

物體의 分光反射率 推定을 위한 最適필터의 選定

이승희, 이을환*, 유미옥**, 노상철***, 안석출

부경대학교 인쇄정보공학과 *부산대학교 전자공학과

한국해양대학교 제어계측공학과 *부경대학교 산업디자인학과

(1998년 11월 21일 접수, 1998년 12월 20일 최종수정본 접수)

Optimization of color filters selection to estimate surface spectral reflectance of Munsell colors

S. H. Lee, E. H. Lee, M. O. Yoo**, S. C. Roh***, S. C. Ahn*

Department of Graphic Arts Information, Pukyong National University

*Department of Electronics Engineering, Pusan National University

**Department of Control & Instrumentation, Korea Marine University

***Department of Industrial Design, Pukyong National University

(Received 21 November 1998, in final form 20 December 1998)

Abstract

The object color does not look same under the different light source. It depends on the surface spectral reflectance and the spectral distribution of light source. Therefore we should find the surface spectral reflectance of object color and the spectral distribution of light source for color reproduction.

Using Wiener estimation, we can estimate the spectral reflectance from low dimensional images obtained with multi-band image acquisition system. The kind and the number of imaging filters have the effect on the estimation of the spectral reflectance. Therefore it is important that optimal filters are selected to minimize the error of the result.

In this paper, we describe methods to select optimal filters with minimum error between measured and estimated surface spectral reflectance and to estimate surface spectral reflectance of Munsell color chart from six multi-band images by using Wiener estimation.

1. 서 론

피사체로부터 반사되어 눈에 들어오는 자극치는 피사체 고유의 분광 반사에 대응하고, 그 분광 반사는 피사체의 성질을 나타내는 중요한 정보중의 하나이다. 그러나 사진이나 디지털 카메라에서 획득하는 영상은 분광 정보가 아니고 R(Red), G(Green), B(Blue) 색 정보이다. 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 발생되는 문제점의 하나는 관찰 환경에서 재현된 색은 활상시에 사용된 조명 광원의 특성에 크게 의존한다는 것이다. 만약 어떤 광원의 조명 아래서 직접 피사체를 관찰하는 경우는 색 순응이라는 눈의 특성이 작용되기 때문에 조명 광원의 영향을 제거한 고유의 색을 지각할 수 있다¹⁾. 그러나 피사체가 화상으로서 CRT등과 같은 표시장치로 재현되는 경우는 활상시의 조명 환경에 대한 정보는 시각 시스템에 영향을 주지 않는다. 그러므로 재현된 화상이 피사체 고유의 색을 나타내는지 또는 조명광의 영향을 받은 피사체의 색인지를 판단할 수 없다. 따라서 화상의 기록에 있어서 피사체 고유의 분광 반사를 기록하는 몇몇 방법들이 제안되어 있다²⁾³⁾. 분광 반사의 정보로 기록된 화상은 임의의 조명광의 분광 데이터를 적용함에 의해서 그 조명하의 색 재현을 실현할 수 있다. 한편 가시 영역(400nm~700nm)의 파장을 5nm(또는 10nm)로 측정할 경우, 한 화소에 대한 분광 반사는 61(또는 31)차원이나 되므로 피사체 전체를 분광 반사로 기록하는 것은 매우 어렵고 현실적이지 못하다. 그러므로 저차원의 멀티-밴드(multi-band) 영상으로부터 피사체 고유의 분광 반사를 추정하는 방법이 제안되었고, 피사체가 먼셀(Munsell) 색표와 같은 자연색의 경우는 8개의 밴드 영상, 그리고 피부색과 같은 특정 색의 피사체의 경우는 3개의 밴드 영상으로 분광 반사의 추정이 가능하다는 보고가 있다⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾. 추정된 분광 반사의 정확도는 영상 획득에 사용한 필터의 종류에 따라 크게 달라진다.

본 논문에서는 Wiener 추정²⁾을 사용하여 자연색의 물체에 대한 분광 반사 추정과 멀티 영상의 획득 시스템에 있어서 사용할 필터의 수에 대한 최적 필터의 조합을 결정하는 방법을 기술하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 타당성과 유용성을 확인하였다.

2. 멀티-밴드 영상 획득 시스템

디지털 카메라나 컬러 스캐너는 3-밴드 영상 시스템으로, 영상 정보는 R, G, B 색 신호로 기록된다. 이와 같은 3-밴드 영상 시스템으로 획득된 정보로부터 자연색의 분광 반사를 추정할 수 없으므로, 멀티-밴드 영상 획득 시스템이 필요하다. Fig.1은 3개 이상의 광학 필터를 사용한 멀티-밴드 영상 획득 시스템을 나타내고 있다.

여기서 광원의 분광 방사 분포를 $E(\lambda)$, 피사체 고유의 분광 반사를 $O(\lambda)$, 디지털 카메라의 총합적인 분광 감도를 $S(\lambda)$, m 개 광학 필터의 분광 투과를 $f_i(\lambda)$, 그리고 디지털 카메라의 출력 신호를 V_i 라고 하면, 출력 신호 V_i 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

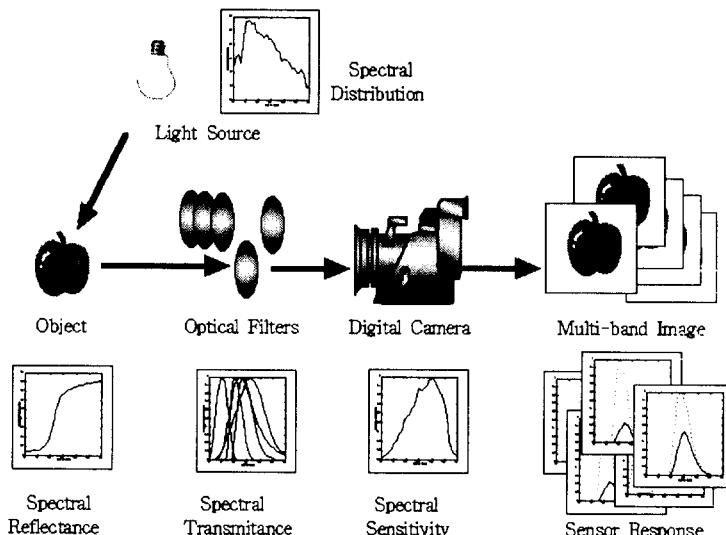


Fig.1. Multi-band image acquisition system.

분광 반사는 파장이 400nm~700nm까지 표본화된 n 차원의 벡터라 하고, m 개의 필터를 사용한 출력 신호는 m 차원의 벡터로 한다. 여기서 광원의 분광 방사 데이터, 필터의 분광 투과, 그리고 디지털 카메라의 총합적인 분광 감도를 알면, $m=n$ 인 경우는 V_i 값으로부터 피사체의 분광 반사 $O(\lambda)$ 는 선형적으로 구해진다. 그러나 $n \neq m$ ($m < n$)인 경우는 저차원의 벡터로부터 고차원의 분광 반사 벡터를 근사적으로 추정하여야 한다.

3. 분광 반사율 추정

피사체의 분광 반사율 벡터는 멀티-밴드 영상 시스템에 의해서 획득된 m 차원의 영상 정보 보다 차원이 높기 때문에 선형으로 분광 반사율을 구할 수 없다. m 차원의 벡터로부터 n 차원의 분광 반사율 벡터를 구하기 위한 몇몇 방법들이 제안되었으나, Wiener 추정 방법이 유용하다는 보고가 있다²⁾.

m 차원의 출력 신호 V_i 를 벡터 \mathbf{V} 로 표시하고, n 차원의 분광 반사 $O(\lambda)$ 를 벡터 \mathbf{O} 로 표시하면 식(1)은 식(2)와 같이 된다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{FO} \quad (2)$$

여기서 벡터 \mathbf{F} 는 식(3)과 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_i^t \mathbf{ES} \quad (3)$$

단, \mathbf{f}_i^t 는 광학 필터의 분광 투과율 $f_i(\lambda)$ 를 벡터로 나타낸 것이고, t 는 전치(transpose)를 나타낸다. 그리고 \mathbf{E} 와 \mathbf{S} 는 광원의 분광 방사 분포와 디지털 카메라의 총합적 분광 감도를 벡터로 표시한 것이다

식(2)에서 벡터 \mathbf{F} 는 멀티-밴드 영상 획득 시스템의 고유 특성을 나타내고, 이 값은 한번 결정되면 변하지 않는 상수다. 벡터 \mathbf{V} 는 멀티-밴드 영상 획득 시스템의 출력 값이고, 이 값으로부터 추정한 피사체의 분광 반사를 \mathbf{O}_{est} 라 하면 식(4)와 같다.

$$\mathbf{O}_{est} = \mathbf{GV} \quad (4)$$

벡터 \mathbf{V} 의 차원과 벡터 \mathbf{O} 의 차원이 같은 경우는 식(2)에서 \mathbf{O} 를 \mathbf{F} 의 역행렬로 간단히 구해지지만, 이들 차원이 다른 경우는 그 역행렬로 \mathbf{O} 를 구할 수 없다. 따라서 식(4)와 같이 나타내고, \mathbf{G} 를 추정 행렬이라 한다. 행렬 \mathbf{G} 는 실측한 피사체의 분광 반사 \mathbf{O} 와 추정한 피사체의 분광 반사 \mathbf{O}_{est} 사이의 평균 자승 오차 MSE가 최소가 되도록 결정하고, MSE는 식(5)와 같이 표현한다.

$$MSE = \langle |\mathbf{O} - \mathbf{O}_{est}|^2 \rangle \rightarrow \min \quad (5)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 전체 평균을 나타낸다. 추정 행렬 \mathbf{G} 는 식(6)으로 표시된다.

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_{ov} \mathbf{R}_{vv}^{-1} \quad (6)$$

과 같이 되고, 여기서 \mathbf{R}_{ov} , 및 \mathbf{R}_{vv} 는 식(7)과 같은 상관 행렬로 정의된다.

$$\mathbf{R}_{ov} = \langle \mathbf{OV}^t \rangle, \quad \mathbf{R}_{vv} = \langle \mathbf{VV}^t \rangle \quad (7)$$

또한 멀티-밴드 영상 획득 시스템에 있어서 출력 벡터 \mathbf{V} 에 노이즈 성분 벡터 \mathbf{N} 이 포함되어진 경우는 식(8)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{FO} + \mathbf{N} \quad (8)$$

따라서 벡터 \mathbf{V} 로부터 추정되는 피사체의 분광반사 \mathbf{O}_{est} 를 구하기 위한 추정행렬 \mathbf{G} 는 식(9)가 된다.

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_{\text{OO}} \mathbf{F}^t (\mathbf{F} \mathbf{R}_{\text{OO}} \mathbf{F}^t + \mathbf{R}_{\text{NN}})^{-1} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{R}_{OO} 는 벡터 \mathbf{O} 의 자기 상관 행렬이다.

노이즈 성분 벡터 \mathbf{N} 은 열잡음이며, 그 발생확률이 가우스 분포에 따르고, 동시에 무상관이라면 벡터 \mathbf{N} 의 자기 상관행렬인 \mathbf{R}_{NN} 은 식(10)으로 표현된다.

$$\mathbf{R}_{\text{NN}} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & 0 \\ & \sigma_2^2 & \ddots \\ 0 & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

4. 실험 방법

자연색의 분광 반사를 추정을 위하여 사용한 시료는 CIE 색공간에 고르게 분포된 먼셀 색표 중 320개이고, 이들 색표의 3자극치와 분광 반사를 Techkon사의 "SP-820"으로 측정한 데이터를 사용하였다. Fig.1과 같은 시스템을 가상하였고, 여기서 카메라의 총합 특성은 CCD 센서의 총합 특성은 "KODAK DCS420"의 데이터를 사용하였으며, 광원은 D65, 그리고 광학 필터는 현재 상용화되어 있는 FUJI 필터의 분광 투과 데이터를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 최적 필터의 수와 필터의 조합은 추정 행렬로부터 실측한 분광 반사와 추정한 분광 반사의 색차가 최소가 되도록 선정하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1. 먼셀 컬러 샘플의 주성분 분석

표본 샘플에 사용한 320개의 먼셀 색표의 CIExy 색도도는 Fig.2와 같고, 320개의 샘플에 대한 분광 반사 벡터로부터 구한 주성분의 누적 기여율은 Fig.3과 같다. 표본 샘플에 사용한 320개의 시료는 CIE 색공간에서 물체색이 나타내는 색 공간 영역을

고르게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그리고 제8 주성분까지의 누적 기여율은 Table 1과 같고, 제5 주성분까지의 누적 기여율은 약 99.5%로 나타났다. 이는 면셀 색표와 같은 파사체를 5-밴드 영상 시스템으로 획득하여 추정한 분광 반사는 실측의 99.5%의 정보를 추정할 수 있다는 의미를 나타낸다. 그리고 8-밴드 이상이면 99.9%이상의 정보를 추정할 수 있게 된다.

Table 1. Cumulative contribution ratio of 320 color samples

Number of principal components	Cumulative contribution ratio [%]
1	70.20
2	90.04
3	97.74
4	98.85
5	99.45
6	99.68
7	99.89
8	99.94

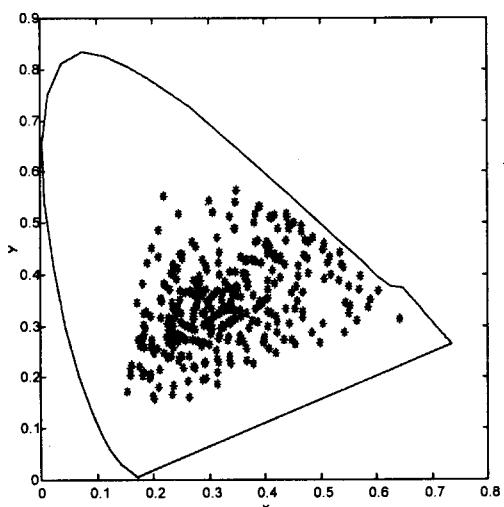


Fig.2. The xy coordinate of sample data.

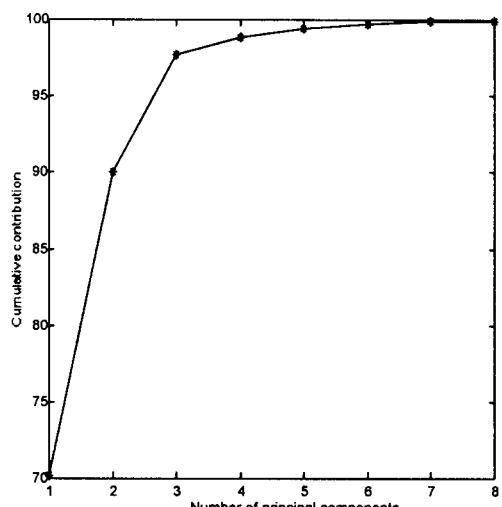


Fig.3. Cumulative contribution ratio of principal components.

5.2 분광 반사를 추정

(1) 필터의 분광 투과율과 최적 필터 결정 방법

현재 시판되는 FUJI社 필터중 24매(SC-58, SC-60, SC-64, SC-66, SC-68, SP-1, SP-2, SP-3, SP-5, SP-6, SP-7, SP-9, SP-10, SP-11, SP-15, SP-17, SP-19, BP-42,

투과율은 Fig.4과 같다. 이들 필터에서 3~7매까지의 최적 필터 조합을 Fig.5와 같은 방법으로 추정하였다. 이때 노이즈가 없는 경우, 노이즈 분산이 0.1, 그리고 0.2인 경우에 대해서 최적 필터의 조합을 결정하였다.

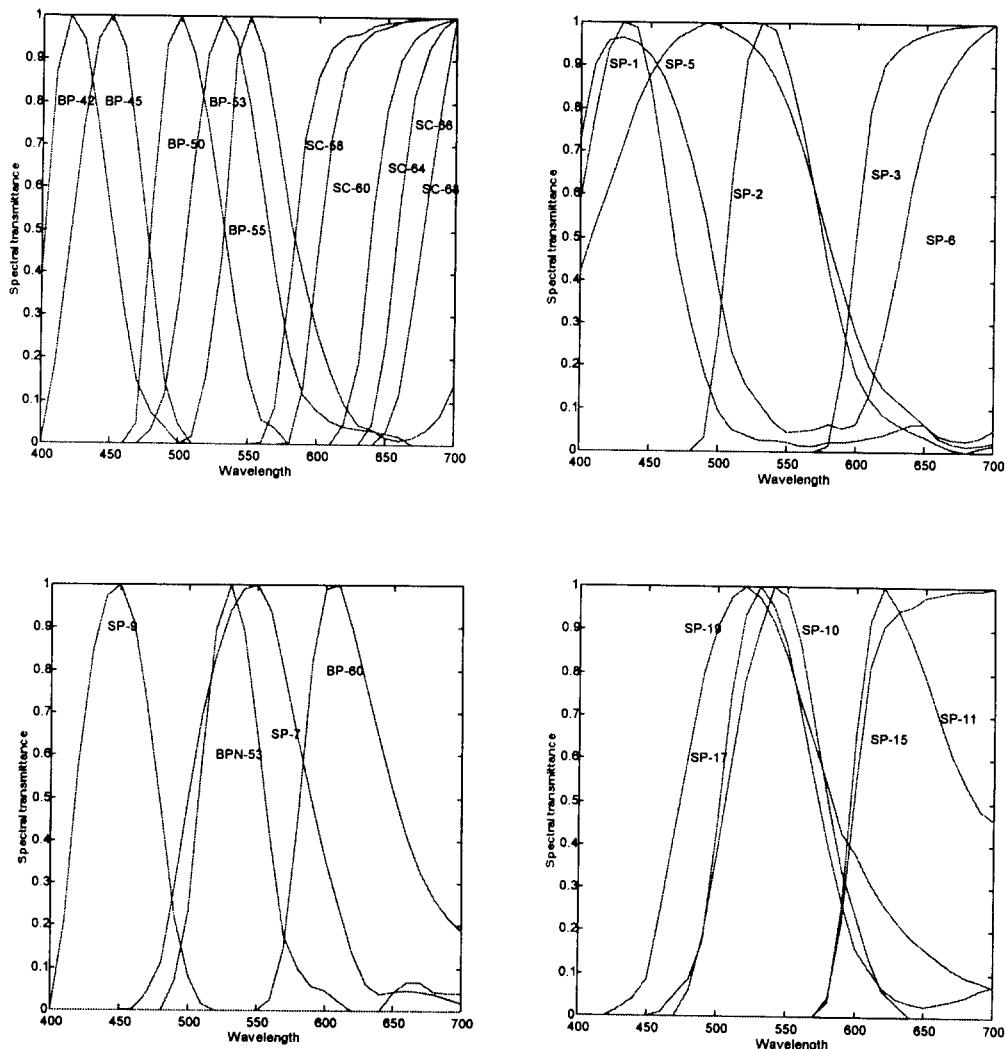


Fig.4. Spectral transmittance of color filters.

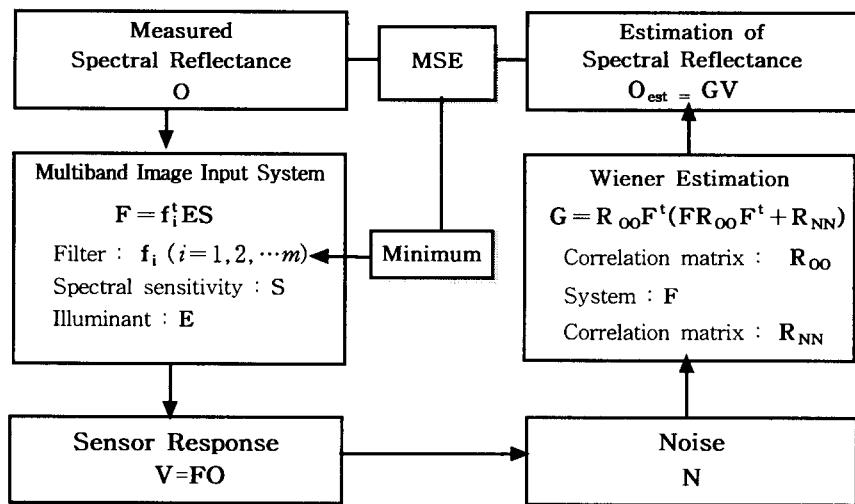


Fig.5. Schematic diagram for selection of optimal filters.

(2) 최적 필터의 조합

필터의 매수와 노이즈 적용에 따른 최적 필터 조합을 결정함과 동시에 추정 행렬 G 가 Fig.5의 방법으로 구해진다. 결정된 필터의 조합의 정도를 평가하기 위해서 표본 샘플에 사용되지 않은 먼셀 색표와 “Macbeth Color Checker”의 24색에 대한 분광 반사율을 추정한 값과 실측한 값과의 평균 색차를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Color difference of color patches according to the number of filter.

Number of filters	Optimal filters	Noise	ΔE_{ab}
3	SC-60, BP-45, BP-50	0.0	3.51
	SC-60, BP-45, BP-50	0.1	3.52
	SC-60, BP-45, BP-50	0.2	3.52
4	SC-60, BP-45, BP-50, BP-55	0.0	1.29
	SC-60, SP-3, BP-45, BPN-53	0.1	2.45
	SC-60, SP-3, BP-42, BPN-45	0.2	2.29
5	SC-58, SC-64, SP-6, BP-45, BPN-53	0.0	0.54
	SC-58, SC-64, SP-6, BP-45, BPN-53	0.1	0.53
	SC-58, SC-64, SP-6, BP-45, BPN-53	0.2	0.47
6	SC-66, SP-3, BP-42, BPN-45, BP-50, BPB-53	0.0	0.20
	SC-66, SP-9, BP-42, BPN-45, BPB-53, BPN-53	0.1	0.37
	SC-66, SP-3, SP-9, BP-42, BPN-45, BPB-53	0.2	0.42

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이, 멀티-밴드 영상 획득 시스템에서 노이즈가 0인 경우에는 5-밴드로 색차 0.54의 결과가 나왔고, 4-밴드로는 색차가 1.29로 나왔다. 따라서 노이즈가 0인 경우라도 4-밴드로서는 분광 반사율 추정의 정도가 낮은 것을 알 수 있다.

노이즈의 분산이 0.1인 경우는 5-밴드로는 색차가 0.53의 결과가 나왔고, 4-밴드로는 색차가 2.45가 나왔다. 또한 노이즈의 분산이 0.2인 경우도 5-밴드로는 색차가 0.47이지만, 4-밴드로는 2.29의 색차가 나왔다. 따라서 멀티-밴드 영상 획득 시스템에서 노이즈가 포함되어진 경우라도 4-밴드 영상보다도 5-밴드 영상에 의한 분광 반사율 추정의 정도가 좋다는 것을 알 수 있다.

(3) 분광 반사율 추정

5-밴드 화상 획득 시스템에 의해서 얻어지는 출력 신호 **V**로부터 추정되어지는 "Macbeth Color Checker"의 분광 반사율을 평가하기 위해 각 패치에 대해 실측된 분광 반사율과의 평균 자승 오차를 구하였고, 그 평균 자승 오차와 색차를 Fig.6에 나타내었다. 그 중에서 최대 오차를 가지는 컬러 패치 2개의 분광 반사율과 최저 오차를 가지는 컬러 패치 2개의 분광 반사율을 Fig.7에 나타내었다. "Macbeth Color Checker"의 분광 반사율 평가에 있어서 최대 평균 자승 오차는 0.062이며, 이들의 평균은 0.012로 나타났다. 또한 최대 평균 자승 오차를 가지는 분광 반사율 추정에 있어서 색차는 2.76이고 전체 평균 색차는 0.73의 결과가 나왔다.

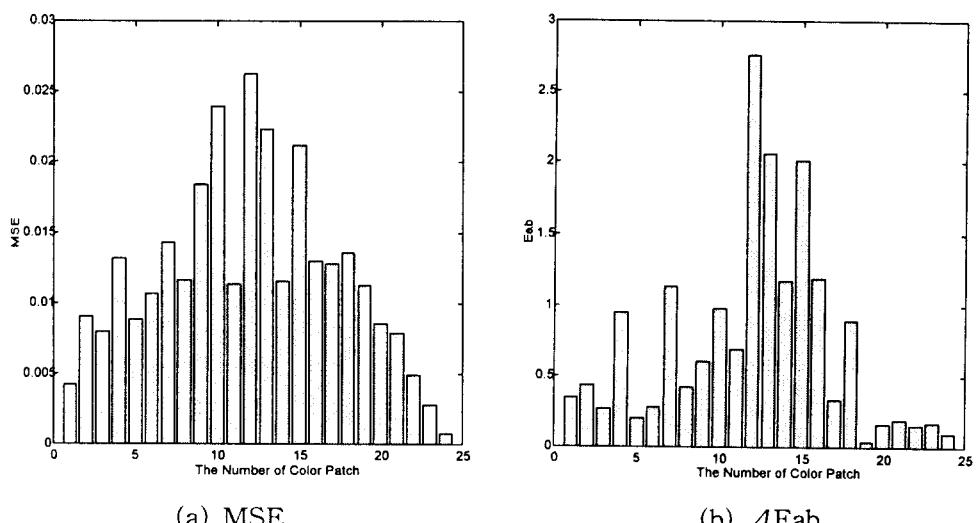


Fig.6. MSE and ΔE_{ab} of "Macbeth Color Checker" in 5-band image acquisition system

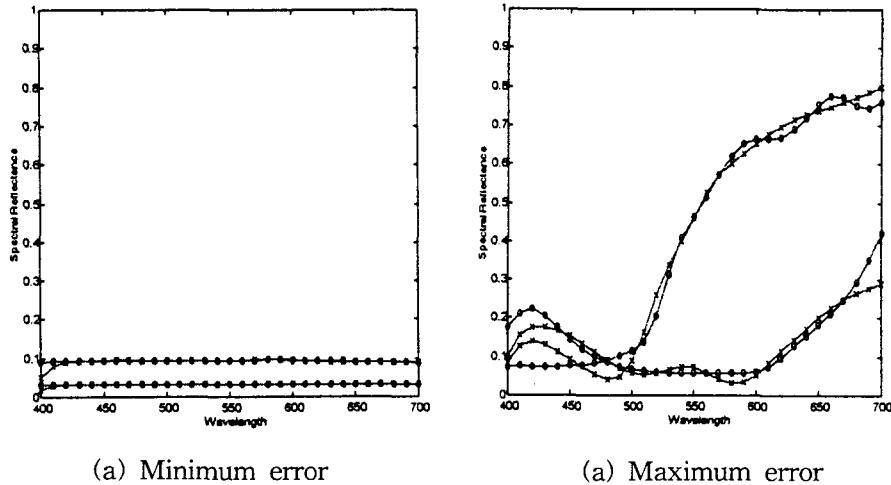


Fig. 7. Comparison of MSE between estimated(x-lines) and measured(o-lines) spectral reflectance of "Macbeth Color Checker".

6. 결 론

Wiener 추정을 사용한 분광 반사의 추정과 멀티 영상의 획득 시스템에 사용할 필터의 수에 대한 최적 필터의 조합을 결정하는 방법을 시뮬레이션 한 결과 다음과 같은 사실을 알았다.

(1) 5번째까지 고유값의 누적 기여율은 99.5%, 8번째까지는 99.9%로 5-밴드가 최적이었다.

(2) 노이즈 분산 0.1에 대한 5-밴드 필터의 최적 조합은 SC-58, SC-64, SP-6, BP-45, BPN-53이고, 색차는 0.53로 나타났다.

(3) 노이즈 분산 0.2에 대한 5-밴드 필터의 최적 조합은 SC-58, SC-64, SP-6, BP-45, BPN-53이고, 색차는 0.47으로 나타났다.

이상의 결과로 자연색의 분광 반사를 추정을 위한 멀티-밴드 영상 획득 시스템의 밴드수는 5가 최적이고, 노이즈 분산이 다른 경우 필터의 최적 조합이 달라짐을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Mark D. Fairchild, Color Appearance Models, Addison-Wesley Press, pp.23~28, 1998.
2. H.Haneishi, T.Hasegawa, N.Tsumura and Y.Miyake, "Design of Color Filters for Recording Artworks", 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 Conference Proceedings, pp.127
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 Scitiy, 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 Korean Society of Color Studies, 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.