

論文2003-40SP-2-2

유사 분광반사율 모집단별로 구성된 주성분 집합을 이용한 개선된 분광반사율 추정

(Improved Spectral-reflectance(SR) Estimation Using Set of Principle Components Separately Organized for Each SR Population with Similar SRs)

權 五 雪 * , 李 澈 熙 ** , 李 昊 根 * , 河 永 浩 *

(Oh-Seol Kwon, Cheol-Hee Lee, Ho-Keun Lee, and Yeong-Ho Ha)

요 약

본 논문에서는 3대역 RGB카메라를 이용하여 분광 반사율을 추정할 때 추정오차를 개선하는 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 색상의 영역별로 적응적인 주성분 집합을 구성함으로써 추정오차를 줄였다. 이때 적응적인 주성분 집합을 구성하기 위하여 Lloyd양자화기 설계 알고리즘을 적용하여 N개의 주성분 집합을 구성하기 위한 분광반사율 모집단을 구성하였다. 전체 모집단으로 사용한 1485 Munsell 색시료의 대표값을 찾아내기 위해서, 초기값으로 Macbeth ColorChecker를 사용하였으며 Lloyd알고리즘의 반복 적용으로 분광 반사율 모집단 전체를 영역별로 분류하고 각 영역에 대하여 주성분 분석을 통해 적응적인 주성분 집합을 구성하였다. 실험 결과, 제안한 방법은 색차 및 분광 반사율에 대한 평균자승오차가 기존의 두 가지의 3대역 주성분 분석 방법 및 5대역 위너 추정을 이용한 분광 반사율 추정 방법보다 개선됨을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes an algorithm to reduce the estimation error of surface spectral-reflectance(SR) using a conventional 3-band RGB camera. In the proposed method, estimation error can be reduced by using adaptive principal components(PCs) for each color region. In order to build adaptive set of PCs, n SR populations are organized for n PC sets by using Lloyd quantizer design algorithm. Macbeth ColorChecker is utilized as initial representative SR values for 1485 Munsell color chips of total color population and the Munsell chips are divided subsets and a set of corresponding adaptive PCs per each subset is organized. As a result of experiments, the proposed method showed advanced estimation performance compared to both the two 3-band PCA methods and the 5-band wiener method.

Keywords : 분광 반사율 추정, 광원 추정, 색 항상성, 색 재현

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣컴퓨터學部

(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National Univ.)

** 正會員, 慶雲大學校 컴퓨터工學科

(Dept. of Computer Engineering, Kyungwoon Univ.)

※ 본 연구는 과학기술부 NRL 사업(MI0203000102-02J0000-04810) 지원에 의해서 수행되었습니다.

接受日字:2002年8月28日, 수정완료일:2003年3月8日

I. 서 론

카메라로 입력되는 색은 주변 광원의 분광 분포, 물체의 분광 반사율 그리고 카메라의 분광 감도의 곱으로 나타나는 자극이며 이때 물체의 분광 반사율은 물체의 고유한 색자극을 표시하는 중요한 요소이다. 따라서 물체의 분광 반사율을 추정함으로써 피사체의 고유한 색자극을 얻고자하는 연구가 매우 활발하다. 즉 다

수 개의 색필터를 부착한 다대역 카메라 시스템을 구성하여 피사체를 촬영한 뒤 위너 추정^[1,2] 및 주성분 분석^[3-8] 방법으로 물체의 고유한 분광 반사율을 추정함으로써 분광 분포에 기초한 색재현을 가능하게 하고 있다.

현재 보고된 바에 의하면 자연색 추정시에는 5매 이상의 색필터를 이용할 경우 인간 시각이 구별해 낼 수 있는 색차 범위 이내로 물체의 분광 반사율 추정이 가능하며 피부색과 같은 특수색의 경우에는 3매의 색필터를 이용하여 근소한 색차 범위 내에서 물체의 분광 반사율 추정이 가능하다고 보고 되고 있다. 그러나 5대역 영상 획득 시스템의 경우 추가적인 색필터를 부착해야 하며 중복 촬영을 하여야 하므로 기존의 RGB카메라 시스템으로 구현이 어렵다. 따라서 기존의 RGB카메라를 이용하여 정밀한 분광 분포 추정을 위해 유사색 모집단을 구성하고 각 유사색 모집단에 대해 별도로 주성분 벡터를 구함으로써 각 색에 대한 추정오차를 줄이는 방법이 제안되었다^[9]. 그러나 이 방법의 경우 전체 색을 영역별로 나누는 과정에서 Macbeth ColorChecker를 이용함으로써 유사색 모집단으로 나누어진 각 영역의 크기가 일정하지 않은 단점이 있다. 따라서 물체의 분광 반사율 추정시 모집단간의 추정 오차의 분산이 크다. 그러므로 본 연구에서는 색상 영역별 모집단들을 구하는 과정에서 Lloyd 양자화기 설계 알고리즘^[10]을 적용함으로써 모집단의 구성을 최적화하여 영역별로 고른 추정오차를 갖게 하였으며 결과 색상 영역별 모집단의 누적기여도를 개선할 수 있었다. 또한 Lloyd 알고리즘을 적용시 빠른 수렴 결과를 얻기 위해 초기 대표 벡터로 색역에 비교적 고른 분포를 갖는 Macbeth ColorChecker를 사용하였다.

제안된 방법의 성능 평가를 위하여 분광 반사율 전체모집단에서 임의로 선택된 분광 반사율에 대해 추정 실험을 하였다. 비교 대상으로는 3대역 주성분 분석, 위너 추정을 이용한 5대역 추정 방법 및 기존의 유사색 3대역 주성분 분석 방법을 사용하였으며, 분광 반사율의 평균추정오차 및 누적 기여율 비교를 통하여 제안된 방법의 유용성을 평가하였다.

II. 분광 반사율 추정

1. 주성분 분석에 의한 분광 반사율 추정 방법

다대역 카메라를 이용하여 물체의 분광 반사율을 추

정할 경우 카메라의 센서응답 V_i 는 주변 광원의 분광 분포 $E(\lambda)$, 물체 고유의 분광 반사율 $O(\lambda)$, 카메라의 분광 감도 $S(\lambda)$, m 매의 광학 필터의 분광 투과율 $f(\lambda)$ 으로 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = \int_1^n E(\lambda)O(\lambda)f_i(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

위 식을 행렬식으로 표시하면

$$\begin{aligned} V_i &= F_i E S O \\ &= F' O \quad (i=1,2,\dots,m) \end{aligned} \quad (2)$$

이때 물체 고유의 분광 반사율 O 는 식 (3)과 같이 몇 개의 주성분을 이용하여 매우 작은 오차 범위 내에서 표현될 수 있다는 것이 많은 연구에서 보고되고 있다^[3-8].

$$O = \sum_{i=1}^m \alpha_i u_i + \bar{O} \quad (3)$$

위 식에서 u_i 는 사용된 분광 반사율 모집단의 주성분 벡터이며, α_i 는 각 주성분 벡터에 대한 전개 계수이고 \bar{O} 은 분광 반사율 모집단의 평균 분광 반사율을 나타낸다. 따라서 식 (3)을 이용하여 다대역 카메라의 응답 특성을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1' \\ F_2' \\ \vdots \\ F_m' \end{bmatrix} \left([u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m] \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} + \bar{O} \right) \quad (4)$$

그러므로 각 주성분 벡터에 대한 전개 계수 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F_1' u_1 & F_1' u_2 & \dots & F_1' u_m \\ F_2' u_1 & F_2' u_2 & \dots & F_2' u_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_m' u_1 & F_m' u_2 & \dots & F_m' u_m \end{bmatrix}^{-1} \\ &\left(\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ \vdots \\ V_{m0} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서

$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ \vdots \\ V_{m0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1' \\ F_2' \\ \vdots \\ F_m' \end{bmatrix} \bar{O}. \quad (6)$$

일반적인 RGB 칼라 CCD카메라의 경우 3개의 센서 응답을 갖는다. 그러므로 위 식에서 광학 필터의 개수를 나타내는 m 은 3 이다. 따라서 고차원의 센서 응답을 갖는 다대역 카메라를 만들기 위해서는 부가적인 광학필터를 이용한 중복 촬영이 필요하며 이는 별도의 하드웨어 구성을 요구한다.

III. 제안된 유사 분광 반사율 모집단별로 구성된 주성분 집합을 이용한 분광 반사율 추정

1. 유사 분광 반사율 모집단별로 구성된 주성분 집합을 이용한 분광 반사율 추정

광원에 비해 물체의 분광 반사율 곡선은 변화가 급격하지 않으며 부드러운 곡선의 형태를 나타낸다. 따라서 Cohen^[3], Maloney^[4], Pakkicnen^[5] 등 다양한 연구자들에 의해 몇 개의 주성분의 조합으로 이루어지는 선형모델을 이용해 물체의 분광 반사율을 추정할 수 있다는 것이 보고되고 있다. 이때 주성분 혹은 기저함수는 현색(color appearance) 시스템^[12]의 각 색시료(color chips)에 대한 측정값으로 얻은 분광 데이터를 이용하여 구한다. 대표적인 현색 시스템으로는 Munsell 및 Natural Color System(NCS) 등이 있으며 다양한 색시료를 이용한 통계적인 분석 방법을 통해 일반적인 물체색의 분광반사율을 근사화 할 수 있다는 것이 연구자의 실험을 통해 증명되고 있다. 색시료에 대한 통계적 분석 방법으로는 주성분 분석 방법이 많이 사용된다^[11]. 이러한 주성분 분석 과정에서 추정 성능은 식 (3)과 같이 사용되는 주성분 벡터의 수에 의해 결정된다. 즉 주성분 벡터의 수가 많을수록 추정 오차는 줄어든다. 주성분 벡터의 수에 따른 실제 분광 반사율의 추정성 평가는 누적 기여율을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_m = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (7)$$

표 1. 1485개의 Munsell 색시료의 주성분의 수에 따른 누적 기여율

Table 1. Cumulative distribution ratio according to number of principal components for 1485 Munsell color chips.

주성분의 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
누적기여율[%]	76.11	92.96	98.70	99.35	99.72	99.84	99.91	99.94	99.97	99.98	99.99

위 식에서 n 은 이산함수인 분광 반사율을 구성하는 표본의 크기이며 m 은 주성분의 수를 타낸다. 본 연구에서는 주성분 벡터를 얻기 위해 Munsell 시스템을 분광광도계로 측정이용하여 380-780nm까지 1nm간격으로 1485개의 분광 반사율 측정값을 얻고 이로부터 각 분광 반사율 측정치에 대하여 400-700nm까지 10nm간격으로 표본을 생성하였다. 표 1은 실험에 사용된 색시료의 주성분의 수에 따른 전개계수 α 의 누적 기여율을 나타낸다. <표 1>에서 보는 바와 같이 3개의 주성분을 사용할 경우 누적 기여율은 98.70%이므로 이론적으로는 카메라 응답으로부터 실제 분광 반사율의 98.70% 범위까지 추정할 수 있다.

그러므로 보다 정밀한 분광 반사율 추정을 위해서는 기존의 RGB카메라 보다 더 많은 센서응답을 갖는, 다대역 카메라를 사용해야 한다. 그러나 다대역 영상 획득 시스템의 경우 추가적으로 색 필터를 부착해야 하며 중복 촬영을 하여야 하므로 기존의 RGB카메라 시스템으로 구현이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기존의 3대역 카메라를 사용하면서 계산된 주성분의 전개계수에 대한 누적 기여율을 높이기 위해, 각 입력색에 대하여 유사 분광반사율 모집단을 구성한 후 이 모집단을 이용하여 분광 반사율을 추정하였다. 제안된 추정 방법은 <그림 1>과 같다

식 (3)과 같이 카메라 출력신호인 RGB값으로부터 물체의 분광반사율을 추정하기 위해서는 RGB와 XYZ로 표현되는 카메라의 입출력 특성이 모델링되었다는 가정 아래에서 분광반사율의 평균과, 주성분 벡터, 그리고 각 주성분에 대한 전개 계수가 필요하다. 이때 기존의 주성분 분석의 경우 Munsell모집단이 모든 색의 분광 반사율을 포함한다고 가정하고 이 모집단에 대하여 공통적인 주성분 벡터를 주성분 분석 방법을 이용해 찾아 이용한다. 그러나 제안된 방법에서는 <그림 1>과 같이 주성분 벡터를 구하기 위해 전체 Munsell 분광반사율 모집단을 이용하는 것이 아니라 1485개의 Munsell 모집단으로부터 색상 영역별로 세분화된 모집단의 집합을 얻고 각 모집단에 대해 별도의 주성분 벡

터를 구하였다. 따라서 RGB로 표현되는 임의의 색이 분광반사율 모집단 집합의 어떤 원소에 포함되는지 알기 위해 <그림 1>의 우측 상단 점진 상자와 같이 색차 비교를 통해 입력색이 포함되는 분광 반사율의 세부 모집단을 찾고 다시 그 영역에 포함되는 분광반사율 전체로 구성된 세부 모집단 분광반사율 데이터를 이용해 주성분 벡터를 구한 다음 식 (3)을 이용해 분광반사율을 추정한다.

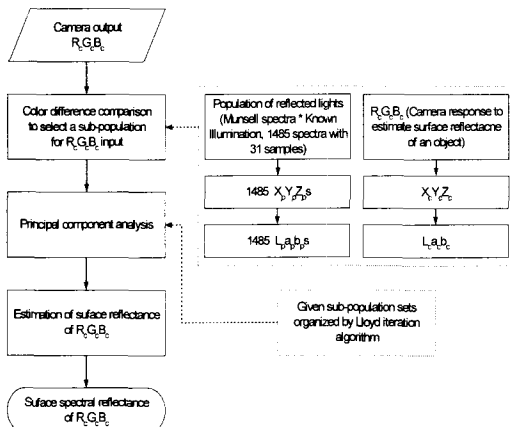


그림 1. 제안한 유사 분광반사율 모집단별로 구성된 주성분 집합을 이용한 분광반사율 추정의 흐름도

Fig. 1. Flowchart of proposed surface spectral estimation using set of principal components separately organized for each population of spectral reflectance.

2. 유사 분광 반사율 모집단 구성을 위한 Lloyd 알고리즘

<그림 1>에서 제안된 방법은 색상별로 유사한 모집단에 대해 각각 주성분 벡터를 구하여 적용한다는 측면에서 본 저자의 기존 연구^[10]와 동일한 흐름을 보인다. 그러나 기존 방법의 경우 Munsell로 표현되는 색의 전체 분광 반사율 모집단을 세부 모집단으로 나누는 과정에서 Macbeth ColorChecker를 중심색으로 이용하였다. 즉 Macbeth ColorChecker의 24개 색시료를 중심으로 색차 문턱치를 이용하여 가장 유사한 n개의 Munsell 색시료를 찾은 후 할당된 분광반사율을 기준으로 세부 모집단을 구성하였으며 전체 24개의 유사색 모집단을 구성하였다. 그러나 Macbeth ColorChecker의 각 색시료가 CIELAB공간에서 비교적 균등하게 분포함에도 불구하고 Munsell의 전체 분광반사율을 대표하는

중심색은 아니다. 따라서 이렇게 만든 유사색 모집단 집합으로부터 얻은 각 모집단의 주성분 벡터가 Munsell모집단의 전 영역을 효과적으로 추정하기 위한 최적의 주성분 벡터라고 할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 Munsell 모집단의 분광반사율을 형태에 따라 균등하게 분할하고 분할된 각 영역에 대해 주성분 벡터를 구함으로써 모집단 구성을 최적화 하였고 각 모집단에 대해 별도의 주성분 벡터를 구성함으로써 모집단에 따른 추정오차의 분산을 줄였다. Munsell모집단을 균등하게 분할하기 위하여 Lloyd 양자화기 설계 알고리즘을 적용하였다.

Lloyd 알고리즘은 반복 최적화 알고리즘의 대표적인 것으로서 K 평균 집합화(K-means clustering) 방법을 기반으로 한다. 이 방법은 m 차원의 벡터 공간에서 N 개의 입력 데이터 벡터들, 즉 $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N$ 중 무작위로 K개의 초기 양자화 벡터들을 선택하고, 왜곡 척도인 TSE(Total Squared Error)를 최소가 되도록 양자화 벡터들을 반복적으로 개선 시켜주는 알고리즘이다. 본 연구에서는 양자화 벡터와 입력 데이터 벡터간의 오차, E를 다음과 같이 정의 하였다.

$$E = \sum_{\lambda=400}^{700} |c_i(\lambda) - p_k(\lambda)| \tag{8}$$

식 (8)에서 $c_i(\lambda)$ 는 양자화 벡터 즉 시작 단계의 경우 Macbeth ColorChecker중 하나의 분광반사율이며 각 반복 단계에서는 새로운 대표 분광 반사율을 의미한다. 그리고 $p_k(\lambda)$ 는 Munsell 1485개의 색시료 중 하나의 분광반사율을 의미한다. 각 분광반사율 데이터는 400nm에서 700nm까지 10nm간격으로 표본화된 31 차원의 데이터이며 반사율을 의미하고 0과 1사이의 값을 갖는다. 각 분할 단계에서는 1485개의 Munsell 분광 반사율 각각을 식 (8)에 정의된 벡터간 오차를 가장 작게 갖는 대표 분광반사율로 사상한다. 본 논문에서는 24개의 초기 양자화 벡터를 사용했으므로 각 반복 단계마다 24개의 모집단으로 분할되며 각 모집단에 속하는 전체 분광반사율의 평균을 그 모집단에 대한 새로운 대표 분광반사율로 정의한다. 24개의 새로운 대표 분광반사율에 대한 결정이 모두 끝나면 다음과 같이 정의되는 전체 분광반사율의 오차, TE를 구한다.

$$TE = \sum_{n=1}^{1485} \sum_{\lambda=400}^{700} |c_r(\lambda) - p_n(\lambda)| \quad (9)$$

위 식에서 $c_r(\lambda)$ 은 임의의 $p_n(\lambda)$ 이 속하는 모집단의 대표 분광반사율을 의미한다. 이렇게 매 단계마다 TE 를 구하여 이 값의 수렴도를 평가하는 방법으로 Lloyd알고리즘을 반복 적용하였다. 본 논문에서 유사 분광반사율 모집단을 구하기 위한 과정은 <그림 2>와 같다.

유사 분광반사율 모집단의 구성을 마친 후 주성분 분석을 통해 각 모집단에 대해 3개씩의 주성분 벡터를 구성하고 이렇게 구한 주성분 벡터 집합을 이용해 그림 1과 같은 과정으로 3대역 카메라 출력 신호에 대한 물체 표면의 분광 반사율을 추정한다.

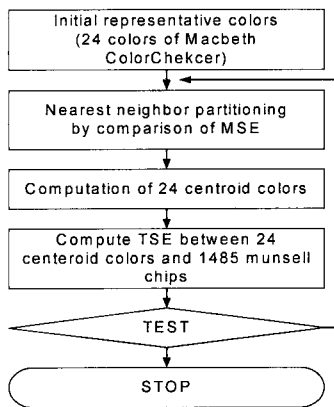


그림 2. 유사 분광반사율 모집단을 구성하기 위한 Lloyd알고리즘의 적용

Fig. 2. Application of Lloyd algorithm for building sub-populations of spectral reflectance.

IV. 실험 및 고찰

제안한 분광 반사율 추정방법의 성능을 평가하기 위하여 분광 반사율 추정 및 누적 기여율 비교 실험을 하였다. 분광 반사율 추정을 위해서는 Munsell 색시료 중 임의로 120개를 선택하여 추정 실험을 하였다. 비교한 추정 방법으로는 기존의 3대역 주성분 분석법, 5대역 위너 추정법, Macbeth ColorChecker의 색상 영역별 모집단을 이용한 유사색 3대역 주성분 분석법^[10]과 제안한 분광반사율을 기준으로 분할한 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법이 비교되었다.

기존의 3대역 주성분 분석을 위해서는 1485개의 Munsell 색시료를 모두 이용하여 주성분을 계산하였다. <그림 3>은 1485개 Munsell 색시료로 구한 3개 주성분의 분광 반사율을 나타낸다.

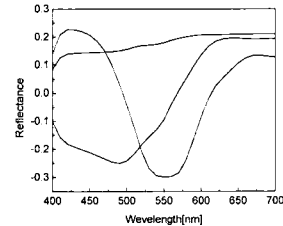


그림 3. 1485 Munsell 색시료에 대한 주성분 벡터
Fig. 3. Principal component vectors for 1485 Munsell color chips.

본 연구에서는 카메라의 분광 감도를 구하기 위하여 단색광 발생기를 이용하여 10nm간격으로 카메라에 조사한 다음 파장별 상대적인 분광 감도를 구하였다. <그림 4>는 CCD의 분광 감도, 적외선차단필터, 렌즈의 분광 투과율을 합한 Toshiba IK-C41MK CCD카메라의 총합적인 분광 감도를 나타낸다.

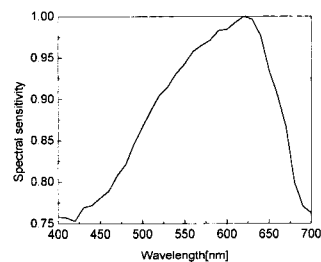


그림 4. 카메라의 분광 감도
Fig. 4. Spectral sensitivity of camera.

Macbeth ColorChecker의 색상 영역별 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법을 위해서는 Macbeth ColorChecker의 24개 색 시료에 대한 CIELAB 측정값을 기준으로 색차를 이용해 색상 영역별 모집단을 구성하였다. <그림 5>는 색차 문턱치를 달리하며 색상 영역별 모집단을 구성하고 이 모집단의 주성분을 이용해 Munsell모집단에서 임의로 선택된 색시료의 분광 반사율 추정했을 때 측정된 분광 반사율과 추정된 분광 반사율 사이의 평균 추정오차를 나타낸다.

<그림 5>에서 보는 바와 같이 기존의 Macbeth ColorChecker의 색상 영역별 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법의 경우 분광 반사율의 평균 추정오차는

색상 영역별 모집단을 구성할 때 정의되는 색차 문턱치의 크기에 따라 가변적이며 유사색으로 포함되는 범위를 결정하는 색차 문턱치를 작게 할 경우 색상에 따라서 각 모집단에 포함되는 유사색 시료의 수가 너무 작아 이러한 모집단으로부터 구한 주성분 벡터는 실제의 분광 반사율을 잘 추정하지 못한다. 또한 색상 영역별 모집단의 시료의 수가 일정한 범위를 넘을 경우, 전체 모집단에 대하여 3개의 주성분을 이용해 구한 경우와 평균 추정오차가 근접해짐을 알 수 있다. <그림 5>에서 보는 바와 같이 색차를 달리하며 평균 추정오차를 구한 결과, 색차 문턱치 20을 이용해 색상 영역별 모집단을 구성했을 때 가장 적은 추정오차를 나타냈다. 따라서 실험에서는 색차 문턱치 20을 기준으로 Munsell 모집단을 분할하고 각 모집단에 대해 3개씩의 주성분 벡터를 구하여 제안한 방법과 비교하였다.

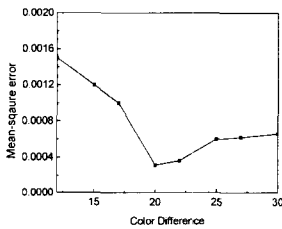


그림 5. 색차 문턱치에 따른 평균 분광 반사율 추정오차
Fig. 5. Estimation error of spectral reflectance according to color difference threshold.

마지막으로 제안한 추정 방법을 위해서는 전술한 바와 같이 Lloyd 양자화기 설계 알고리즘을 이용하여 1485 Munsell 칼라 칩을 영역별로 분할하였다.

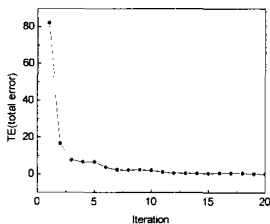


그림 6. Lloyd 알고리즘을 적용할 때 반복 횟수에 따른 전체 오차의 변화
Fig. 6. Variation of total error in Lloyd iteration.

<그림 6>은 Lloyd 반복 알고리즘을 적용할 때 대표 분광반사율 갱신과정에서 대표 분광반사율과 1485개 전체 분광반사율간의 오차 합의 변화 추이를 보여준다.

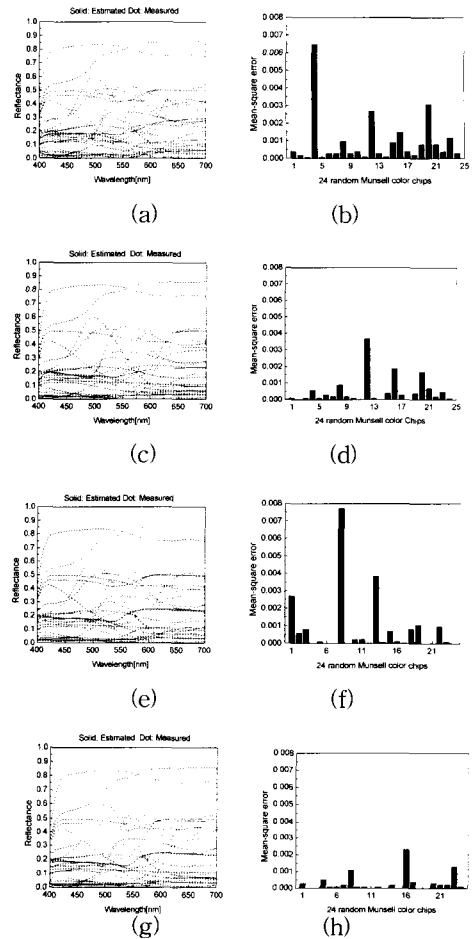


그림 7. 측색된 분광반사율과 추정된 분광반사율 및 두 분광반사율간의 MSE 비교 (a)3대역 주성분 분석 (b) 3대역 주성분 분석법에 의한 분광반사율 추정오차 (c)5대역 위너 추정법 (d)5대역 위너 추정법에 의한 분광반사율 추정오차 (e)색상영역별 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법 (f)색상 영역별 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법의 분광반사율 추정 오차 (g)제안한 3대역 주성분 분석법 (h)제안한 3대역 주성분 분석법의 분광반사율 추정 오차

Fig. 7. Comparison of spectral reflectance and MSE between measured SRs and estimated SRs (a)3-band PCA, (b)Estimation error by 3-band PCA, (c)5-band Wiener method, (d)Estimation error by 5-band Wiener method, (e)3-band PCA using set of similar color populations, (f)Estimation error by 3-band PCA using set of similar color populations, (g) Proposed 3-band PCA, and (h)Estimation error by proposed 3-band PCA.

대략적으로 대표 분광 반사율을 11번 갱신한 이후에는 전체 오차의 감소가 매우 적음을 할 수 있다. 본 실험에서는 20번 반복 후 결정된 대표 분광 반사율을 중심으로 전체 Munsell분광 반사율을 분할하여 영역별 모집단을 구성하였다. <그림 7>은 앞에서 언급한 4가지 분광반사율 추정법을 이용해 120개의 Munsell 색시료에 대하여 분광 반사율 추정 실험을 한 결과이다.

<그림 7>에서는 결과 출력을 위해 120개중 24개를 일정한 간격으로 선택하여 표시하였다. <그림 7(h)>에서 보는 바와 같이 제안한 3대역 추정방법이 가장 적은 추정오차를 보인다. <그림 7(f)>의 경우 1485개의 전체 Munsell 색시료 전체에 대하여 하나의 주성분 집합을 만들고 이를 이용해 전체 색의 분광반사율을 추정하는 <그림 7(b)>에 비해서는 우수한 성능을 보이지만, 전술한 바와 같이 전체 색역에 대하여 균등하게 분포한다고 할 수 없는 Macbeth ColorChecker를 이용해 유사색 모집단을 만들고 또한 모집단을 만드는 과정에서 색차 문턱치를 이용하므로 각 모집단에 포함되는 색시료의 수가 각기 다르다. 따라서 이러한 모집단에 대해 주성분을 구하고 이를 분광반사율 추정에 이용할 경우 <그림 7(f)>에서 보는 바와 같이 색에 따라 추정 오차의 분산이 비교적 크다는 것을 알 수 있다. <표 2>는 색상에 따라 순서 지워진 1485개의 전체 Munsell 색시료 중에서 등간격으로 임의의 120개를 선택하고 4가지 방법으로 원래의 분광반사율을 추정한 다음, 측정치와 예측치간의 평균 및 최대 분광반사율 추정오차를 구한 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 제안된 방법으로 분광 반사율 추정할 경우 기존의 3가지 방법에 비해 평균 및 최대 추정오차가 줄어들음을 확인할 수 있다. 특히 동일한 3대역 주성분을 사용하고 적응적인 주성분 벡터를 이용해 추정하는 3대역 유사색 주성분 분석법에 비해서도 우수한 성능을 보이는 것은 제안한

방법이 1485개의 전체 Munsell모집단에 대하여 최적화된 분광분포 모집단을 만들고 이로부터 주성분을 구성하여 각 입력색에 대해 적응적으로 분광반사율을 추정하기 때문이다. 추정오차 비교와 더불어 누적 기여율에 대한 비교 실험도 수행하였다. 누적 기여율은 식 7로 정의되며 이 값이 100%라는 것은 이론적으로 주성분의 선형 조합으로 모집단의 분광반사율을 완전히 추정할 수 있다는 것을 의미한다.

기존의 3대역인 경우에는 한번의 계산으로 누적기여율이 결정되나 기존의 유사색 3대역 주성분 분석법이나 제안된 추정방법의 경우 다수개의 모집단이 존재하므로 각 모집단에서 구한 주성분 전개 개수의 평균을 구하여 누적 기여율을 비교하였다. 표 3 및 그림 8의 결과에서 알 수 있듯이 제안된 방법은 누적기여율 측면에서도 기존의 3대역 및 유사색 3대역 방법에 비해 개선됨을 확인하였다.

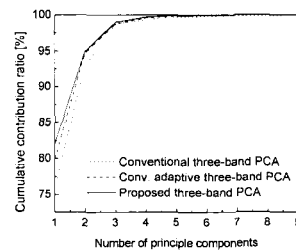


그림 8. 분광반사율 추정방법에 따른 누적기여율 비교
Fig. 8. Comparison of cumulative distribution ratio according to estimation method of spectral reflectance.

V. 결 론

본 논문에서는 분광반사율 추정에 관한 연구로써 색상에 따른 적응적인 주성분 벡터를 이용하여 분광반사율 추정 오차를 줄이는 방법을 제안하였다. 즉 분광반

표 2. 1485개의 Munsell 색시료 중 등간격으로 선택된 120개의 시료에 대한 분광반사율 추정 실험 결과
Table 2. Experiment result of spectral reflectance estimation for 120 selected colors from 1485 Munsell color chips.

추정 내용 \ 추정 방법	3대역 주성분 분석법	5대역 위너 추정법	3대역 유사색 주성분 분석법	제안한 3대역 주성분 분석법
평균 분광반사율 추정오차 계산	0.00093	0.00052	0.00085	0.00032
최대 분광반사율 추정오차 계산	0.0065	0.0037	0.0077	0.0023

표 3. 추정방법에 따른 누적 기여율의 비교

Table 3. Comparison of cumulative distribution ratio according to estimation methods.

추정방법 \ 주성분의 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Conventional three-band PCA	76.112	92.963	98.701	99.353	99.721	99.843	99.912	99.943	99.972
Conv. adaptive three-band PCA	79.937	94.797	98.772	99.625	99.883	99.959	99.985	99.994	99.997
Proposed three-band PCA	82.023	94.991	99.005	99.742	99.921	99.969	99.987	99.994	99.997

사율 추정시 모집단으로 많이 사용되는 Munsell 색시료를 분광반사율을 기준으로 영역별로 분류하고 각 모집단에 대해 주성분을 구성함으로써 입력색의 분광반사율 형태에 따른 적응적인 추정이 가능하도록 하였다. 이때 Munsell 분광반사율 모집단을 분할하기 위해서 Lloyd양자화기 설계 알고리즘을 적용하였다. 제안된 분광 반사율 추정 방법의 유용성을 평가하기 위하여 제안된 방법과 3대역 주성분 분석방법, 5대역 위너 추정 방법, 기존의 유사색 3대역 주성분 분석법을 비교하였으며 방법으로는 Munsell모집단의 120개 분광 반사율 시료에 대한 추정 실험을 하였다.

결과, 제안한 방법은 분광 반사율 추정오차가 기존의 3가지 방법보다 적었으며 주성분 분석법 적용시 실제 분광반사율의 복원성을 결정하는 누적 기여율 값에서도 개선됨을 확인하였다. 특히 기존의 유사색 모집단을 이용한 주성분 분석의 경우, 색상 영역별 모집단을 결정하는 과정에서 각 모집단의 크기가 일정하지 않음으로써 특정 색에서 추정 오차가 크게 증가하는 문제점이 있었다. 그러나 제안된 방법의 경우 전체 Munsell 모집단을 분광반사율의 형태를 기준으로 균등하게 분할하여 주성분을 구함으로써 색에 따른 추정오차의 변화를 줄일 수 있었다. 따라서 제안된 연구를 분광반사율 추정에 적용할 경우 3대역 카메라의 입출력 특성에 대한 정확한 모델링과 주변광원의 분광분포를 알고 있다는 전제하에서 물체의 분광반사율 추정오차를 개선할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Y. Miyake and Y. Yokoyama, "Obtaining and reproduction of accurate color images based on human perception," *Proc SPIE 3300*, pp. 190-197, 1998.
- [3] J. Cohen, "Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips," *Psychon Sci.*, 1, pp. 369-370, 1964.
- [4] L. T. Maloney, "Evaluation of linear models numbers of parameters," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 3, No. 10, pp. 1673-1683, Oct. 1986.
- [5] T. Jaaskelainen, J. Parkkinen, and S. Toyooka, "Vector subspace model for color representation," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 7, No. 4, pp. 725-730, Apr. 1990.
- [6] M. J. Vrhel and H. J. Trussell, "Color Correction using Principal Components," *Color Res. Appl.*, Vol. 17, No. 5, pp. 328-338, Oct. 1992.
- [7] S. Usui, S. Nakauchi, and M. Nakano, "Reconstruction of Munsell color space by a five-layer neural network," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 9, No. 4, pp. 516-520, Apr. 1992.
- [8] Reiner Lenz and Mats Osterberg, "Unsupervised filtering of color spectra," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 13, No. 7, pp. 1315-1324, July 1996.
- [9] 이철희, 서봉우, 안석출, "유사색 모집단을 이용한 물체의 분광 반사율 추정," *한국멀티미디어학회 논문지*, 제4권 제1호, pp. 37-45, Feb. 2002
- [10] S.P. Lloyd, "Least squares quantization in PCM," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, Vol. IT-18, pp. 127-135, Mar. 1982.

- [11] M. J. Vrhel, R. Garshon, and L. S. Iwan, "Measurement and analysis of object reflectance spectra," *Res. Appl.*, Vol. 19, No. 4, Aug. 1994.
- [12] M. D. Fairchild, *Color appearance model*, Massachusetts, Addison Wesley Longman, Inc., pp. 113~123, 1997.

저 자 소 개



權 五 雪(正會員)

2002年 경북대학교 전자전기공학부
(공학사). 2002년-현재 경북대학원
전자공학과 석사과정 재학중. <주관
심분야 : 광원 추정, 색 재현, 현색
시스템 등임>

李 昊 根(正會員) 第38卷 SP編 第4號 參照

李 敞 熙(正會員) 第38卷 SP編 第6號 參照

河 永 浩(正會員) 第38卷 SP編 第3號 參照