

단일 및 다중 컬러 영상에서 이색성 선 공간을 이용한 조명 색도 추정

(Illumination Chromaticity Estimation in Single and Multiple
Colored Image using Dichromatic Line Space)

최 유 진 [†] 윤 국 진 ^{**} 권 인 소 ^{***}
(Yoo Jin Choi) (Kuk-Jin Yoon) (In So Kweon)

요 약 영상의 컬러 정보는 조명 환경에 따라 변한다. 이 경우 영상으로부터 조명 컬러를 추정하고 물체 본래의 컬러를 복원하는 것을 컬러 항상성이라 한다. 본 논문에서는 이색성 반사 모델에 기반한 새로운 컬러 항상성 복원 기법을 제안한다. 이색성 반사 모델에 기반하여 조명 컬러를 추정하기 위해서는 정확한 이색성 선을 추출하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 본 논문에서는 이색성 기술기와 이색성 선 공간을 제안하고, 이를 이용하여 이색성 선을 추정하는 기법을 제안한다. 또한 얻어진 이색성 선을 이용하여 단일 및 다중 컬러 영상에 대한 조명 추정 기법도 제안한다.

키워드 : 컬러 항상성, 이색성 기술기, 이색성 선 공간, 조명 추정

Abstract The color information in an image changes as the illuminant condition varies. The mechanism to find canonical color of an object by estimating illumination color in an image is generally referred as color constancy. In color constancy, computing robust and precise dichromatic line is most important to estimate illumination chromaticity. In this paper, a novel approach to estimate the color of a single illuminant for noisy and micro-textured images is introduced. An accurate dichromatic line is found by using Dichromatic Line Space (DLS), proposed in this paper, which has information about diffuse chromaticity and illumination chromaticity.

Key words : Color constancy, dichromatic line, dichromatic line space, illumination estimation

1. 서 론

1.1 컬러 항상성

영상에서 물체에 대한 컬러 정보는 조명(illumination) 색에 따라 달라진다. 동일한 물체에 대한 영상이라 할지라도 분광 분포가 다른 조명 아래에서 찍으면 영상 안의 물체의 컬러 정보는 달라진다. 이렇게 서로 다른 조명 아래서 동일한 물체를 볼 때 조명의 색에 상관없이 물체의 색이 동일하다고 인식하는 능력을 컬러 항상성(Color Constancy)이라 한다.

컴퓨터 비전에서 해결하고자 하는 컬러 항상성은 임의의 조명 조건 하에서 찍은 장면(scene)의 영상에서

조명의 색을 추정하고, 영상에서 조명 색을 제거함으로써 기준 백색의 특정 조명(canonical illuminant) 환경에서 보이는 색으로 변화시키는 것이다. 본 논문에서는 조명 색도를 추정하기 위하여 색도 공간에서 정확한 이색성 선(dichromatic line)을 찾는 방법에 대한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 또, 영상에 컬러가 하나만 존재하는 경우, 단일 이색성 선을 추정하고 영상의 색도 정보와 공간 정보를 이용하여 이색성 선 위에서 조명 색도를 추정하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서 제안하는 알고리즘의 장점은 이색성 선을 추정할 때 영상에서 경면 반사(specular) 영역을 정확하게 추출할 필요가 없고, 잡음으로 인해 발생하는 이색성 선의 오차를 최소한으로 하였다. 또 조명 색도에 제한 조건(constraint)을 주지 않기 때문에 자연광 외에도 임의로 필터링(filtering)시켜 만든 인공 조명 색도 추정도 가능하다.

조명 색을 추정하기 위해 장면에 들어오는 빛은 단일 조명으로부터 오며 영상 전체에서 조명의 색도는 균일

[†] 정 회 원 : LG 전자 모바일 멀티미디어 랩 연구원
yoojinchoi@lge.com

^{**} 학생회원 : 한국과학기술원 전기및전자공학과
kjyoon@rev.kaist.ac.kr

^{***} 비 회 원 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 교수
iskweon@kaist.ac.kr

논문접수 : 2005년 5월 20일

심사완료 : 2005년 11월 19일

하다고 가정한다. 또 물체 표면(surface)에 다른 표면 색이 반사되어 비친 상호반사(inter-reflection)에 의한 부분적인 컬러 변화는 없다고 가정한다.

본 논문의 2장에서는 기존의 컬러 항상성 연구에 대하여 설명한다. 3장에서는 색도 공간에서 잡음(noise)의 영향이 적고 신뢰도가 높은 이색성 선을 구하기 위해 이색성 기울기(Dichromatic-Slope)와 이색성 선 공간(Dichromatic Line Space)을 제안하고, 이를 기반으로 다중 컬러 영상인 경우와 단일 컬러 영상인 경우 각각에 대해 조명을 추정하는 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 제안된 알고리즘의 구현방법과 여러 조명 조건 하에서 얻어진 영상들에 대한 실험 결과를 제시하고 정량적으로 평가하고 5장에서는 연구에 대한 요약과 결론을 기술하였다.

2. 기존 컬러 항상성 방법론

기존의 컬러 항상성 연구에서는 경면반사(specular reflection)나 상호 반사(inter-reflection) 등의 물리적인 현상을 이용하여 조명의 색을 추정하고 물체의 색을 구하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 이 물리 기반 방법론(physics based method)은 영상에 색이 많지 않은 경우에 영상 한 장을 이용한 조명 색 추정이 가능하고, 단일 색의 영상에서도 조명 색도 추정이 가능하다 Finlayson et al[1]. 물리 기반 방법론은 입력 영상의 표면 종류에 따라 물체 반사 기반(diffuse-based) 방법과 이색성 기반(dichromatic-based) 방법으로 나뉜다.

이색성 기반(dichromatic-based)방법은 반사된 빛이 이색성 반사 모델(dichromatic reflection model-Shafer [2,3])을 따를 때, 하이라이트(highlight) 부분의 색도를 이용하여 이색성 선을 추정하고 조명의 색을 추정한다. Lee[4]는 서로 다른 표면 색에 생긴 두 개 이상의 하이라이트를 추출하여 조명 색도 추정에 활용하는 알고리즘을 제안하였다. 그러나 Lee[4]의 알고리즘은 물체 표면에서 정확한 컬러 분할(color segmentation)을 해야 한다는 어려움이 있다. 또 영상에 잡음이 있는 경우는 rg 색도 공간에 색도 데이터가 분산되므로 정확한 이색성 선을 구하기 어렵다. 그러므로 결과가 강인(robust)하지 않고 신뢰도가 다소 떨어지는 단점이 있다. 최근에 Tan et al.[5]은 영상에서 영상 색도(chromaticity)와 밝기(intensity)사이의 관계를 이용한 역밝기 색도 공간(inverse-intensity chromaticity space : IIC)를 제안하고 이를 이용하여 조명의 색도를 추정하였다. 그러나 이 알고리즘에서는 조명 색도 추정을 세 개의 컬러 밴드(band)에서 서로 독립적으로 수행하므로 조명 색도의 합이 1이 되지 않을 수도 있는 단점이 있다.

3. 강인한 이색성 선 추정 방법(Robust Dichromatic Line Estimation Method)

본 장에서는 경면반사도(specularity)에 불변하는 정보를 영상에서 찾고 이를 이용하여 신뢰도가 높은 이색성 선을 추정하는 방법을 설명하고, 다중 컬러 영상과 단일 컬러 영상에서 조명 색도를 추정한다.

3.1 이색성 반사 모델에 의한 이색성 선(Dichromatic Line)

이색성 반사 모델에 의한 이미지 밝기를 이미지 색도(chromaticity)를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$I_c(\mathbf{x}) = m_d(\mathbf{x})\Lambda_c(\mathbf{x}) + m_s(\mathbf{x})\Gamma_c \quad (1)$$

Λ 는 물체 색도(diffuse chromaticity)를, Γ 는 경면 색도(specular chromaticity)를 나타내는 기호이다. [5]의 Neutral Interface Reflection(NIR)에 따르면 경면 반사는 입사 조명과 분광 분포가 같으므로 경면 색도 Γ 를 조명 색도(illumination chromaticity)라고 할 수 있다.

영상에서 $\mathbf{x}=(x,y)$ 위치에 있는 화소(pixel)의 색도는 정의에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$i_c(\mathbf{x}) = \frac{I_c(\mathbf{x})}{\sum_j I_j(\mathbf{x})} = \frac{m_d(\mathbf{x})\Lambda_c(\mathbf{x}) + m_s(\mathbf{x})\Gamma_c}{\sum_j \{m_d(\mathbf{x})\Lambda_j(\mathbf{x}) + m_s(\mathbf{x})\Gamma_j\}} \quad (2)$$

여기서 색도의 특성 $\sum_j i_j(\mathbf{x}) = \sum_j \Lambda_j(\mathbf{x}) = \sum_j \Gamma_j(\mathbf{x}) = 1$ 을 이용하면 rg 색도 공간에서 영상 색도 $i_c(\mathbf{x})$ 를 물체 색도 $\Lambda_c(\mathbf{x})$ 와 조명 색도 Γ_c 의 합으로 표현 할 수 있다.

$$i_c(\mathbf{x}) = \frac{m_d(\mathbf{x})}{m_d(\mathbf{x}) + m_s(\mathbf{x})} \Lambda_c(\mathbf{x}) + \frac{m_s(\mathbf{x})}{m_d(\mathbf{x}) + m_s(\mathbf{x})} \Gamma_c \quad (3)$$

식 (3)에서 $i_c(\mathbf{x})$ 의 물체 색도의 크기 $\alpha(\mathbf{x}) = \frac{m_d(\mathbf{x})}{m_d(\mathbf{x}) + m_s(\mathbf{x})}$

와 조명 색도의 크기 $\beta(\mathbf{x}) = \frac{m_s(\mathbf{x})}{m_d(\mathbf{x}) + m_s(\mathbf{x})}$ 는 기하학적 구성)의 영향으로 값이 결정된다. α 와 β 를 각각 물체반사도(diffuseness)와 경면반사도(specularity)라고 하겠다. 물체반사도와 경면반사도를 이용하여 영상 색도를 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{i}(\mathbf{x}) = \alpha(\mathbf{x})\Lambda(\mathbf{x}) + \beta(\mathbf{x})\Gamma = \Lambda(\mathbf{x}) + \beta(\mathbf{x})\{\Gamma - \Lambda(\mathbf{x})\} \quad (4)$$

식 (4)에 따르면 영상 색도 $\mathbf{i}(\mathbf{x})$ 는 rg 색도 공간에서 Λ 와 Γ 를 연결하는 선 위의 점이다. 이때 Λ 와 Γ 를 연결하는 이 선이 이색성 선(dichromatic line)이다.

1) 조명의 위치, 물체의 모양, 카메라의 방향에 의해 결정되는 값

3.2 경면반사도에 불변하는 이색성 기울기(Specular Invariant Dichromatic-Slope)

식 (4)에서 보면 같은 색의 물체 위의 두 점이라도 각 점의 색도는, 물체에서의 위치에 따라 경면반사도 $\beta(\mathbf{x})$ 가 달라지므로, 같지 않을 수 있다. 그러나 같은 색의 물체 위의 두 화소는 물체 색도가 같고, 단일 조명 조건이 있어서 조명 색도가 같을 때에는 동일한 이색성 선 위에 놓인다. 그러므로 이 두 화소에서 그리는 이색성 선의 기울기는 그 영상 색도의 경면반사도 $\beta(\mathbf{x})$ 에 관계없이 일정하다(그림 1).

경면반사도 $\beta(\mathbf{x})$ 에 불변하는 특성을 이용하면 같은 물체 색 표현 위의 모든 색도 점에서 이색성 선을 그리면 모두 동일한 이색성 선을 그려야 한다. 각 영상 색도 점에서 이색성 선의 기울기를 구하기 위해 식 (4)를 영상 공간에서 방향 x 에 대해 미분을 하면 그 결과 식 (5)와 같이 기하학적 구성에 대한 미분과 색도에 대한 미분으로 나뉜다(이 미분은 y 에 대해서도 취할 수 있다).

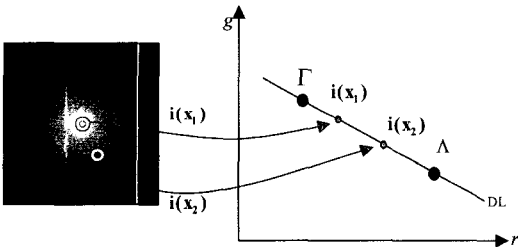


그림 1 이색성 기울기 Dichromatic-Slope

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i}(\mathbf{x}) &= \frac{\partial}{\partial x} \{ \Lambda(\mathbf{x}) + \beta(\mathbf{x})[\Gamma - \Lambda(\mathbf{x})] \} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \Lambda(\mathbf{x}) + \beta(\mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial x} [\Gamma - \Lambda(\mathbf{x})] + \frac{\partial \beta(\mathbf{x})}{\partial x} [\Gamma - \Lambda(\mathbf{x})] \\ &\Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \beta(\mathbf{x})}{\partial x} [\Gamma - \Lambda(\mathbf{x})] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 영상 전체에 균일한 색도의 단일 조명이 라는 가정에 의해 $\frac{\partial}{\partial x} \Gamma \approx 0$ 이 되고, 물체 색도는 컬러 에지가 아닌 좁은 영역에서 균일하다고 가정하면 $\frac{\partial}{\partial x} \Lambda(\mathbf{x}) \approx 0$ 이 된다. 그러므로 영상 색도에 대한 미분은 기하학적 구성(geometric factor)에 의해 변하는 경면반사도 $\beta(\mathbf{x})$ 에 대한 미분으로 요약된다. 이때, 색도 변화

량을 적색 밴드와 녹색 밴드에서 각각 구하여 식 (6)과 같이 나누어 주면 기하학 요소의 영향을 제거해 줄 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}) / \partial x}{\partial \mathbf{r}(\mathbf{x}) / \partial x} = \frac{\frac{\partial \beta(\mathbf{x})}{\partial x} [\Gamma_g - \Lambda_g(\mathbf{x})]}{\frac{\partial \beta(\mathbf{x})}{\partial x} [\Gamma_r - \Lambda_r(\mathbf{x})]} = \frac{\Gamma_g - \Lambda_g(\mathbf{x})}{\Gamma_r - \Lambda_r(\mathbf{x})} = slope(\mathbf{x}) \quad (6)$$

식 (6)은 2차원 rg 색도 공간에서 물체 색도 (Λ_r, Λ_g) 와 조명 색도 (Γ_r, Γ_g) 를 지나는 이색성 선의 기울기를 의미한다. 이 이색성 선의 기울기를 이색성 기울기(Dichromatic-Slope)이라 정의하겠다. 이색성 기울기는 경면 반사도에 불변하고 조명과 물체의 색도에만 의해 결정되는 값이다.

그림 1에서 같은 표면색 위의 두 점 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ 에 대해 $\mathbf{i}(\mathbf{x}_2)$ 는 $\mathbf{i}(\mathbf{x}_1)$ 보다 Γ 에 더 가까우므로 경면반사도가 더 크다. 하지만 $\mathbf{i}(\mathbf{x}_1)$ 와 $\mathbf{i}(\mathbf{x}_2)$ 는 같은 Λ, Γ 로 만들어졌으므로 두 색도점은 동일한 이색성 선 위에 놓이고, 각 색도점에서 구한 이색성 기울기는 경면반사도에 상관없이 같다.

3.3 Dichromatic Line Space(이색성 선 공간)

2차원 rg 공간에서 영상 색도 $(i_r(\mathbf{x}), i_g(\mathbf{x}))$ 를 지나고 이색성 기울기 $slope(\mathbf{x})$ 를 갖는 이색성 선을 식으로 표현하면 식 (7)과 같다. 이색성 선을 영상 색도와 이색성 기울기로 기호화하면 x 축이 r , y 축이 g , z 축이 $slope$ 인 3차원 공간에 3차원 벡터 형태로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(r) &= slope(\mathbf{x}) \{ r - i_r(\mathbf{x}) \} + i_g(\mathbf{x}) \\ &\Rightarrow [i_r(\mathbf{x}), i_g(\mathbf{x}), slope(\mathbf{x})] \end{aligned} \quad (7)$$

이 3차원 공간은 이색성 선을 영상 색도와 $slope(\mathbf{x})$ 로 표현한 공간이므로 이 공간을 이색성 선 공간(Dichromatic Line Space)이라고 부르겠다. 이색성 선 공간의 한 점은 rg 색도 공간에서 $(i_r(\mathbf{x}), i_g(\mathbf{x}))$ 점을 지나며 기울기 $slope(\mathbf{x})$ 를 갖는 이색성 선을 의미한다(그림 2).

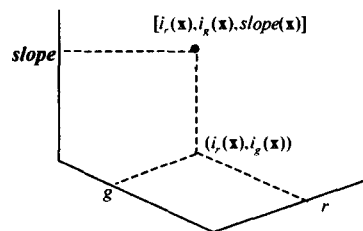


그림 2 이색성 선 공간(Dichromatic Line Space)

영상 공간(image domain)에서 각 화소의 rg 색도와 이색성 기울기를 이용하여 이색성 선 공간에 보팅(voting)하면 이색성 선에 대한 3차원 히스토그램이 만들어진다. 영상 잡음이 없고 상호반사도 없는 가상 영상이라면 표면색이 같은 화소에서 그린 이색성 선은 이색성 선 공간의 기울기 축에서 한곳으로 집중되게 보팅된다(그림 3). 이러한 특성을 이용하여 이색성 선 공간에서 보팅된 결과에서 밀도가 높은 점을 찾으면 그 점은 영상에서 조명 색도와 물체의 몸체 색도가 만드는 이색성 선을 의미한다.

그림 3은 잡음이 없는 이상적인 경우 이색성 선 공간을 이용하여 이색성 선을 찾고, 서로 다른 두개의 물체 색에서 구한 이색성 선의 교점으로 조명 색도를 추정한 결과이다. 그림 3의 (e)는 추정한 조명 색으로 색보정을 한 결과이다.

3.4 다중 컬러 영상인 경우 이색성 선 공간을 이용한 조명 색도 추정

실제 영상은 영상 잡음, 상호반사, 카메라의 비선형 응답 특성(nonlinear camera response) 등에 의해 표면색이 같은 화소의 색도라도 하나의 이색성 선 위에 놓이지 않고 이색성 선을 중심으로 분산되어 분포한다(그림 4(b)). 그러므로 실제 영상의 화소를 이색성 선 공간

으로 투영시켰을 때 이색성 기울기가 한곳에 집중되지 않고 여러 곳에 퍼져 보팅된다(그림 4(c)). 이때 이색성 선 공간에 보팅된 결과에서 국소 영역에서 가장 많이 보팅된 점은 영상 잡음과 상호 반사의 영향이 가장 적은 이색성 선이라고 할 수 있다. 결국 이색성 선 공간에 마스크를 씌워 국소 최대값(local maximum point)을 찾으면, 잡음에 강인하고 신뢰도가 높은 이색성 선을 찾을 수 있다. 이색성 선 공간에서 국소 최대값을 2개 이상 고르기 위해 마스크 사이즈를 줄여가며 국소 최대값을 2개 이상 고른다.

그림 4의 경우 영상의 specular pixel을 이색성 선 공간에 보팅하면, 보팅점들은 주황색 컵과 노란색 컵에 의해 크게 2개의 군집으로 분리가 된다. 이때, 같은 군집에 속하는 보팅 점들은 slope축에 대해 같은 기울기 값에 보팅되어야 하지만, 영상 잡음 등 외부 요인으로 색도가 달라진 화소점에 의해 slope축에 대해 기울기가 한곳에만 보팅되지 않고 여러 곳에 퍼져 보팅되었다.(그림 4(c)). 그러므로 이색성 선 공간에 보팅된 이색성 선에서 잡음 등 외부 요인을 받지 않은 대다수의 선이 보팅된 이색성 기울기를 찾기 위하여 각 군집에서 밀도가 최대인 곳을 찾아야 한다. 각 군집에서 밀도가 최대인 점을 찾기 위하여, 이색성 선 공간에서 6면 입방체 형태

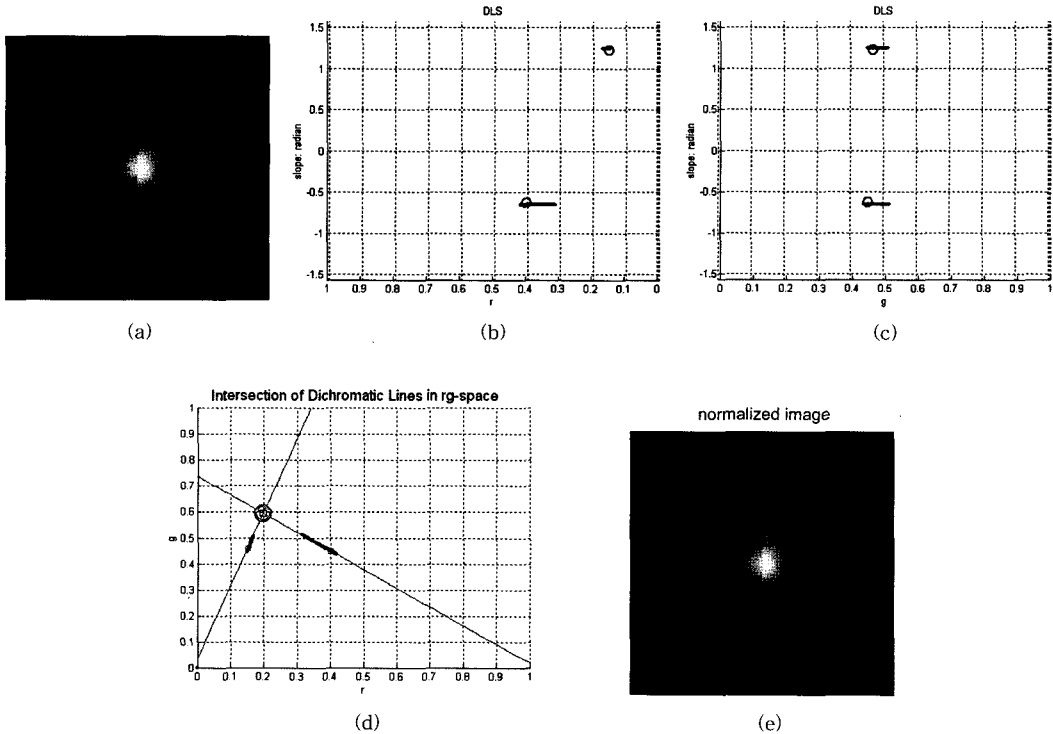


그림 3 (a) 가상 영상 (b) r-slope view (c) g-slope view (d) 이색성 선 (e) 색보정 결과(식 (9))

의 마스크를 씌우고 스캔할 때, 국소 최대값을 2개 이상이 찾기 위하여 마스크 크기를 가변적으로 줄여가며 스캔하였다.

이렇게 구한 이색성 선들은 단일 조명의 경우 모두 공통의 조명 색도를 지나야 한다. 이색성 선의 교점인 조명의 색도는 이색성 선 공간에서 추정된 이색성 선들의 최소자승법(least-square method)을 사용하여 계산한다(식 (8)). 또한 조명 색을 제거한 물체 색을 보기 위하여 이 교점으로 식 (9)를 이용하여 색보정을 해준다(그림 4(d)).

$$\begin{pmatrix} \Gamma_r \\ \Gamma_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} slope_1 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ slope_n & -1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} i_n slope_1 - i_{g_1} \\ \vdots \\ i_n slope_n - i_{g_n} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\left[\tilde{I}_r(x), \tilde{I}_g(x), \tilde{I}_b(x) \right] = \left[\frac{I_r(x)}{\Gamma_r}, \frac{I_g(x)}{\Gamma_g}, \frac{I_b(x)}{\Gamma_b} \right] \quad (9)$$

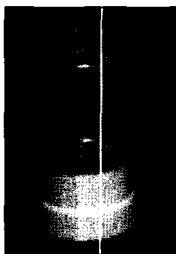
3.5 단일 컬러 영상인 경우 이색성 선 공간을 이용한 조명 색도 추정

단일 색 물체의 영상인 경우에는 이색성 선이 한 개 나오므로 이색성 선의 교점을 구하는 방법으로는 조명 추정이 불가능하다(그림 5). 그러므로 영상에 한가지 색만 있는 경우에는 조명 색도를 추정하기 위해 영상의

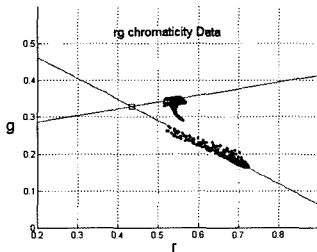
색도 정보와 공간 정보(spatial information)를 함께 이용하여 경면 반사 성분과 몸체 반사 성분을 분리하는 동시에 조명 색도를 추정하는 방법을 제안한다.

단일 컬러 영상에 대해 이색성 선 공간을 이용하여 이색성 선을 구하면 물체의 몸체 색도 Λ 와 조명 색도 Γ 는 이색성 선 위에 놓일 것이다. 실제 이미지에 대한 rg 색도 데이터는 그림 6(a)와 같이 영상 잡음에 의해 이색성 선을 중심으로 퍼져있다. 색도 데이터를 이색성 선 위로 수직으로 투영시켜 이색성 선을 기준으로 히스토그램을 그려 보면 그림 6(b)같이 분포한다.

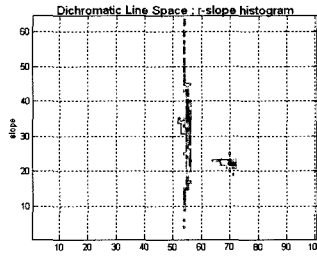
선 위로 투영된 색도 히스토그램에서 양 끝 점에 해당하는 색도는 식 (4)에 의하면 영상에서 $\beta(x)$ 가 가장 큰 색도 점과 $\beta(x)$ 가 가장 작은 색도점에 해당한다. 영상 공간에서 두 양 끝점에 해당하는 색도를 갖는 픽셀 중에 R, G, B 세 컬러 밴드의 밝기 합이 작은 쪽을 $\beta(x)$ 가 가장 작은 색도점으로, 밝기 합이 높은 쪽을 $\beta(x)$ 가 가장 큰 색도점으로 정하고 이들을 각각 Λ_0 와 Γ_0 라고 한다(그림 6(a)). 이는 정반사 화소가 난반사 화소보다 일반적으로 밝기값이 크다는 것을 이용한 것이다. 식 (1)에서 Λ_0 와 Γ_0 를 대입하여 주어진 밝기 데이터에서 m_d 와 m_s 를 식 (10)과 같이 구할 수 있다.



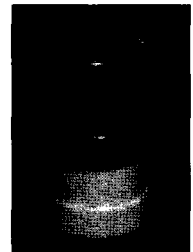
(a) 입력 영상



(b) 이색성 선과 교점



(c) DLS의 r-slope view



(d) 색보정 결과

그림 4 다중 컬러 영상에 대한 조명 추정과 색보정 결과

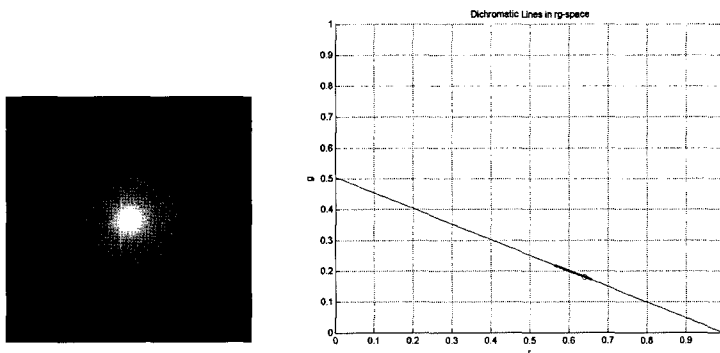


그림 5 단일 컬러 영상. 색도 공간에 데이터 분포와 추정된 이색성 선

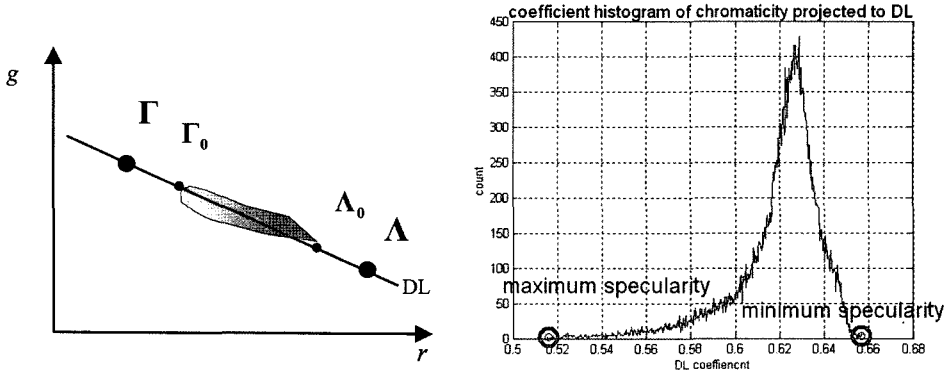
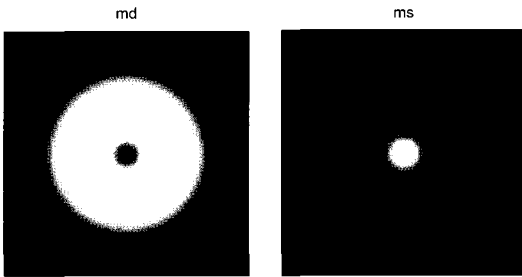


그림 6 (a) rg 색도 분포 (b) 색도 데이터 이색성 선으로 투영시켰을 때 히스토그램

$$\begin{bmatrix} I_r(\mathbf{x}) \\ I_g(\mathbf{x}) \\ I_b(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_r & \Gamma_r \\ \Lambda_g & \Gamma_g \\ \Lambda_b & \Gamma_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_d \\ m_s \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} m_d \\ m_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_r & \Gamma_r \\ \Lambda_g & \Gamma_g \\ \Lambda_b & \Gamma_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_r(\mathbf{x}) \\ I_g(\mathbf{x}) \\ I_b(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

임의의 Λ_0, Γ_0 를 이용하여 얻은 m_d, m_s 는 그림 7과 같다. 그림 7을 보면 임의로 구한 Λ_0 와 Γ_0 를 이용하여 구한 m_d 는 하이라이트 부분에서 작게 나왔다. 이것은 Γ 와 $\mathbf{i}(\mathbf{x})$ 의 상대적인 위치가 달라서 생긴 결과이다.



(a) 정반사 계수 m_d (b) 난반사 계수 m_s

그림 7 입력 영상을 그림 5의 (a)로 하고 Λ_0 와 Γ_0 를 이용하여 구한 m_d, m_s

그림 8과 식 (3)에서 영상 색도 $\mathbf{i}(\mathbf{x})$ 가 고정되어 있을 때, Γ_1 경우처럼 Γ 의 위치가 Γ_{true} 보다 $\mathbf{i}(\mathbf{x})$ 에 상대적으로 가까이 있으면 경면반사도 $\beta_1 > \beta_{true}$ 가 된다. 그러므로 그 화소에서 m_s 는 실제값보다 크게 계산되고 $\sum_j I_j(x) = m_d + m_s$ 에 의해 m_d 는 작아진다(그림 9(a)).

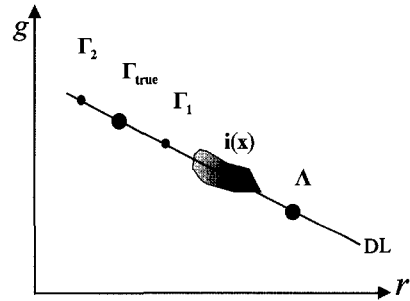


그림 8 이중성 선위에서 Γ 의 상대적인 위치

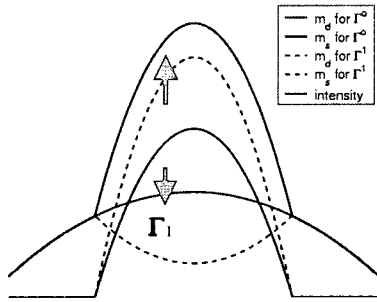
반대로 Γ_2 경우 $\beta_2 < \beta_{true}$ 가 되고 m_s 는 실제 값보다 작게, m_d 는 실제 값보다 커진다(그림 9(b)). 이런 이유로 그림 7의 경우는 임의의 Γ_0 가 Γ_{true} 보다 영상 색도와 더 가깝기 때문에 그림 7(a)의 하이라이트 부분은 어둡고, 그림 7(b)의 하이라이트 부분 밝아 보인다.

경면 반사 영역에서 m_d 의 값이 Γ 의 상대적 위치에 영향을 받는다는 특성을 이용하여 전체 영상에서 m_d 의 변화가 최소가 되도록 오차를 정의하고, Λ 와 Γ 를 이색성 선을 따라 반복적으로 갱신하여 주면 참 값에 가장 가까운 Λ 와 Γ 를 구할 수 있다.

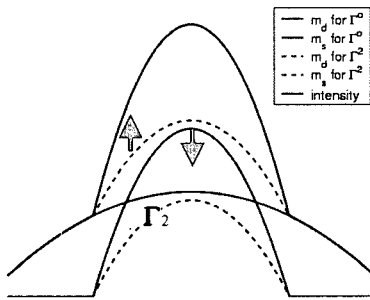
$$e = \sum \|\nabla m_d\| \quad (11)$$

식 (11)은 오차 척도로 m_d 의 변화량을 구하는 식이다. 그림 9처럼 m_d 가 실제 값보다 작거나 크게 계산되면 m_d 의 변화량은 실제보다 크게 계산된다.

조명 색도 Γ 와 물체 색도 Λ 를 이색성 선 위에서 각각 영상 색도 $\mathbf{i}(\mathbf{x})$ 와 멀어지는 방향으로 옮겨가며(식 (12), (13)) 오차를 측정할 때, 측정된 오차가 그 단계에서의 오차보다 작아지면 m_d 의 변화량이 작아진 것



(a) m_d 가 작게 계산된 경우



(b) m_d 가 크게 계산된 경우

그림 9 Λ 와 Γ 의 상대적인 위치에 의한 m_d , m_s

이므로 조면 색도 Γ 가 실제 값에 가까워졌다고 볼 수 있다(그림 10).

$$\Gamma_{n+1} = \Gamma_n + a_n(\Gamma_0 - \Lambda_0) \quad (12)$$

$$\Lambda_{n+1} = \Lambda_n - b_n(\Gamma_0 - \Lambda_0) \quad (13)$$

n 은 반복수(iteration number)를 나타내고, a_n , b_n 은 단조 감소 수열을 의미한다. 측정된 오차가 감소하다가 다시 커지기 시작하면 그림 9의 (b)경우처럼 m_d 가 실제 값보다 크게 측정되어 m_d 의 변화량이 전단계보다 커진

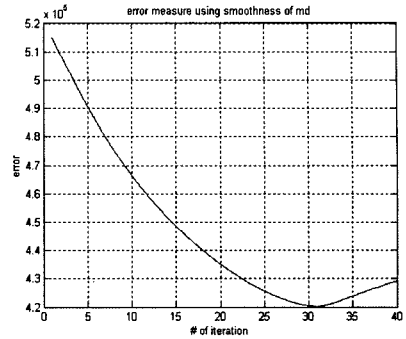


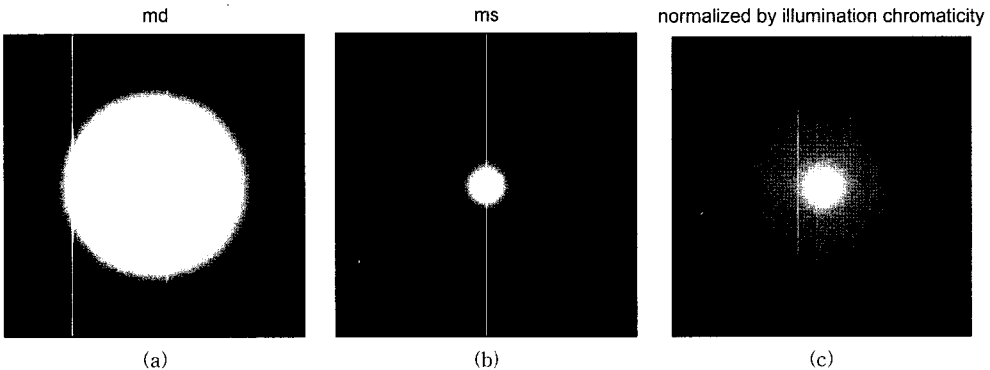
그림 10 반복수에 따른 오차의 변화

다. 그러므로 측정된 오차가 최소일 때의 Γ 와 Λ 를 찾으면 참값과 가장 가까운 결과가 된다(그림 10, 그림 11).

4. 구현 및 실험 결과(Implementation & Experimental Results)

총 80장의 영상을 이용하여 본 논문에서 제안한 알고리즘에 대한 실험을 하였다. 본 알고리즘은 하이라이트 영역을 정확히 찾지 않아도 되지만, 어두운 화소는 영상 잡음의 영향을 받기 쉽고 카메라 응답 특성이 비선형적일 수 있기 때문에 정확도를 높이기 위해서 경면반사도가 높은 하이라이트 화소만 골라 사용한다. 하이라이트를 효과적으로 추출하기 위해 [7]에서 제안한 specular-diffuse separation 방법을 이용하였다. 추출한 하이라이트 화소는 색도와 이색성 기울기를 구하여 고정된 크기의 이색성 선 공간에 투영시켰다. 테스트 조명으로는 6가지 색의 조명을 바꾸어 가며 사용하였다. 또 이외에도 “The University of Tokyo”의 R. Tan의 실험 영상과 “the University of Arizona”의 K. Barnard의 실험 영상을 이용하여 실험하였다.

추정된 조명 색도를 비교하기 위한 참조(reference)



(a)

(b)

(c)

그림 11 오차가 최소일 때의 (a) m_d , (b) m_s , (c) 색 보정 결과

조명 색도를 구하는 과정에서는 [8]에서 제안한 흰색 도자기 타일(white ceramic tile)을 놓고 영상을 촬영하여 구하였다.

그림 12부터 그림 16는 본 논문에서 제안한 방법으로 조명 색도를 추정하고 기준 조명 아래서의 색으로 색 보정을 한 결과이다. 그림 12은 2개 이상의 컬러가 있는 영상에 대한 실험 결과이고 그림 13 복잡한 텍스처가 있는 영상, 그림 14은 복잡한 물체가 있는 영상에 대한 결과이다. 그림 15와 그림 16은 단일 컬러 영상에서 이색성 선 공간을 이용하여 추정된 이색성 선과 기하학적 구성에 대한 정보를 이용하여 조명 색도를 추정한 결과와 색 보정 결과이다. 특히 그림 16은 자연적으로 생성 불가능한 보라색 인공 조명에 대해 조명 색도 추정한 결과로, 본 논문에서 제안한 알고리즘은 인공 조명 색도 추정 가능성이 있음을 보여준다.

각 결과에서 추정한 조명 색도와 참조 조명 색도에 대한 오차는 rg 색도 공간에서 두 색도 벡터의 거리로 계산하였다(식 (14)). 이때 $\hat{\Gamma}$ 는 추정한 조명을, Γ^{ref} 는 참조 조명 색도를 의미한다.

$$error = \sqrt{(\hat{\Gamma}_r - \Gamma_r^{ref})^2 + (\hat{\Gamma}_g - \Gamma_g^{ref})^2} \quad (14)$$

4.1 오차 분석

총 80장의 영상에 대해 실험한 결과 평균 오차는 [0.0153, 0.0108, 0.0143]로 나타났다. 이 오차는 카메라 비선형 특성에 의한 오차와 실제 실험에서 사용한 물체

다중 컬러 영상	Red	Green	Blue
평균 오차	0.0153	0.0108	0.0143
오차 표준 편차	0.0109	0.0104	0.0118

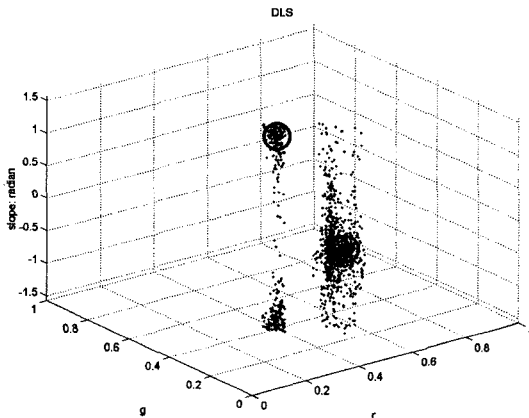
표 1 이색성 선 공간을 이용하여 추정한 조명의 오차



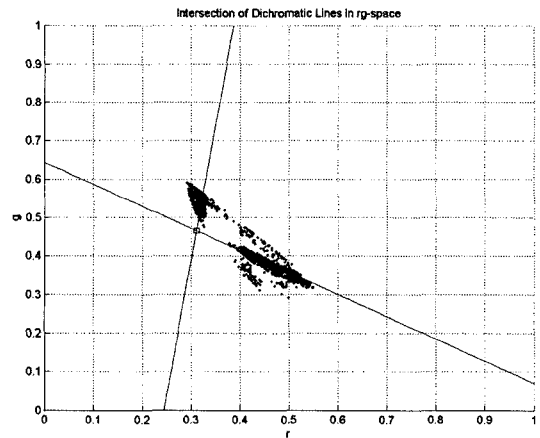
(a) 입력 영상



(b) 추정된 조명 색도로 색 보정한 결과

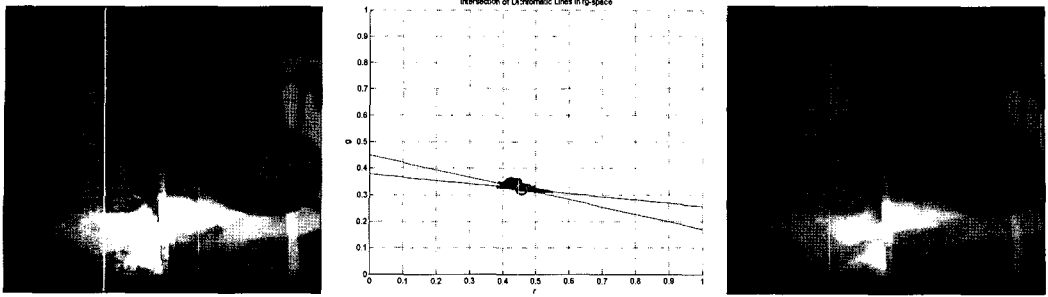


(c) DLS의 국소최대점



(d) 이색성 선의 교점

그림 12 추정된 조명 색도 $[\hat{\Gamma}_r, \hat{\Gamma}_g, \hat{\Gamma}_b] = [0.3108, 0.4656, 0.2236]$, 참조조명색도 $[\Gamma_r^{ref}, \Gamma_g^{ref}, \Gamma_b^{ref}] = [0.2980, 0.4581, 0.2439]$, 오차 = 0.0148, [5]의 오차 = 0.0288

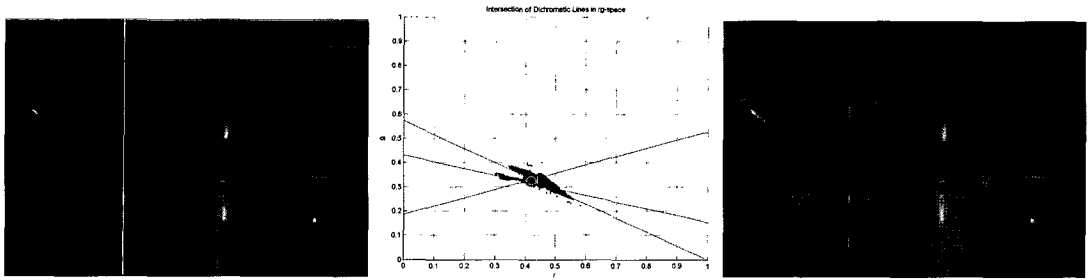


(a) 입력 영상

(b) 이색성 선의 교점

(c) 추정된 조명 색도로 색 보정한 결과

그림 13 추정한 조명 색도 $[\hat{\Gamma}_r, \hat{\Gamma}_g, \hat{\Gamma}_b] = [0.4552, 0.3230, 0.2218]$, 참조조명색도 $[\Gamma_r^{ref}, \Gamma_g^{ref}, \Gamma_b^{ref}] = [0.4219, 0.3321, 0.2461]$, 오차 = 0.0345

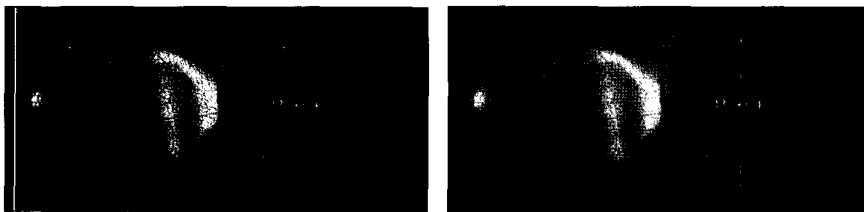


(a) 입력 영상

(b) 이색성 선의 교점

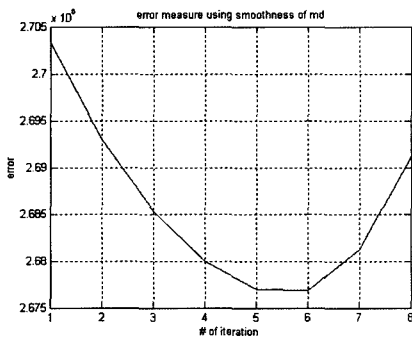
(c) 추정된 조명 색도로 색 보정한 결과

그림 14 추정한 조명 색도 $[\hat{\Gamma}_r, \hat{\Gamma}_g, \hat{\Gamma}_b] = [0.4181, 0.3258, 0.2561]$, 참조조명색도 $[\Gamma_r^{ref}, \Gamma_g^{ref}, \Gamma_b^{ref}] = [0.4227, 0.3310, 0.2463]$, 오차 = 0.0069

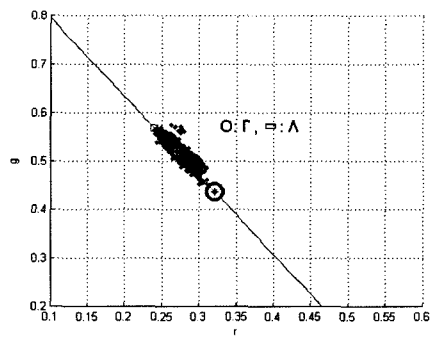


(a) 입력 영상

(b) 색 보정 결과



(c) 오차, m_d 의 변화량

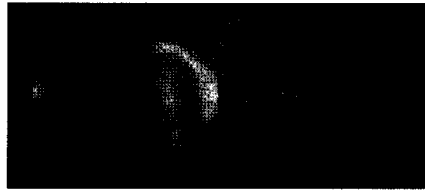


(d) DLS를 이용하여 추정된 이색성 선과 조명 색도

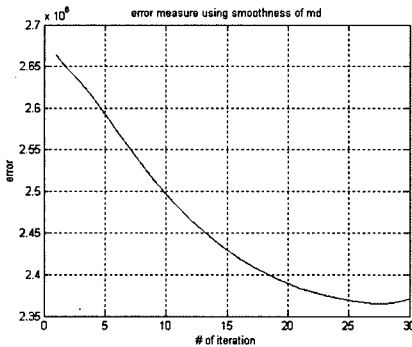
그림 15 추정한 조명 색도 $[\hat{\Gamma}_r, \hat{\Gamma}_g, \hat{\Gamma}_b] = [0.3206, 0.4375, 0.2419]$, 참조조명색도 $[\Gamma_r^{ref}, \Gamma_g^{ref}, \Gamma_b^{ref}] = [0.2980, 0.4581, 0.2439]$, 오차 = 0.0306



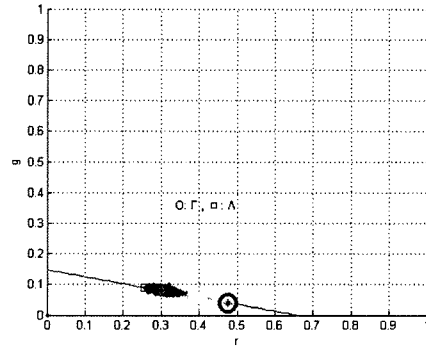
(a) 입력 영상



(b) 색 보정 결과



(c) 오차. m_d 의 변화량



(d) DLS를 이용하여 추정된 이색성 선과 조명 색도

그림 16 추정한 조명 색도 $[\hat{\Gamma}_r, \hat{\Gamma}_g, \hat{\Gamma}_b] = [0.3816, 0.0573, 0.5610]$, 참조조명색도 $[\Gamma_r^{ref}, \Gamma_g^{ref}, \Gamma_b^{ref}] = [0.3336, 0.0648, 0.6015]$, 오차 = 0.0486

가 참조 타일 같은 평면체가 아니기 때문에 생긴 상호 반사 효과로 이색성 선이 정확하게 구해지지 않아 생긴 오차로 예측된다.

- 4.1.2 다중 컬러 영상에 대한 실험 결과(그림 12,13,14)
- 4.1.2 단일 컬러 영상에 대한 실험 결과(그림 15,16)

5. 결론

본 논문에서는 한 장의 단일 혹은 다중 컬러 영상에 대해 조명 색도를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 다중 컬러 영상의 경우 정확한 색도 추정을 위해서는 색도 공간에서 영상 잡음에 강인한 이색성 선(dichromatic line)을 찾아야 한다. 이를 위해 정반사도(specularity)에 대해 불변하는 이색성 기울기(Dichromatic-Slope)를 구하고, 각 화소의 색도와 이색성 기울기를 이용하여 3차원 이색성 선 공간(Dichromatic Line Space)에 보팅하였다. 이색성 선 공간에 보팅된 결과에서 국소 최대점을 골라 잡음의 영향이 적고 신뢰도가 높은 이색성 선을 찾았다. 단일 컬러인 경우에는 공간적 정보와 색도 정보를 사용하여 물체, 경면 반사 분리(diffuse, specular separation)와 조명 색도 추정을 동시에 수행 할 수 있는 방법을 제안한다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 영상에서 하이라이

트를 정확하게 추출할 필요가 없기 때문에 정확한 컬러 영역 분할이 필요 없고, 복잡한 텍스처를 갖는 영상에도 적용이 가능하다. 또한 이색성 선 공간의 보팅값을 이용하여 이색성 선을 찾아냄으로써, 잡음으로 인해 발생하는 이색성 선의 오차를 줄일 수 있다. 조명 색도에 제한 조건이 없으므로 자연광 외에도 임의로 필터링 시켜 만든 인공 조명 색도도 추정이 가능하다.

참고 문헌

- [1] G. D. Finlayson and G. Schaefer, "Solving for colour constancy using a constrained dichromatic reflection model," International Journal of Computer Vision, Vol. 42, No. 3, pp. 127-144, 2001.
- [2] G. Klinker, S. Shafer, and T. Kanade, "The measurement of highlights in color images," International Journal of Computer Vision, Vol. 2, No. 1, pp. 7-32, 1988.
- [3] G. Klinker, S. Shafer, and T. Kanade, "A physical approach to color image understanding," International Journal of Computer Vision, Vol. 4, No. 1, pp. 7-38, 1990.
- [4] H. C. Lee, Method for computing the scene-illumination from specular highlights, J. Opt. Soc. Am. A 3, 1694-1699 (1986)
- [5] R. T. Tan, K. Nishino, and K. Ikeuchi. "Color

- constancy through inverse-intensity chromaticity space," Journal of the Optical Society of America A, Vol. 21, No. 3, pp. 321-334, 2004.
- [6] S. Tominaga and B. A. Wandell, "Standard surface-reflection model and illuminant estimation," Journal of the Optical Society of America A, Vol. 6, No. 4, pp. 576-584, 1989.
- [7] K. -J. Yoon and I. -S. Kweon, "Voting-based separation of diffuse and specular pixels," Electronics Letters, Vol. 40, No. 20, pp. 1260-1261, 2004.
- [8] C. S. Kim, "Geometry free white standard reference plate," in Proc. of SPIE 9th Congress of the International Colour Association, Rochester, New York, USA, pp. 816-819, 2001.



최 유 진

1980년 12월 3일생. 2003년 2월 이화여자대학교 정보통신학과(학사). 2005년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학(석사). 2005년 1월~현재 LG전자기술원 Mobile Multimedia 연구소 연구원. 관심분야는 컴퓨터비전, color

constancy, 컬러영상처리, multimedia data



윤 국 진

1976년 11월 15일생. 1998년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학사). 2000년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공(공학석사). 2000년~현재 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공 대학원 박사과정. 관심분야

는 컴퓨터 비전, 스테레오 비전, 컬러 영상 처리



권 안 소

1958년 3월 5일생. 1981년 서울대 기계설계학과(공학사). 1983년 서울대 기계설계학과 대학원(공학석사). 1990년 Carnegie Mellon Univ. Robotics Institute(공학박사). 1991년~1992년 일본 도시바 중앙연구소 연구원. 1992년~현재 한국과학기술

원 교수