

물체의 색자극 인식을 위한 분광 반사율 추정 방법

이철희* · 이응주** · 하영호***

개 요

영상 인식 및 해석의 과정은 크게 세 가지의 기본 영역으로 나누어진다. 즉 영상 획득과 전처리의 저 단계 처리과정, 그리고 분할과 표현 및 서술로 이루어지는 중간 단계 처리과정, 그리고 인식과 해석을 통해 영상 인식의 결과를 출력하는 고 단계 처리과정으로 나눌 수 있다. 이러한 영상 인식 및 해석의 단계에서 영상 획득의 과정은 전체 처리 과정의 시작 부분으로써 인식 성능에 매우 중요한 영향을 미치는 부분이다. 따라서 본 기고에서는 피사체가 가지고 있는 색정보를 피사체의 분광 반사율에 기초하여 획득하는 방법을 제시함으로써 영상의 인식 및 해석 분야에서, 피사체의 색자극의 획득 및 처리에 관한 새로운 연구 방향을 소개하고자 한다.

1. 서 론

물체의 분광반사율은 물체의 색자극을 표시하는 중요한 기술자이다. 즉 피사체의 고유한 색자극은 그 물체가 갖는 분광반사율로 정의되며 가시

광선 영역에서의 상대적인 반사율로 표시된다. 특히 물체의 분광반사율의 경우 그 곡선의 연속성으로 인하여 가시광선 파장영역에서 5nm 혹은 10nm의 파장 간격으로 많이 정의되며, 칼라영상처리 분야에서는 400nm~700nm 파장 영역의 반사율 곡선이 중요한 의미를 갖는다. 따라서 물체의 고유한 색자극을 정의하는 일은 가시광선 파장영역에서 일정한 간격으로 특정 물체가 갖는 상대적인 분광반사율의 크기를 표시하는 것이라 할 수 있다.

가시광선의 파장 영역에서 상대적인 분광반사율을 찾는 가장 손쉬운 방법은 특정한 대역의 빛만을 통과시키는 대역통과필터를 카메라 앞에 부착하고 각 대역을 통과하는 빛의 양을 기록하여 표시하는 방법이다. 즉 400nm~700nm영역의 빛을 10nm간격으로 분할할 경우 각 대역을 담당하는 31개의 대역통과필터를 카메라의 앞에 부착하고 카메라 출력의 세기를 기록하면, 해당하는 물체의 분광반사율을 추정할 수 있다. 이렇게 다수개의 색필터를 부착한 다음, 흑백 카메라를 이용하여 피사체를 촬영한 뒤 물체의 고유한 분광반사율을 추정하는 시스템을 멀티스펙트럴 칼라이미징 시스템이라고 한다. 그러나 실제의 경우 정확히 특정한 파장 대역의 빛만을 통과시키는 대역통과필터는 없다. 또한 전체 대역에 대한 필터의 투과 특성을 얻지 않더라도 주성분 분석과 같은 방

본 연구는 과학기술부 NRL사업(M10203000102-02J0000-04810) 지원에 의해서 수행되었습니다.

*경운대학교 컴퓨터공학부
**동명정보대학교 정보통신공학과
***경북대학교 전자전기컴퓨터학부

법을 이용할 경우 인간 시각이 구별해 낼 수 있는 오차 범위내로 물체의 분광 반사율 추정이 가능하다. 뿐만 아니라 기존의 RGB카메라와 같이 3대역 필터를 가지고도 적응적인 주성분 벡터를 이용할 경우, 5대역 멀티스펙트럴 카메라와 동일하거나 다소 우수한 분광반사율 추정이 가능하다고 보고되고 있다. 따라서 본 기고에서는 앞서 간단히 소개한 멀티 스펙트럴 칼라 이미징 분야에서 최근 논의되고 있는 다양한 추정 방법을 소개하며, 각 방법에 따른 시스템의 구성 방법과 추정 성능을 평가함으로써 영상 인식의 초기 과정에서 피사체의 고유한 색정보를 얻고자 하는 분야의 연구자에게 응용의 예를 제시하려 한다.

2. 주성분 분석에 의한 분광 반사율 추정 방법

다대역 카메라를 이용하여 물체의 분광 반사율을 추정할 경우 카메라의 센서응답 V_i 는 주변 광원의 분광분포 $E(\lambda)$, 물체 고유의 분광 반사율 $O(\lambda)$, 카메라의 분광 감도 $S(\lambda)$, m 개의 광학 필터의 분광 투과율 $f_i(\lambda)$ 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

$$\begin{aligned} V_i &= f_i ESO \\ &= F_i O \quad (i=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (2)$$

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].

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

위 식에서 u_i 는 사용된 분광 반사율 모집단의 주성분 벡터이며, a_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

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^t \\ F_2^t \\ \vdots \\ F_m^t \end{bmatrix} \left[[u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} + \bar{O} \right] \quad (4)$$

과 같다. 그러므로 각 주성분 벡터에 대한 전개 계수 a_1, a_2, \dots, a_m 는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F_1^t u_1 & F_1^t u_2 & \dots & F_1^t u_m \\ F_2^t u_1 & F_2^t u_2 & \dots & F_2^t u_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_m^t u_1 & F_m^t u_2 & \dots & F_m^t u_m \end{bmatrix}^{-1} \\ &\left(\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{1\bar{O}} \\ V_{2\bar{O}} \\ \vdots \\ V_{m\bar{O}} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서

$$\begin{bmatrix} V_{1\bar{O}} \\ V_{2\bar{O}} \\ \vdots \\ V_{m\bar{O}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^t \\ F_2^t \\ \vdots \\ F_m^t \end{bmatrix} \bar{O} \quad (6)$$

그러므로 위 식에서 보는 바와 같이 m 개의 광학 필터를 이용할 경우 동일한 개수의 카메라 응답을 얻을 수 있으며 광학필터의 개수의 증가에 따라 식(3)에서 표현되는 영상의 분광반사율은 더욱 정밀해 진다.

3. 위너 추정에 의한 분광 반사율 추정 방법

다대역 카메라의 출력으로부터 물체의 고유한 분광 반사율을 구하는 또 다른 방법으로 위너추정법을 이용한 계산법이 널리 사용되고 있다.^[1,2] 식 (2)에서 m 개의 센서 응답 V_i 로부터 n 차원의 물체의 분광 반사율 O 를 얻기 위해서는 아래 식과 같이

$$O = F^{-1}V \quad (7)$$

벡터 F의 역행렬을 이용하여 간단히 구할 수 있다. 이때 벡터 F는 다음 식과 같다.

$$F = fES \quad (8)$$

그러나 일반적으로 다대역 카메라의 센서 응답의 수는 물체의 분광 분포에 비해 차원이 낮으므로 다음 식과 같은 추정 행렬 G가 필요하다.

$$\hat{O} = GV \quad (9)$$

따라서 물체의 분광 반사율 O와 추정된 피사체의 분광 반사율 \hat{O} 사이의 평균 자승 오차를 최소화하기 위한 추정 행렬 G는 아래 식과 같이 실측한 분광 반사율과 추정된 분광 반사율 사이의 MSE(mean square error)를 최소화하는 행렬로 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \text{Trace}(\langle(O - GV)(O - GV)\rangle) \\ &= \text{Trace}(R_{oo} - R_{ov} G' - GR_{ov}' + GR_{vv} G') \\ &= \text{Trace}(R_{oo} - 2R_{ov} G' + GR_{vv} G') \end{aligned} \quad (10)$$

위 식에서 R_{oo} , R_{ov} , R_{vv} 는 상관행렬로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{oo} = \langle OO' \rangle, R_{ov} = \langle OV' \rangle, R_{vv} = \langle VV' \rangle \quad (11)$$

식 (10)에서 행렬 G와 R_{ov} 는 모두 $n \times m$ 차원 행렬이다. 각 행렬을 행벡터로 분해하면 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} g_1' \\ g_2' \\ \vdots \\ g_n' \end{bmatrix}, R_{ov} = \begin{bmatrix} r_1' \\ r_2' \\ \vdots \\ r_n' \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} n \times m \text{행렬의 } n \text{행 } n \text{열의 요소는} \\ [R_{ov} G']_{nm} = r_n' g_n, [GR_{vv} G']_{nm} = g_n' R_{vv} g_n \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 MSE는 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \sum_{n=1}^N S_n, \\ S_n &= [R_{oo}]_{nn} - 2[R_{ov} G']_{nm} + [GR_{vv} G']_{nm} \\ &= [R_{oo}]_{nn} - 2r_n' g_n + g_n' R_{vv} g_n \end{aligned} \quad (14)$$

S_n 은 행렬 G의 제 n행의 요소만을 포함하기 때문에, 각 행에 대하여 S_n 을 최소화하는 g_n 을 선택할 경우 MSE가 최소가 된다. 그러므로 S_n 이 최소화되기 위해서는 g_n 이 다음 식과 같아야 하며

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

따라서 추정 행렬 G는 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$G = R_{ov} R_{vv}^{-1} \quad (16)$$

또한 다대역 카메라에서 카메라의 센서 응답 V에 노이즈 성분 벡터 N이 포함되어진 경우 식 (17)과 같이 표현한다.

$$V = FO + N \quad (17)$$

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

$$R_{ov} = R_{oo} F' + R_{vn} \quad (18)$$

$$R_{vv} = FR_{oo} F' + FR_{on} + R_{on}' F' + R_{nn} \quad (19)$$

따라서 벡터 V로부터 추정되는 물체의 분광 반사율 \hat{O} 를 구하기 위한 추정행렬 G는

$$G = R_{oo} F' (FR_{oo} F' + R_{nn})^{-1} \quad (20)$$

과 같다. 여기서 R_{oo} 는 벡터 O의 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.

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

이때 σ_i^2 , ($i=1, 2, \dots, m$)는 각 대역에서 노

이즈의 분산을 나타낸다.

4. 유사색 모집단을 이용한 분광 반사를 추정 방법[9]

2장에서 소개된 주성분 분석에 기초한 분광반사율 추정방법에서는 사용되는 카메라 대역의 수를 확장함으로써 더욱 정확한 분광반사율 추정이 가능하다. 그러나 최근에는 카메라의 대역은 고정된 상태에서 주성분 벡터를 적용적으로 사용함으로써 분광반사율 추정 성능을 향상시키기 위한 연구들이 보고 되고 있다[9,13].

주성분 분석 과정에서 추정 성능은 식 (3)과 같이 사용되는 주성분 벡터의 수에 의해 결정된다. 즉 주성분 벡터의 수가 많을 수록 추정 오차는 줄어든다. 주성분 벡터의 수에 따른 실제 분광 반사율의 추정성 평가는 누적 기여율을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_m = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (22)$$

위 식에서 n 은 이산함수인 분광 반사율을 구성하는 표본의 크기이며 m 은 주성분의 수를 타낸다. 일반적으로 주성분 혹은 기저함수는 색현시 시스템의 각 칼라칩에 대한 측정값으로 얻은 분광 데이터를 이용하여 구한다. 대표적인 색현시 시스템으로는 먼셀 및 Natural color system(NCS)등이 있다[12]. 표 1은 먼셀 시스템의 칼라칩에 대한 측정된 분광데이터로부터 주성분을 구했을 때 주성분의 수에 따른 전개계수 α 의 누적 기여율을 나타낸다.

표 1에서 보는 바와 같이 3개의 주성분을 사용할 경우 누적 기여율은 98.70%이므로 이론적으로는 카메라 응답으로부터 실제 분광 반사율(먼셀 시스템의 각 칼라칩)의 98.70% 범위까지 추정할 수 있다. 그러므로 보다 정밀한 분광 반사율 추정을 위해서는 기존의 RGB카메라보다 더 많은 센서응답을 갖는 다대역 카메라를 사용하여야 한다.

따라서 기존의 3대역 카메라를 사용하면서 계산된 주성분의 전개계수에 대한 누적 기여율을 높이기 위해, 각 입력색에 대하여 유사색 모집단을 구성한 후 이 모집단을 이용하여 분광 반사율을 추정하는 방법이 보고 된 바 있다[9].

즉 유사색 모집단을 이용한 분광반사율 추정방법[9]에서는 전체 먼셀 분광반사율 모집단에 대하여 하나의 주성분 집합을 구하는 것이 아니라 1485개의 먼셀 모집단으로부터 유사색 모집단을 얻고 이 모집단에 대해 각각 주성분 집합을 구하였다. 이때 유사색 모집단은 1485개를 갖는 먼셀 분광 반사율 모집단의 부분 집합으로써 분광 반사율을 구하고자 하는 물체의 카메라 응답, 즉 RGB 출력과 유사한 색을 포함하는 분광 반사율 집합을 나타낸다.

이러한 유사색 모집단을 구성하기 위하여 1485개의 먼셀 칼라칩의 분광 분포와 3대역 영상획득 시스템에 사용되는 광원의 분광 분포를 이용하여 그림 1과 같이 반사광 모집단을 구성한다. 다음 이 반사광 분광 분포로부터 삼자극치 값을 얻고 다시 CIELAB값으로 변환하여 반사광 모집단의 크기와 동일한 CIELAB값을 얻는다. 다음 카메라 출력 $R_cG_cB_c$ 에 대하여 식 (23)을 이용한 선형변환을 통해 삼자극치로 변환한 후 색차 비교를 통

표 1. 1485개의 먼셀 색시료의 주성분의 수에 따른 누적 기여율

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

해 가장 작은 색차를 나타내는 분광 분포를 먼셀 분광 반사율 모집단으로부터 찾는다.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.588 & 0.179 & 0.183 \\ 0.290 & 0.606 & 0.105 \\ 0.000 & 0.068 & 1.021 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

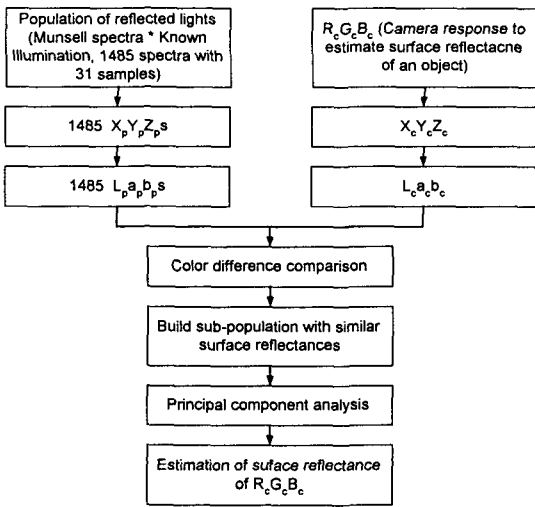


그림 1. 유사색 모집단을 이용한 분광 반사율 추정방법의 흐름도

그림 2는 Macbeth ColorChecker의 15번 색표본에 대한 실제 측정된 분광 반사율과 유사색으로 찾은 먼셀 모집단의 분광 반사율을 나타낸다.

유사색으로 찾아진 분광 반사율 모집단의 반사

율로부터 해당하는 분광 반사율을 추출하여 유사색 모집단을 구성한 후 이 모집단에 대하여 주성분 분석을 통해 3개의 주성분을 얻는다. 그림 2 (c)는 유사색 모집단에 대한 주성분 분석법을 통해 얻은 주성분 함수를 나타낸다. 따라서 물체의 분광 반사율은 식 (5)와 같이 카메라 응답의 삼자극치 $X_c Y_c Z_c$ 를 이용하여 3개 주성분 함수에 대한 전개 계수를 구하여 추정할 수 있다.

5. 유사 분광반사율 모집단별로 구성된 주성분 집합을 이용한 개선된 분광반사율 추정 방법

각 유사색 모집단에 대해 별도로 주성분 벡터를 구함으로써 3대역 카메라를 이용한 분광반사율 추정과정에서 각 색의 분광반사율 추정오차를 줄이는 방법이 앞장에서 설명되었다. 그러나 앞서 제안된 방법의 경우 전체 색을 영역별로 나누는 과정에서 Macbeth ColorChecker를 이용함으로써 유사색 모집단으로 나누어진 각 영역의 크기가 일정하지 않은 단점이 있다. 다시 말해서 모집단을 나누는 과정에서 색차를 이용하여 중심색을 Macbeth ColorChecker의 각 색표본으로 정의하였기 때문에 전체 먼셀 시스템이 갖는 색역의 범

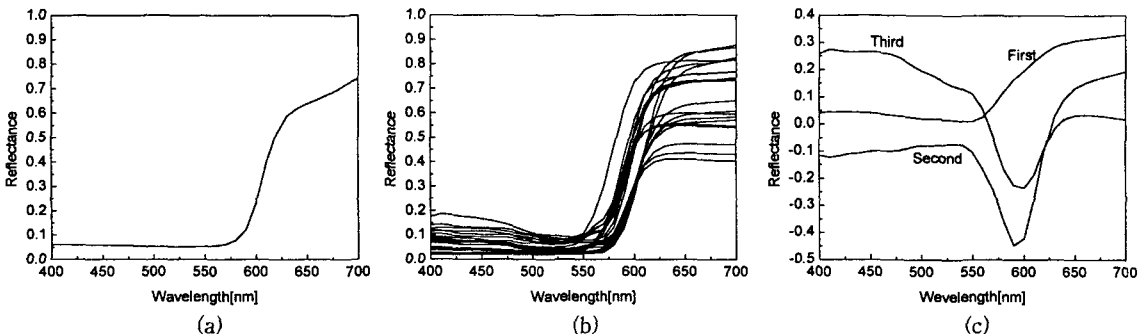


그림 2. 측정된 분광 반사율 및 유사색 분광 반사율 모집단과 모집단으로부터 얻은 주성분 함수
(a) Macbeth ColorChecker 15번 칼라칩의 측정된 분광반사율 (b) 동일 칼라칩의 유사색 분광 반사율 모집단 (c) 유사색 모집단의 주성분 함수

위에 대한 균일한 분할이 이루어지지 않았다. 따라서 각 모집단 별로 추정 오차가 차이가 나게 된다. 따라서 전체 먼셀시스템이 갖는 색역을 분광반사율을 기준으로 균일하게 분할하기 위한 방법이 연구되었다[13]. 참고 문헌 [13]에서 저자는 색상 영역별 모집단들을 구하는 과정에서 Lloyd 양자화가 설계 알고리즘[10]을 적용함으로써 분광 반사율의 모양에 따라 먼셀시스템의 전체 모집단을 분할하고 각 모집단에 새로운 대표 분광반사율을 찾는 다음 이러한 과정을 반복하여 모집단의 분할을 분광반사율에 따라 최적화하여 영역별 고른 추정오차를 갖게 함으로써 색상 영역별 모집단의 누적기여도를 개선하는 방법을 제안하였다. 제안된 추정 방법은 그림 3과 같다

카메라 출력신호인 RGB값으로부터 물체의 분광반사율을 추정하기 위해서는 RGB와 XYZ로 표현되는 카메라의 입출력 특성이 모델링되었다는 가정아래에서 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. 그러

나 제안된 방법에서 저자는 그림 3과 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 벡터를 구하였다. 따라서 RGB로 표현되는 임의의 색이 분광반사율 모집단 집합의 어떤 원소에 포함되는지 알기 위해 그림 3의 우측 상단 점선 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. 즉 색상영역별로 적용적인 주성분을 찾는 과정은 4장의 방법과 동일하다. 그러나 유사 분광 반사율 모집단을 구성하는 방법을 최적화함으로써 저자는 분광반사율의 모양에 따라 먼셀 시스템의 색역을 균일하게 분할하였다.

■ 유사 분광 반사율 모집단 구성을 위한 Lloyd 알고리즘

그림 3에서 제안된 방법은 색상별로 유사한 모집단에 대해 각각 주성분 벡터를 구하여 적용한다는 측면에서 4장에서 논의된 연구와 동일한 흐름을 보인다. 그러나 기존의 방법의 경우 Munsell로 표현되는 색의 전체 분광 반사율 모집단을 세부 모집단으로 나누는 과정에서 Macbeth Color-Checker를 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 Color-Checker의 각 색시료가 CIELAB공간에서 비교적 균등하게 분포함에도 불구하고 Munsell의 전

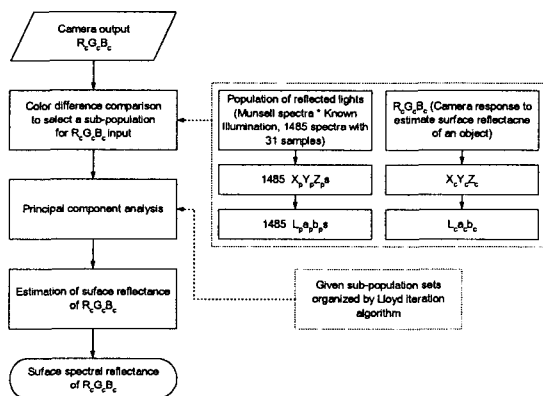


그림 3. 유사 분광반사율 모집단별로 구성된 주성분 집합을 이용한 분광반사율 추정의 흐름도

체 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 개선된 연구[13]에서는 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 N개의 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.

$$E = \sum_{\lambda=400}^{700} |c_i(\lambda) - p_k(\lambda)| \quad (24)$$

식(24)에서 $c_i(\lambda)$ 는 양자화 벡터 즉 시작 단계의 경우 Macbeth ColorChecker중 하나의 분광 반사율이며 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 31차원의 데이터이며 반사율을 의미하고 0과 1사이의 값을 갖는다. 각 분할 단계에서는 1485개의 Munsell 분광반사율

각각을 식(24)에 정의된 벡터간 오차를 가장 작게 갖는 대표 분광반사율로 사상한다. 제안된 연구에서는 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.

$$TE = \sum_{n=1}^{1485} \sum_{\lambda=400}^{700} |c_r(\lambda) - p_n(\lambda)| \quad (25)$$

위 식에서 $c_r(\lambda)$ 은 임의의 $p_n(\lambda)$ 이 속하는 모 집단의 대표 분광반사율을 의미한다. 이렇게 매 단계마다 TE를 구하여 이 값의 수렴도를 평가하는 방법으로 Lloyd알고리즘을 반복 적용하였다. 분광반사율을 기준으로 먼셀 시스템의 색표본을 분할하는 과정은 그림 4와 같다.

유사 분광반사율 모집단의 구성을 마친 후 주성분 분석을 통해 각 모집단에 대해 3개씩의 주성분 벡터를 구성하고 이렇게 구한 주성분 벡터 집합을 이용해 그림 3과 같은 과정으로 3대역 카메

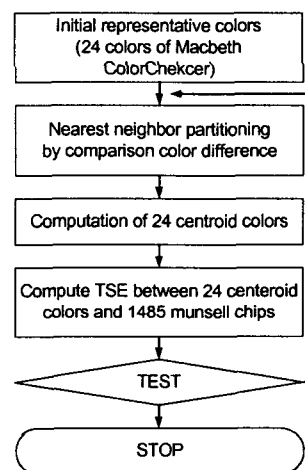


그림 4. 유사 분광반사율 모집단을 구성하기 위한 Lloyd알고리즘의 적용

라 출력 신호에 대한 물체 표면의 분광 반사율을 추정한다.

6. 논의된 분광반사율 추정방법의 성능비교

앞서 소개한 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 3대역 주성분 분석법, 5대역 위너 추정법, Macbeth ColorChecker의 색상 영역별 모집단을 이용한 유사색 3대역 주성분 분석법과 분광반사율을 기준으로 분할한 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법이 비교되었다. 기존의 3대역 주성분 분석을 위해서는 1485개의 Munsell 색시료를 모두 이용하여 주성분을 계산하였다. 그림 5은 1485개 Munsell 색시료로 구한 3개 주성분의 분광 반사율을 나타낸다.

본 연구에서는 카메라의 분광 감도를 구하기 위하여 단색광 발생기를 이용하여 10nm간격으로 카메라에 주사한 다음 파장별 상대적인 분광 감도를 구하였다. Macbeth ColorChecker의 색상 영역별 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법을 위해서는 Macbeth ColorChecker의 24개 색 시료에 대한 CIELAB 측정값을 기준으로 색차를 이용해 색

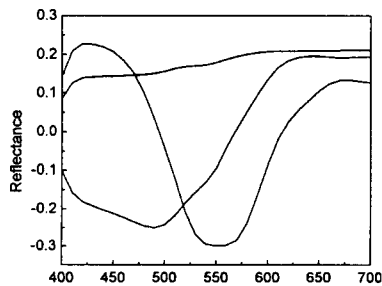


그림 5. 1485 Munsell 색시료에 대한 주성분 벡터

상 영역별 모집단을 구성하였다. 그림 6은 색차 문턱치를 달리하며 색상 영역별 모집단을 구성하고 이 모집단의 주성분을 이용해 Munsell모집단에서 임의로 선택된 색시료의 분광 반사율 추정을 했을 때 측정된 분광 반사율과 추정된 분광 반사율 사이의 평균 추정오차를 나타낸다.

그림 6에서 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 6에서 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 구하

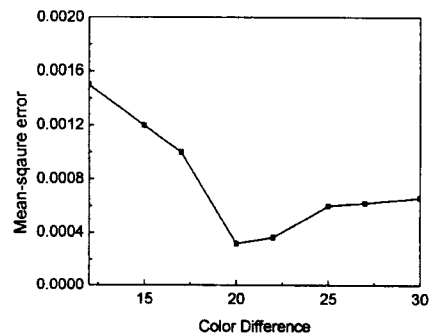


그림 6. 색차 문턱치에 따른 평균 분광 반사율 추정오차

여 분광반사율을 기준으로 모집단을 구성한 방법과 비교하였다. 마지막으로 추정 방법에서는 전술한 바와 같이 Lloyd 양자화기 설계 알고리즘을 이용하여 1485 Munsell 칼라 칩을 영역별로 분할하였다.

그림 7은 Lloyd 반복 알고리즘을 적용할 때 대표 분광반사율 갱신과정에서 대표 분광반사율과 1485개 전체 분광반사율간의 오차 합의 변화 추이를 보여준다. 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 Munsell 분광 반사율을 분할하여 영역별 모집단을 구성하였다. 그림 8은 앞에서 언급한 4가지 분광반사율 추정법을 이용해 120개의 Munsell 색시료에 대하여 분광 반사율 추정 실험을 한 결과이다.

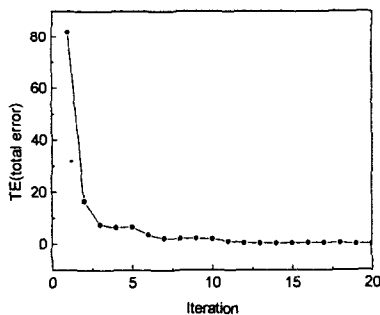


그림 7. Lloyd 알고리즘을 적용할 때 반복 횟수에 따른 전체 오차의 변화

그림 8에서는 결과 출력을 위해 120개중 24개를 일정한 간격으로 선택하여 표시하였다. 그림 8(h)에서 보는 바와 같이 제안한 3대역 추정방법이 가장 적은 추정오차를 보인다. 그림 8(f)의 경우 1485개의 전체 Munsell 색시료 전체에 대하여 하나의 주성분 집합을 만들고 이를 이용해 전체 색의 분광반사율을 추정하는 그림 8(b)에 비해서는 우수한 성능을 보이지만, 전술한 바와 같이

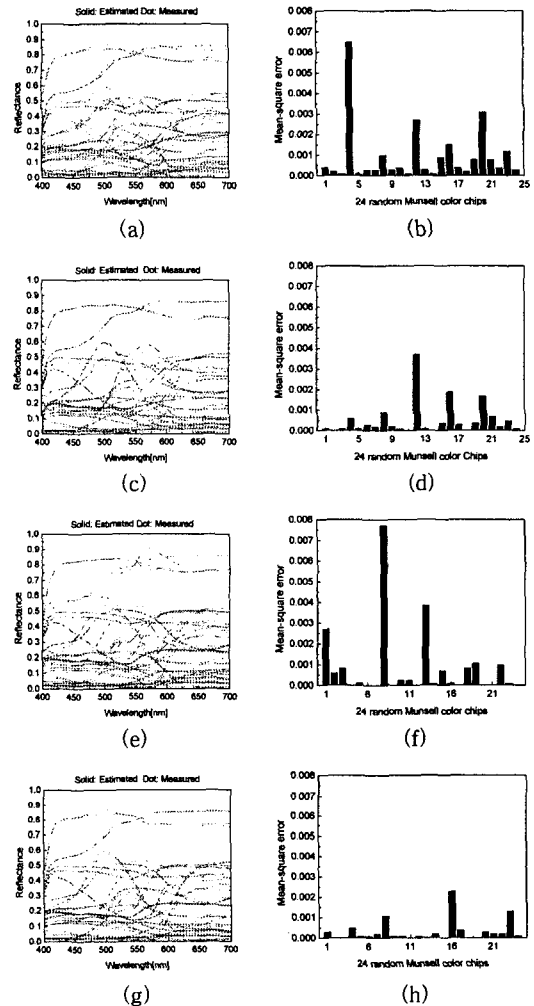


그림 8. 측색된 분광반사율과 추정된 분광반사율 및 두 분광반사율간의 MSE 비교

(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) 분광반사율을 기준으로 분할한 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법 (h) 분광반사율을 기준으로 분할한 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법의 분광반사율 추정 오차

전체 색역에 대하여 균등하게 분포한다고 할 수 없는 Macbeth ColorChecker를 이용해 유사색 모집단을 만들고 또한 모집단을 만드는 과정에서

표 2. 1485개의 Munsell 색시료 중 등간격으로 선택된 120개의 시료에 대한 분광반사율 추정 실험 결과

추정 내용	추정 방법	3대역 주성분 분석법	5대역 위너 추정법	색차로 분할한 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법	분광반사율을 기준으로 분할한 모집단을 이용한 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

색차 문턱치를 이용하므로 각 모집단에 포함되는 색시료의 수가 각기 다르다. 따라서 이러한 모집단에 대해 주성분을 구하고 이를 분광반사율 추정에 이용할 경우 그림 8(f)에서 보는 바와 같이 색에 따라 추정오차의 분산이 비교적 크다는 것을 알 수 있다. 표 2는 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 분광반사율을 기준으로 분할한 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법이 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 분광반사율을 기준으로 분할한 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법이 1485개의 전체 Munsell모집단에 대하여 최적화된 분광분포 모집단을 만들고 이로부터 주성분을 구성하여 각 입력색에 대해 적응적으로 분광반사율을 추정하기 때문에 추정오차가 줄어들음을 알 수 있다.

7. 결론

본 기고에서는 분광반사율 추정에 관한 기존의

방법들에 대하여 소개함으로써 물체의 인식과정에서 필요한 피사체의 색자극을 추출해 내는 방법에 대하여 살펴보았다. 특히 3대역 이상의 다대역 카메라를 이용하지 않더라도 주성분 분석법과 위너 추정법을 이용함으로써 저대역의 출력 신호로부터 더 세분화된 대역의 분광반사율을 추정할 수 있으며, 또한 유사색 모집단을 이용하여 색상별로 주성분을 최적화 할 경우 동일한 대역에서도 추정오차를 줄일 수 있음을 확인하였다. 더 나아가 유사색 모집단을 구성하는 방법에 있어서도 색차보다는 분광반사율을 기준으로 분할하는 방법이 더 우수한 성능을 보인다는 것을 확인하였다. 따라서 상기의 연구 결과를 물체 인식에 이용할 경우 피사체를 인식하는데 있어 RGB의 3차원 정보로부터 더 고차원의 정보로 확장이 가능하게 됨으로써 인식 성능의 향상을 얻을 수 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

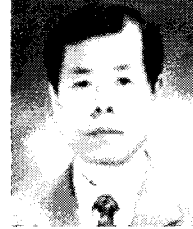
- [1] H. Haneishi, T. Hasegawa, N. Tsumura, and Y. Miyake, "Design of color filters for recording artworks," *IS&T 50th Annual conference*, pp. 369-372, 1997.
- [2] Y. Miyake and Y. Yokoyama, "Obtaining and reproduction of accurate color images based on human perception," *Proc. SPIE 3300*, pp. 190-197, 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. Theroy*, vol. IT-18, pp. 127-135, Mar. 1982.
- [11] M. J. Vrhel, R. Gershon, 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*, Messachusetts, Addison Wesley Longman, Inc., pp. 113-123, 1997.
- [13] 권오설, 이철희, 이호근, 하영호, "유사 분광반사율 모집단별로 구성된 주성분 집합을 이용한 개선된 분광반사율 추정," *대한전자공학회 논문지*, 제40권 SP편, pp. 11-19, Mar. 2003.



이 철 희

- 1995년 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1997년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2000년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사 - 전자공학)
- 2000년 3월~현재 경운대학교 컴퓨터공학과 전임강사
- 2002년 7월~현재 한국화상학회 총무이사
- 관심분야 : 칼라영상처리, 칼라프린팅, 컴퓨터비전



하 영 호

- 1976년 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1978년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1985년 The University of Austin at Texas (공학박사 - 전자공학)
- 1986년 3월~현재 경북대학교 조교수, 부교수, 교수
- 1998년 5월~현재 IEEE Taegu Section Chairman
- 2000년 3월~현재 (사) 대구경북 디지털밸리 이사
- 2001년 5월~현재 한국화상학회 회장
- 2002년 7월~현재 International Congress for imaging Science Committee Member (Koean Representative)
- 2003년 1월~현재 대한전자공학회 부회장
- 전문분야 : 칼라영상처리, 컴퓨터비전, 영상압축



이 응 주

- 1992년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사
- 1996년 8월 경북대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1992년 3월 국방과학연구소 품관소 연구원
- 2000년 7월~2002년 2월 (주)디지털넷뱅크 대표이사
- 2000년 1월 현재 한국정보처리학회 및 한국신호처리시스템학회 편집위원
- 2002년 1월 현재 한국화상학회 이사
- 1997년 3월~현재 동명정보대학교 정보통신공학과 교수
- 관심 분야 : 영상처리, 컴퓨터비전, 생체인식