L^*a^*b^*$ 값으로의 변환을 위하여 식 (13)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} L^* &= 116 f(Y/Y_n) - 16 \\ a^* &= 500 [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b^* &= 200 [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$f(\omega) = \begin{cases} \omega^{1/3} & \omega > 0.008856 \\ 7.787(\omega) + 16/116 & \omega \leq 0.008856 \end{cases}$$

이때 삼자극치를 먼저 얻는 과정에서는 k 값의 결정이 중요하다. 지금까지 RGB와 XYZ의 변환시 사용한 식(9)의 변환 행렬이 D65를 기준으로 한 것이므로 분광 분포 데이터로부터 XYZ의 변환시에도 식(14)와 같이 기준 백색의 삼자극치를 D65로 설정하여야 한다.

$$\begin{aligned} X &= k \sum \bar{x}(\lambda) E(\lambda) R(\lambda) \\ Y &= k \sum \bar{y}(\lambda) E(\lambda) R(\lambda) \\ Z &= k \sum \bar{z}(\lambda) E(\lambda) R(\lambda) \end{aligned} \quad (14)$$

$$k = \frac{100}{\sum \bar{y}(\lambda) D65(\lambda)}$$

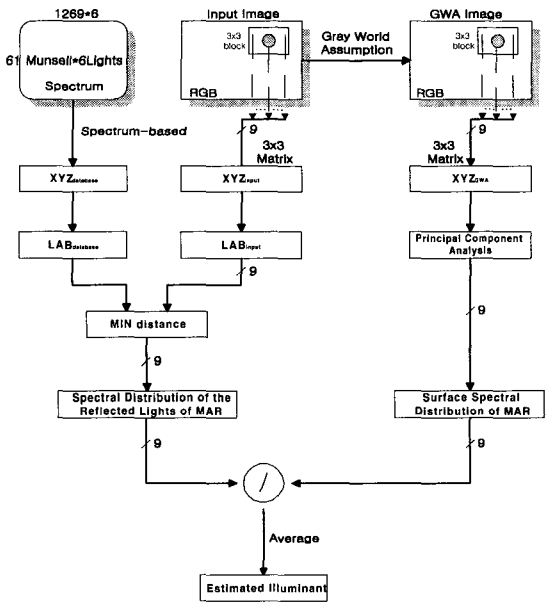


그림 4. 제안된 광원추정 알고리즘의 흐름도
Fig. 4. The flowchart of proposed illumination estimation algorithm.

이렇게 최대 무채색 영역의 RGB신호와 반사광의 모집단의 색공간을 CIELAB로 일치시킨 후 최대 무채색 영역의 9개 화소에 대한 반사광 모집단과의 색차 비교를 통하여 가장 색차가 적은 모집단의 표본 9개를 선

택한다. 이때 색차 계산은 식 (15)와 같다.

$$d = \sqrt{(L_{MAR} - L_d)^2 + (a_{MAR} - a_d)^2 + (b_{MAR} - b_d)^2}. \quad (15)$$

위와 같은 방법으로 MAR의 9개의 화소에 대해 각각, 표면 분광 반사율과 반사광의 분광분포를 구하여 9개의 광원을 각각 추정한 후, 9개의 분광 분포를 평균하여 입력영상에 대한 광원의 분광 분포로 정한다. 그림 4는 제안된 광원 추정 알고리즘의 전체 흐름도이다.

III. D65 광원으로의 영상 복원⁽⁷⁾

입력 영상에 포함되어 있는 광원의 분광전력분포를 추정하고 나면 추정된 광원의 정보를 이용하여 표준 광원에 의해 비쳐진 영상으로 행렬 변환을 이용하여 쉽게 복원할 수 있다.

인간 시각 체계가 3개의 독립된 수광체를 가지고 있다고 가정하면, 각 수광체의 반응은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_k = \int Q_k(\lambda)E(\lambda) \left[\sum_j r_j R_j(\lambda) \right] d\lambda \quad (16)$$

$$= \sum_j \left[r_j \int Q_k(\lambda)E(\lambda)R_j(\lambda) d\lambda \right].$$

$Q_k(\lambda)$ 는 각 수광체의 분광 감도 함수이다.

표면 분광 반사율의 3개의 고유벡터를 이용하여 각 수광체의 반응을 행렬식으로 나타내면 아래 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

$$b_{kj} = \int Q_k(\lambda)E(\lambda)R_j(\lambda) d\lambda. \quad (18)$$

또는

$$\mathbf{q} = \mathbf{B}\mathbf{r}. \quad (19)$$

입력 영상에 원래 포함되어 있는 광원하의 삼자극치의 세로 벡터를 \mathbf{q}_{orig} 로, 변환 매트릭스를 \mathbf{B}_{orig} 로 가정하면, 식 (19)는 다음의 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{B}_{orig}^{-1} \mathbf{q}_{orig}. \quad (20)$$

따라서 국제 조명 학회 표준 광원인 D65 하에서의 삼자극치는 아래의 식으로 계산할 수 있다.

$$\mathbf{q}_{D65} = \mathbf{B}_{D65} \mathbf{r} = (\mathbf{B}_{D65} \mathbf{B}_{orig}^{-1}) \mathbf{q}_{orig}. \quad (21)$$

이렇게 해서 구한 삼자극치를 이용하여 표준 광원하의 영상으로 재현하기 위해 식 (9)의 역변환 행렬식을 이용하여 다음 식과 같이 RGB 값으로 변환하게 된다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.971 & -0.549 & -0.297 \\ -0.954 & 1.936 & -0.027 \\ 0.064 & -0.129 & 0.982 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (22)$$

IV. 실험 및 결과

본 논문에서는 6개의 광원(A, C, D65, D50, Green, Yellow)에 대하여 광원 추정 실험을 수행했다. 그림 5~6은 광원에 의한 영상의 변화가 비교적 큰 A 광원과 Green에 대한 광원 추정 및 복원 영상이며 제안한 방법과 동일한 가정을 갖는 Cheng의 Maximum-Tri-stimulus-Value^[7] 방법과 광원의 추정성에 대한 비교를 하였다.

결과에서 볼 수 있듯이, 제안한 방법은 유색 광원에 의해 조명된 영상으로부터 광원의 분광분포를 잘 찾아내고 있음을 알 수 있다. 또한 Cheng의 방법과 비교할 경우 $R_{max}(\lambda)$ 에 대한 적응적인 추정으로 인하여 추정된 광원의 분광분포가 원 광원에 매우 근접함을 알 수 있다. 그러나 A광원으로 조명된 영상에 대해서는 장파장 영역에서의 분광분포가 원 광원과 차이를 보였다. 이러한 부정확은 선택한 광원의 종류, 반사광 모집단의 크기, 그리고 색차를 구하는 색공간과 밀접한 관계가 있으며 그 이유는 몇 가지로 유추해 볼 수 있다. 먼저 61개의 표본값으로 표현되는 분광분포의 색 정보를 CIELAB을 이용하여 3차원으로 표현했을 때 발생하는 정보의 손실을 들 수 있다. 즉 61개의 표본점을 갖는 분광분포로 표현했을 때는 서로 다른 형태를 보였지만 이것을 3차원으로 표현했을 때 같은 값으로 분류될 가능성이 있다. 또 다른 가정은 광원의 종류 및 모집단으로 사용하고 있는 표본의 크기이다. 즉 다양한 종류의 광원에 의해 조명되는 실 영상에 비해 상대적으로 적은 수의 광원을 사용하기 때문에 모집단의 색차의 간격이 크다. 특히 A 광원은 그 분광분포가 다른 광원과 차이가 크므로 모집단과의 색차 비교시 9개의 추정된 광원 중에 다른 광원에 의한 반사광이 하나라도 포함될 경우 이는 평균값에 큰 영향을 미치므로 장파장 영

역에서의 분광분포가 원 광원의 형태를 잘 추정하지 못하게 된다.

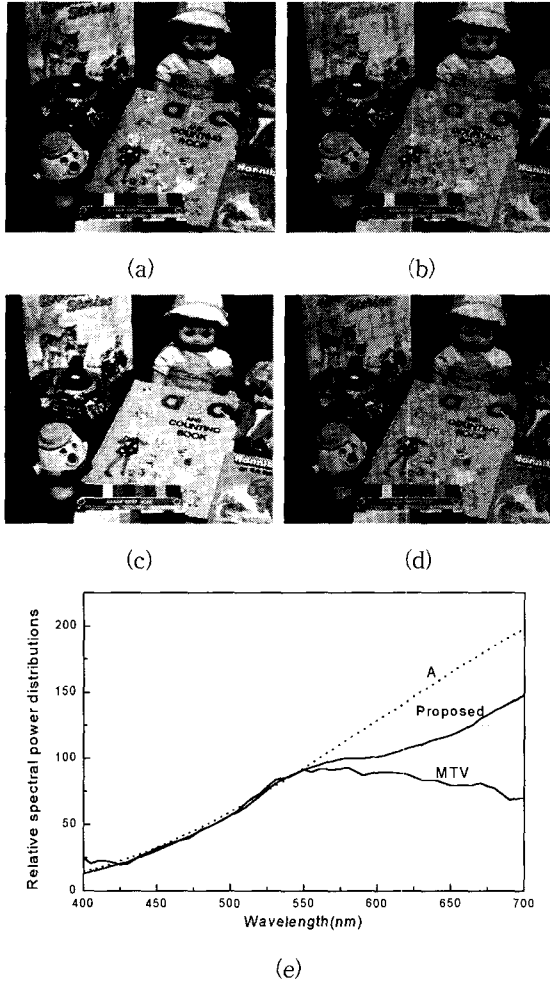


그림 5. (a) Toy 원영상 (b) A광원에 의해 조명된 영상 (c) Cheng의 Maximum-Tristimulus-Value 방법에 의한 영상 복원 (d) 개발된 광원추정 방법에 의해 복원된 영상 (e) Cheng의 Maximum-Tristimulus-Value 방법과 제안한 방법으로 추정한 A 광원. (점선: 원래의 스펙트럼, 실선: 추정된 스펙트럼)

Fig. 5. (a) Toy original image, (b) Image biased by A illuminant, (c) Recovered image by Cheng's Maximum-Tristimulus-Value method, (d) Recovered image by the proposed method, and (e) estimated illuminant A using Cheng's Maximum-Tristimulus-Value method and proposed method.(dot: original spectral, solid: estimated spectral).

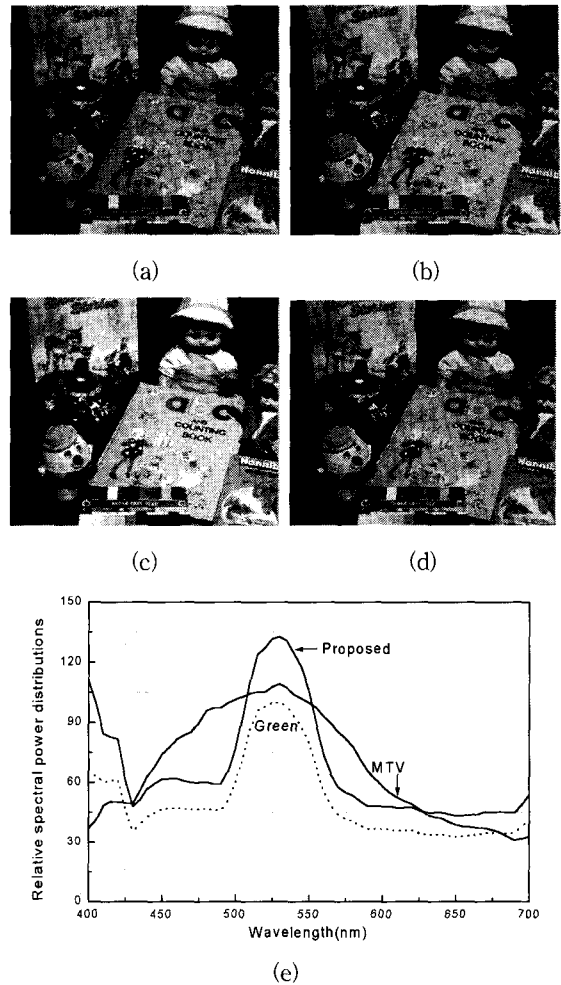


그림 6. (a) Toy 원영상 (b) Green 광원에 의해 조명된 영상 (c) Cheng의 Maximum-Tristimulus-Value 방법에 의한 영상 복원 (d) 개발된 광원추정 방법에 의해 복원된 영상 (e) Cheng의 Maximum-Tristimulus-Value 방법과 제안한 방법으로 추정한 Green 광원. (점선: 원래의 스펙트럼, 실선: 추정된 스펙트럼)

Fig. 6. (a) Toy original image, (b) Image biased by Green illuminant, (c) Recovered image by Cheng's Maximum-Tristimulus-Value method, (d) Recovered image by the proposed method, and (e) estimated illuminant Green using Cheng's Maximum-Tristimulus-Value method and proposed method. (dot: original spectral, solid: estimated spectral).

표 1은 각각 Inc A, C, Green, Yellow 광원에 의해 조명된 영상에 대하여 Cheng 및 제안한 방법을 사용하여 영상을 D65광원으로 복원한 후 원 영상과의 색차

비교를 나타낸다. 모든 광원에 대해 제안한 방법이 더 적은 색차를 나타낸다. 표 1에서의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 복원된 영상의 정량적인 색차 비교에서도 제안한 방법의 우수성을 알 수 있다.

표 1. A, C, Green, Yellow 광원에 대한 복원된 Toy 영상의 색차(ΔE_{ab}^*) 비교

Table 1. Color difference(ΔE_{ab}^*) comparison of Toy image recovered from the A, C, Green, Yellow illuminants.

	Cheng	Proposed
A	0.0082	0.0024
C	3.2967×10^{-4}	1.9873×10^{-6}
Green	0.0024	3.4999×10^{-6}
Yellow	0.0010	6.3392×10^{-6}

V. 결론

본 논문에서는 최대 무채색 영역의 표면 분광 반사율과 최대 무채색 영역에서 반사되는 반사광의 분광 전력분포를 이용하는 효율적인 광원 추정 알고리즘을 제안하였다. 최대 무채색 영역을 구하기 위해 변형된 회색계 가정을 사용하였고 최대 무채색 영역의 9개의 화소에 대하여 주성분 분석 방법으로 표면 분광 반사율을 추정하였다. 또한 최대 무채색 영역과 반사광 모집단과 색차 비교를 통해 반사광의 분광 분포를 얻었다. 이렇게 얻은 최대 무채색 영역의 반사광을 표면 분광 반사율로 나누어줌으로써 9개의 추정된 광원을 얻고 이를 평균하여 영상에 포함된 광원의 분광분포를 추정하였다.

제안한 방법을 다양한 유색광원 영상에 적용한 결과, 영상에 포함된 광원의 분광 분포를 잘 추정하였으며 정량적인 색차 평가에서도 동일한 가정을 두고 있는 기존의 방법에 비해 우수한 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

광원은 물체색을 결정하는 중요한 변수이므로 광원의 분광분포 추정기법은 색 현시모델을 포함하여 영상 처리, 컴퓨터 비전, 컴퓨터 그래픽스 등 많은 응용 분야에 적용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. von Kries, "Beitrag zur Physiologie der Gesichtsempfindung," *Arch Anat. Physiol.*, 5050-5524, 1878.
- [2] E. H. Land, "The retinex theory of color perception," *Scientific American*, 237, pp. 108~129, 1977.
- [3] J. Cohen, "Dependency of the spectral reflectance curves of Munsell color chips," *Psychonomic Sci.*, vol. 1, pp. 367~370, 1964.
- [4] L. T. Maloney and B. A. Wandell, "Color constancy: A method for recovering surface spectral reflectance," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 3, no. 1, pp. 29~33, Jan, 1986.
- [5] D. A. Forsyth, "A novel algorithm for color constancy," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 5, no. 1, pp. 5~36, Aug, 1990.
- [6] M. D'Zmura, "Color constancy: Surface color from changing illumination," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 9, no. 3, pp. 490~493, Mar, 1992.
- [7] F. H. Cheng, "Recovering colors in an image with chromatic illuminant," *IEEE Trans. on Imaging Processing*, vol. 7, no. 11, pp. 1524~1533, Nov, 1998.
- [8] H. Helson, "Fundamental problems in color vision. I. The principle governing changes in hue, saturation, and lightness of non-selective samples in chromatic illumination," *J. Exper. Psychol.*, vol. 23, pp. 439~476, 1938.

 저 자 소 개

金 燿 樹(正會員) 第 37卷 SP編 第9號 參照
 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

河 永 浩(正會員) 第 32卷 B編 第12號 參照
 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

金 允 泰(正會員)
 1999년 경북대학교 전자전기공학부(공학사). 2001년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 칼라 영상처리, 디지털 칼라 하프토닝, gamut 매핑

李 徹 熙(正會員)
 1995년 경북대학교 전자공학과(공학사). 1997년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 2000년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 2000년 3월~현재 경운대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 주관심분야는 색재현, 칼라프린팅, 영상처리, 패턴인식임