

분광반사율에 기반한 색영상처리 시스템 개발

방 상택, 오 현수, 안 석출

부경대학교 화상정보공학부

(2000년 1월 20일 접수, 2000년 2월 20일 최종수정본 받음)

Development of Color Image Processing System based on Spectral Reflectance Ratio

S. T. Bang, H. S. OH, S. C. Ahn

Division of Image & Information Eng., Pukyong National Univ.

stpang@maill.pknu.ac.kr

(Received 20, Jan. 2000, in final form 20, Feb. 2000)

Abstract

In recent year, many imaging systems have been developed, and it became increasingly important to exchange image data through the computer network. Therefore, it is required to reproduce color image independently on each imaging device. However, even if the image are same, perceived color is not always same under different viewing conditions. On the other hand, even if the image are different, we want to perceive same color under different viewing conditions. Therefore we must know the spectral reflectance information of object. We measured many reflectance human skin color and Munsell color patches and those spectra have been analyzed by principle component analysis. The results indicate that the reflectance spectra of human skin can be estimate using only three principal component. For Munsell color patches, five principle components were necessary to estimate the reflectance spectra.

For that purpose, we have developed color image acquisition system based on spectral reflectance information for color recording and reproduction of natural color object. This system is multiband acquisition system that is composed of five band filters and CCD camera. Improved spectral reflectance of object is predicted by five band images taken by color image acquisition system and then we take account of camera's noise and component of object image for predicting accurate spectral reflectance of object. In the results, we confirmed that color difference and MSE(Mean Square Error) between measured and predicted spectral reflectance of object decreased into 0.0071 and 7.72 respectively.

1. 서 론

최근 전자 화상 기술의 발전과 인터넷의 급속한 보급에 의해 미술품의 화상 또는 의용 화상을 네트워크를 이용하여 원격지에서 관찰하는 전자 미술 시스템 혹은 원격 진료 시스템이 요구되고 있다. 이와 같은 화상 시스템에서 발생할 수 있는 문제점 중의 하나는 관찰 환경에서 재현된 색은 촬상시에 사용된 조명 광원의 특성에 크게 의존한다는 것이다. 어떤 광원의 조명 아래서 직접 피사체를 관찰하는 경우에 인간은 색 순응이라는 눈의 특성이 작용되기 때문에 조명 광원의 영향을 제거한 고유의 색을 지각할 수 있다[1]. 그러나 CCD 카메라와 같은 입력장치로 획득한 화상을 CRT등과 같은 출력장치로 재현하는 경우에, 관찰 조명이 변하면 촬상시의 물체색을 재현하기가 어렵다. 따라서 화상의 기록에 있어서 피사체 고유의 분광 반사율을 기록하는 방법들이 제안되었다[2][3]. 또한 저차원의 멀티밴드 영상으로부터 피사체 고유의 분광 반사율을 추정하는 방법이 제안되었고, 피사체가 먼셀(Munsell) 색표와 같은 자연색의 경우는 5~8개의 밴드 영상, 그리고 피부색과 같은 특정색의 피사체의 경우는 3개의 밴드영상으로 분광 반사율의 추정이 가능하다는 보고가 있다[4~9]. 그러나 보고된 방법에서의 문제점들 중의 하나는 원래의 분광 반사율과 추정된 분광 반사율과는 차이가 많다는 것이다.

본 논문에서는 멀티밴드 영상 획득 시스템을 실제로 구성하여 물체의 분광 반사율과 추정된 분광 반사율과의 차이를 줄이기 위해 카메라 특성중의 하나인 노이즈 성분을 첨가하여 선정된 최적의 5개의 필터의 감도를 가시광 영역에 고르게 퍼지게 함으로서 추정된 분광 반사율과 실측한 분광 반사율과 같은 패턴을 가지게 하며, 물체가 가지고 있는 색정보, 즉 유채색과 무채색을 구분하여 각기 다른 알고리즘을 적용함으로써 좀더 정확한 물체의 분광 반사율의 추정이 가능함을 확인하였다. 그리고 본 논문의 유용성과 타당성을 확인하기 위해 추정된 분광 반사율을 이용하여 현색 모델(Von Kriss 모델, Fairchild 모델)과 A광원에서의 이미지를 재현해 보았다.

2. 물체의 분광 반사율 추정

기존의 입력 장치는 3-밴드 화상 획득 시스템으로, 화상 정보는 R, G, B 색 신호로 기록된다. 이와 같은 3-밴드 화상 시스템으로 획득된 정보로부터 자연색의 분광 반사율을 추정할 수 없기 때문에 다수의 광학 필터를 사용한 멀티 밴드 화상 획득 시스템이 필요하다.

그런 멀티 밴드 획득 시스템에서 광원의 분광 방사율을 $E(\lambda)$, 물체 고유의 분광 반사율을 $O(\lambda)$, 카메라의 총합적인 분광 감도를 $S(\lambda)$, m 개 광학 필터의 분광 투과율을 $f_i(\lambda)$ 라고 하면, 카메라의 센서 응답(sensor response)인 V_i 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = \int_0^\infty E(\lambda) O(\lambda) f_i(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad \dots \dots \dots (1)$$

분광 반사율은 가시영역의 표본화된 n 차원의 벡터라 하고, m 개의 필터를 사용한 센서응답은 m 차원의 벡터이다. 여기서 $m=n$ 인 경우는 V_i 값으로부터 피사체의 분광 반사율 $O(\lambda)$ 는 선형적으로 구해진다. 그러나 $m \neq n (m < n)$ 인 경우는 저차원의 벡터로부터 고차원의 분광 반사율을 근사적으로 추정하여야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 Wiener추정 방법을 사용하였다.

m차원의 센서 응답 V_i 를 벡터 V 로 표시하고, n차원의 분광 반사율 $O(\lambda)$ 를 벡터 O 로 표시하면 식 (1)은 식(2)와 같이 된다.

$$V = FO \dots\dots\dots (2)$$

그리고 벡터 F 는 식(3)과 같다.

$$F = f E S \dots\dots\dots (3)$$

여기서 F 는 멀티 밴드 영상 획득 시스템의 고유 특성을 나타내고, 이 값은 한번 결정되면 변하지 않는 상수이다. 멀티-밴드 영상 획득 시스템의 센서응답인 벡터 V 로부터 추정된 물체의 분광 반사율을 O_{est} 라 하면 식(4)와 같다.

$$O_{est} = G V \dots\dots\dots (4)$$

위의 식(2)에서 벡터 V 의 차원과 벡터 O 의 차원이 같은 경우는 벡터 O 를 벡터 F 의 역행렬로서 간단히 구해지지만, 이 둘의 차원이 다른 경우는 그 역행렬로 벡터 O 를 구할 수 없다. 따라서 식(2)를 식(4)와 같이 나타내고, G 를 추정 행렬이라 한다. 행렬 G 는 실측한 물체의 분광 반사율 O 와 추정된 피사체의 분광 반사율 O_{est} 사이의 평균 자승 오차(mean square error : MSE)가 최소가 되도록 결정하고, MSE는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$MSE = \langle (O - O_{est})^T (O - O_{est}) \rangle \dots\dots\dots (5)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 앙상블(ensemble) 평균을 나타낸다. 식(5)는 입력 벡터의 샘플이 다수인 경우는 평균 자승 오차를 나타낸다.

여기서 고유합(Trace) Tr 을 정의하면, 임의의 벡터 a 에 대하여 식(6)과 같이 풀이된다.

$$Tr(aa^t) = a^t a \dots\dots\dots (6)$$

식(6)이 성립되는 것으로부터, 식(5)를 식(6)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$MSE = Tr(\langle (O - GV)(O - GV)^T \rangle) \dots\dots\dots (7)$$

R_{oo} , R_{vv} , R_{ov} 는 상관행렬로 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$R_{oo} = \langle OO^T \rangle, \quad R_{vv} = \langle VV^T \rangle, \quad R_{ov} = \langle OV^T \rangle \dots\dots\dots (8)$$

여기서 다음과 같은 대각화에 의해,

$$Tr(GRov^T) = Tr((GRov^T)^T) = Tr(RovG^T) \dots\dots\dots (9)$$

식(7)은 다음과 같이 나타내는 것이 가능하다.

$$MSE = Tr(R_{oo} - 2RovG^T + GRvvG^T) \dots\dots\dots (10)$$

행렬 G 와 R_{ov} 는 함께 $N \times M$ 행렬이다. 이것들의 행렬을 행벡터로 분해하면 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} g_1^T \\ g_2^T \\ \vdots \\ g_n^T \end{bmatrix}, \quad R_{ov} = \begin{bmatrix} r_1^T \\ r_2^T \\ \vdots \\ r_n^T \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

$N \times N$ 행렬의 n행 n열의 요소는 식(12)와 같다.

$$[R_{ov}G^T]_{nn} = r_n^T g_n, \quad [GR_{vv}G^T]_{nn} = g_n^T R_{vv} g_n \quad \dots\dots\dots (12)$$

따라서 MSE는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$MSE = \sum_{n=1}^N S_n \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$S_n = [R_{oo}]_{nn} - 2[R_{ov}G^T]_{nn} + [GR_{vv}G^T]_{nn} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$= [R_{oo}]_{nn} - 2r_n^T g_n + g_n^T R_{vv} g_n$$

S_n 은 행렬 G 의 제 n 행의 요소만을 포함하기 때문에, 각 n 에 관해서 S_n 을 최소화하는 g_n 을 선택한 경우에 MSE가 가장 최소로 된다.

g_n 이 S_n 을 최소화하기 위해서 필요충분조건으로 g_n 이 다음의 식(15)를 만족하는 것이다.

$$R_{vv} g_n = r_n \quad (n=1, 2, 3, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (15)$$

식(15)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{vv}[g_1, g_2, \dots, g_n] = [r_1, r_2, \dots, r_n] \quad \dots\dots\dots (16)$$

즉, 위의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{vv}G^T = R_{ov}^T \quad \dots\dots\dots (17)$$

따라서 MSE를 최소로 하는 추정 행렬 G 는 식(18)로 나타낼 수 있다.

$$G = R_{ov}R_{vv}^{-1} \quad \dots\dots\dots (18)$$

또한 멀티 밴드 영상 획득 시스템에 있어서 카메라의 센서응답 V 에 노이즈 성분 벡터 N 이 포함되어진 경우는 식(19)과 같이 표현한다.

$$V = FO + N \quad \dots\dots\dots (19)$$

노이즈를 첨가한 물체의 분광 반사율을 구하기 위한 R_{ov} 와 R_{vv} 는 다음과 같다.

$$R_{ov} = R_{oo}F^T + R_{xn} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$R_{vv} = F R_{oo} F^T + F R_{on} + R_{on}^T F^T + R_{nn} \quad \dots\dots\dots (21)$$

따라서 벡터 V 로부터 추정되는 물체의 분광 반사율 O_{est} 를 구하기 위한 추정행렬 G 는,

$$G = R_{oo}F^T (FR_{oo}F^T + R_{nn})^{-1} \quad \dots\dots\dots (22)$$

와 같이 되며, 위 식에서의 R_{on} 은 무상관 행렬이다.

여기서 R_{oo} 는 벡터 O 의 자기 상관 행렬이고, R_{nn} 은 열잡음을 나타내며 그 발생확률이 가우스 분포에 따르고, 동시에 무상관이라면 자기 상관 행렬인 R_{nn} 은 식(21)으로 표현된다.

$$R_{nn} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (21)$$

이때 $\sigma_i^2(i=1, 2, \dots, m)$ 는 각 멀티 밴드 화상에 있어서 노이즈의 분산을 나타낸다.

3. 실험 방법

3-1. 멀티 밴드 영상 획득 시스템

멀티 밴드 영상 획득 시스템을 구성하기 위해, CCD 카메라는 “Toshiba IK-C41MF”를 사용하였으며, 촬영시의 광원은 D65광원, 카메라의 총합특성은 CCD 카메라로부터 측정하여 구하였다. 그리고 광학 필터는 현재 상용화되고 있는 필터의 조합으로 구하였다. 필터의 조합은 추정 행렬로부터 실측한 분광 반사율과 추정된 분광 반사율의 색차(ΔE_{ab})가 최소가 되도록 선정하였다. 이와 같이 구성된 멀티 밴드 영상 획득 시스템으로 촬영하여 얻어진 영상으로부터 자연색에 대한 물체의 분광 반사율 추정을 행하였다.

3-1-1. 광원

멀티 밴드 영상 획득을 위해 사용된 광원은 D65이며, 이 D65광원의 분광 반사율은 Macbeth Standard Illuminant의 광원을 Spectroradiometer Minolta CS-1000으로 측정하였다.

3-1-2. 최적 필터 조합

자연색에 대한 분광 반사율을 추정하기 위해서 먼셀 색표 1485개를 사용하였으며, 이 먼셀 색표는 CIE 색공간에서 물체색이 나타내는 색공간 영역이 고르게 분포하고 있음을 알 수 있었다.

또한 이 샘플에 대한 주성분을 구하고, 이로부터 누적 기여율을 구하였다. 제 5주성분까지의 누적 기여율은 약 99.6%이므로, 먼셀 색표와 같은 피사체를 주성분 5개만으로 원래의 분광 반사율의 99.6%로 근사시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그렇기 때문에 5-밴드 영상에 의한 분광 반사율을 추정하는 것이 가능하다.

실제 멀티 밴드 영상 획득 시스템에 있어서 필터 조합은 현재 상용화되는 27개의 필터의 조합에서 5개의 필터를 선정하기 위해 멀티 밴드 획득 시스템에 의해 추정되어지는 분광 반사율과 원래의 분광 반사율과의 색차(ΔE_{ab})가 최소가 되는 5개의 최적필터 조합을 선정하였다. 선정된 최적필터 조합은 FUJI 필터(SP-1, SC-64, BPM-50)와 Kodak 필터(No.47, No.58)이다.

3-1-3. 카메라의 총합 분광 감도

영상 획득을 위한 카메라는 IR Cutter필터가 내장된 “TOSHIBA IK-C41MF”를 사용하였으며, 이 카메라는 8-bits, 640×480 의 해상도를 가진 B/W 카메라이다.

카메라의 총합 분광 감도를 알기 위해서, 렌즈와 IR Cutter 필터가 장착된 카메라에 Monochrometer에 의해 10nm 간격으로 단색광을 주사하여 각 파장에 따른 영상을 촬영한 다음, 이 촬영된 영상에서 일정 부분(100×100)에 대한 화소치의 평균을 구하여, 이 값을 카메라의 총합 감도로 하였다.

또한 카메라의 센서응답이 카메라의 입출력에 따라 변환되고, 양자화 된 값을 가진다. 이는 각 필터에 따른 센서 응답에 대하여 화소치의 관계는 다르다. 그러므로 각 필터에 따른 카메라 입출력을 구하기 위해서는 10단계의 그레이 패치를 촬영하고, 촬영된 영상의 각 패치 부분에 대한 화소치의 평균값과 그에 대응하는 센서응답과의 관계를 구하였다.

3-2. 가우시안 분산과 필터 특성을 이용한 추정 분광 반사율의 개선 알고리즘

입력장치인 CCD 카메라에는 많은 노이즈 성분을 가지고 있다. 본 논문에서는 이런 노이즈 성분 중 밴드 이미지마다의 분산을 CCD 카메라의 노이즈 성분으로 하였다.

Fig.1은 필터들의 분산을 계산하기 위해 각각의 밴드 이미지를 촬영하여 밴드마다의 분산을 계산한 것 중에서 SC-64필터와 BPM-50필터의 분산을 나타낸 그림이고, 그 결과 밴드 이미지의 분산이 가우시안 분포를 가지고 있음을 확인하였고, 이런 5개 밴드 이미지의 분산들의 평균한 값(1.9630)을 식(19)에 적용하였다.

카메라의 노이즈 성분인 밴드 이미지의 분산값을 첨가하여 물체의 분광 반사율을 추정하여 본 결과, 추정된 분광 반사율이 실측한 분광 반사율과 세기의 차이는 가지고 있지만, 같은 패턴을 가지고 있음을 알 수 있었다.

Fig.2는 그런 세기의 차이를 보완하기 위해, 최적으로 선정된 필터 특성을 고려하여 입력되는 이미지의 성분을 유채색과 무채색을 분리하여 따로 적용한 것이다. 즉, 멀티 밴드 이미지의 픽셀의 값을 비교하여 그 픽셀이 무채색인지, 유채색인가를 구별한 다음 선정된 필터의 분광 투과율을 고려하여 그 픽셀의 분광 반사율을 추정한 다음, 추정된 분광 반사율을 다시 합치는 것이다. 그 결과, 노이즈를 첨가하여 추정한 분광 반사율의 문제점인 유채색을 가진 픽셀의 추정한 분광 반사율이 실측한 분광 반사율과의 세기의 차이를 보였지만, 필터 특성을 고려하여 적용함으로써 이런 세기의 차이를 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

3-3. 분광 반사율을 이용한 현색적 색재현

위의 실험 방법으로 개발된 멀티 밴드 획득 시스템을 이용하여 물체의 분광 반사율을 추정한 다음, 추정된 분광 반사율을 다른 광원과 현색 모델, 즉 Von Kries 모델과 Fairchild 모델에 적용하여 보았다.

4. 실험결과 및 고찰

현재 상용화되고 있는 27개의 필터들 중에서 멀티 밴드 화상 획득 시스템에 의해 추정되어지는 분광 반사율과 원래의 분광 반사율과의 색차(ΔE_{ab})가 최소로 되도록 선정된 5개의 최적 필터를 나타내고 있다. 최소색차(ΔE_{ab})는 1이었으며, 선정된 필터는 FUJI Optical Filter의 BPM-50, SC-64, SP-1 그리고 Kodak Optical Filter의 No.47, No.58이다.

Fig.3는 이전 연구에서 추정한 Macbeth Color Checker의 분광 반사율과 카메라의 노이즈를 적용하여 추정한 분광 반사율을 비교한 것이다. 가우시안 분산을 적용하지 않고 추정한 분광 반사율은 테스트 타겟인 Macbeth Color Checker의 분광 반사율과의 큰 차이를 보이는 반면에 분산을 적용하고 추정한 분광 반사율은 테스트 타겟의 분광 반사율과는 세기의 차이는 있지만 거의 비슷한 패턴을 가지고 추정됨을 알 수 있다.

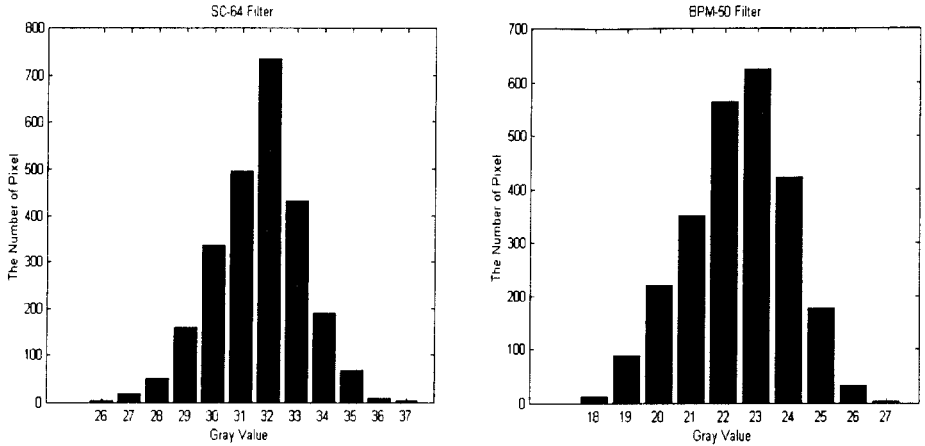


Fig. 1. Distribution of SC-64 filter and BPM-50 filter. Mean distribution of 5-filter is

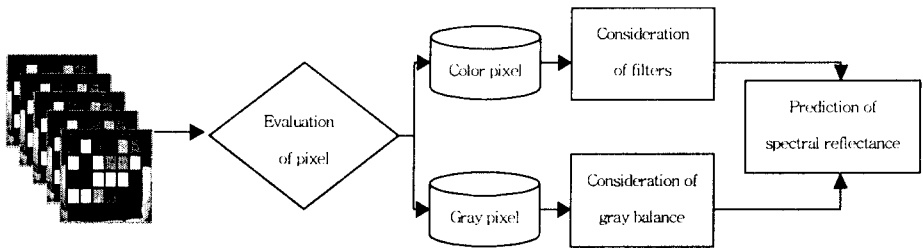


Fig. 2. Flowchart of different application of characteristic of filters dividing each pixel.

Fig. 4은 추정시 멀티 밴드 이미지들의 픽셀을 비교하여 유채색과 무채색영역을 구분하여 각기 다른 알고리즘을 적용하여 분광 반사율을 추정한 것이다. 이 결과, Fig.3의 카메라의 노이즈를 적용하여 추정한 분광 반사율과 실측한 분광 반사율간의 세기를 보정할 수 있었으며, 평균자승오차(MSE)와 평균 색차 (ΔE_{ab})가 각각 0.0071과 7.72로 감소함을 알 수 있었다. Fig. 5는 Macbeth Color Checker를 멀티 밴드 획득 시스템으로 촬영하여 분광 반사율을 추정한 후, 추정한 분광 반사율을 가지고 다른 광원과 현색 모델에 적용한 그림이다. 이 그림에서 (a)는 A광원의 이미지이며, (b)는 D65광원의 이미지이며, (c)는 A광원의 이미지를 Fairchild 모델로 재현한 것이며, (d)는 A광원의 이미지를 Von Kries 모델로 재현한 이미지이다.

5. 결 론

본 논문에서 화상 시스템에서 발생할 수 있는 문제점 중의 하나인 관찰 환경에서 재현된 색이 촬상시에 사용된 조명 광원의 특성에 따라 달리 지각되지 않게 하기 위해서 화상의 기록에 있어 물체의 분광 반사율을 추정하여 다른 조명 광원하에서도 물체를 같은 색으로 지각되도록 하는 연구이다.

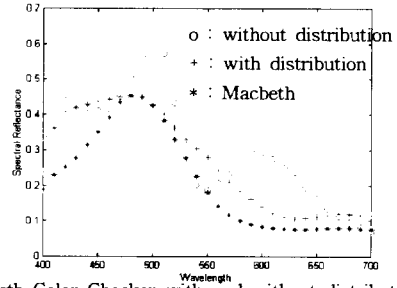
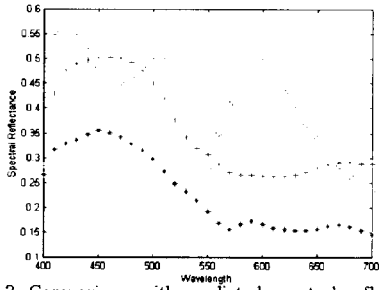


Fig. 3. Comparison with predicted spectral reflectance of Macbeth Color Checker with and without distribution.

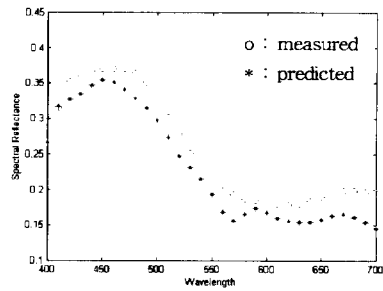
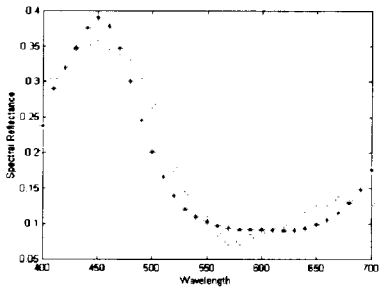
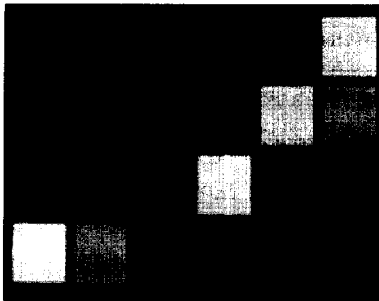
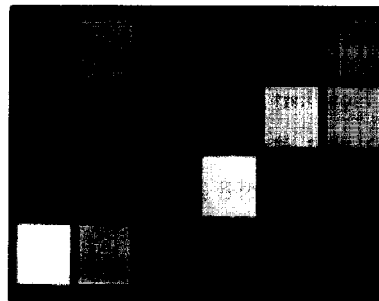


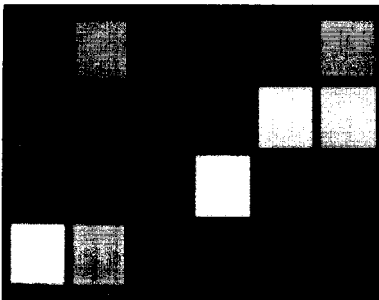
Fig. 4. Comparison with measured and predicted spectral reflectance of Macbeth color checker considering characteristics of filters.



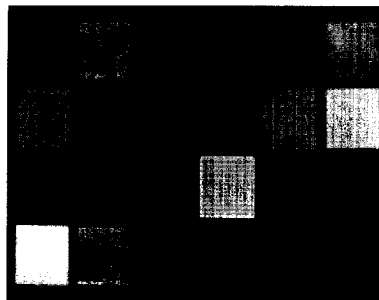
(a) A light source



(b) D65 light source



(c) Fairch



(d) VonKries

Fig. 5. Application into color appearance models using predicted spectral reflectance.

이를 위해, 우리는 멀티밴드 영상 획득 시스템을 개발하였으며, 이 시스템을 개발하기 위해 5개의 필터 (FUJI Optical Filter[BPM-50, SC-64, SP-1]와 Kodak Optical Filter[No.47, No.58])를 선정하였고 CIE Standard Illuminant D65의 분광 방사율과 CCD카메라의 분광 감도를 측정하였다. 이렇게 개발된 시스템으로 물체를 촬영한 후, 촬영된 밴드 이미지를 가지고 물체의 분광 반사율을 추정하여 본 결과, 추정된 물체의 분광 반사율과 실측한 물체의 분광 반사율과의 평균자승오차(MSE)는 0.0071이었고, 평균 색차(ΔE_{ab})는 7.72로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 부경 학술 진흥 재단 사업의 연구비에 의하여 연구되었으므로 이에 감사 드립니다.

References

1. Mark D. Fairchild, Color Appearance Models, Addison-Wesley Press, pp. 23-28, 1998.
2. H. Haneichi, T. Hasegawa, N. Tsumura and Y. Miyake, "Design of Color Filters for Recording Artwork", IS&T 50th Annual Conference, pp. 369-372, 1997.
3. J. K. Eem, H. D. Shin and S. O. Park, "Reconstruction of Surface Spectral Reflectances Using Characteristic Vectors of Munsell Colors", IS&T 1994 Color Imaging Conferences Proceedings, pp. 127-131, 1994.
4. S. H. Lee, J. P. Kim, E. H. Lee, S. C. Ahn, "Optimization of color filters selection to estimate surface reflectance of Munsell colors", The Annual conference of The Korea Printing Society, pp. 1-6, 1998.
5. C. G. Kim, S. T. Pang, H. Y. Park, S. M. Ryu, M. O. Yoo, S. C. Ahn, "A method to predict spectral reflectance of skin color taken by 3-channel input device", The Annual conference of The Korea Printing Society, pp. 31-35, Nov. 1998.
6. J. P. Kim, S. C. Ahn, "Colorimetric color reproduction according to illuminant for RGB digital signal on CRT", The Annual conference of Korea Printing Society, pp. 99-103, Dec 1998.
7. J. P. Kim, S. T. Pang, E. H. Lee, S. C. Ahn, "A method to predict spectral reflectance of the natural of color using RGB digital signals", The 10th Annual conference of the Korean Society for Imaging Science, pp. 45, Dec.1998.
8. E. H. Lee, S. C. Ahn, J. H. Kim, "Accurate Color Reproduction using Principal Component Analysis and A Neural Network based on Reflectance Spectra", The 10th Annual conference of the Korean Society for Imaging Science, pp.13-19, Dec. 1998.
9. S.H.Lee, S.T.Pang, C.H.Lee, E.H.Lee, S.C.Ahn, "Estimation of surface spectral reflectance using multi-band image," The 11th Conference of The Korean Society for Imaging Science, pp. 13-21, 1999.