

스펙트럼 특성 모델을 이용한 CCD 카메라 시스템의 고성능 칼라 Capturing

이상진, 신윤철, 김일도, 김문철
삼성전자 DM 연구소, Video Lab.

High Fidelity Color Capturing of CCD-Camera System by Using of Spectral Sensitivity Model

Sangjin Lee, Yooncheol Shin, Ildo Kim, Mooncheol Kim
Video Lab.
Digital Media R&D Center
Samsung Electronics co., LTD.
E-mail : leesangjin@samsung.com

Abstract

CCD Camera System 으로 capture 한 image 를 표준 display 장치로 재현할 때 capture 할 당시의 원 피사체의 모습을 그대로 재현하여야만 한다. 그러나 일반 consumer 용 camera system 의 CCD channel spectral sensitivity 특성이 인간의 spectral sensitivity($l(\lambda)$, $m(\lambda)$, $s(\lambda)$) 특성과 일치하지 않고, linear transform 의 관계도 성립하지 않음으로써 capturing 시 근본적인 color error 가 발생하게 된다. 기존의 CCD Camera System 에서는 CCD sensor 의 color 정보와 display 장치의 color 정보와의 단순한 산술적인 관계로 color 를 재구성하는 방법을 사용하고 있어 원 피사체의 color 를 그대로 재현할 수가 없다.

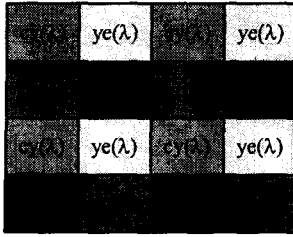
본 논문에서 제시하는 알고리즘은 CCD 의 channel spectral sensitivity 특성과 CIE-color matching function 과의 관계를 고려하여 color 를 재구성함으로써 color error 를 줄이도록 하였다. 제시된 알고리즘의 color error 를 검증하기 위하여 물체의 고유반사율을 알고 있는 AGFA IT8.7-2 test chart(283 spectra), Dupont Paint Chips(120 spectra), Mcbeth Color Checker(64 spectra) 및 Natural Objects(170 spectra) 등 다양한 objects spectra(637 spectra)

[1][2]를 이용하여 기존 방법의 알고리즘과 비교하여 보았다.

I. 서론

같은 CCD sensor 를 사용하더라도 color 를 재구성하는 방법에 따라 표준 display 장치를 통해 출력되는 color 는 달라지게 된다. [그림 1]과 같이 Mosaic Filter 형 CCD 는 Cyan, Magenta, Yellow, Green 의 4 가지 color pixel 들이 모여 한 full color 를 구성한다. 즉, 한 pixel 에 한 개의 color 정보 밖에 담고 있지않기 때문에 주변 pixel 의 color 정보를 이용하여 color 를 재구성을 할 수 밖에 없다. 기존의 방식에서는 각 color 를 포함하는 sub-pixel($cy(\lambda)$, $ye(\lambda)$, $gr(\lambda)$, $ma(\lambda)$)들에 integration 된 광 에너지의 단순한 조합으로 최종 출력 신호인 RGB 값을 얻게 된다.[3] 이러한 단순 transform 에 사용된 변환계수를 사용해 각 sub-pixel 의 spectral sensitivity curve 를 transform 해서 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function 과 비교하여 보면 color 재구성에 사용된 curve 가 상당 부분 차이가 있음을 알 수 있다. [그림 3] 이러한 color error 를 줄이기 위해 본 논문에서는 Least Mean Square Fitting 방법(이하 LMSF)을 이용한 color 재구성 알고리

II. 본론



[그림 1] CCD Photo Cell

2.1 기존 방법

CCD Sensor 는 vertical shift register 를 통해 두개의 pixel 값의 합을 출력 값으로 한다. 즉 $cy(\lambda) + gr(\lambda)$, $ye(\lambda) + ma(\lambda)$, $gr(\lambda) + cy(\lambda)$, $ma(\lambda) + ye(\lambda)$, $cy(\lambda) + ma(\lambda)$, $ye(\lambda) + gr(\lambda)$ 와 같은 형태로 출력이 된다. 이렇게 출력된 신호를 이용해 식(1), (2), (3) 에 의해 $y'(\lambda)$, $cb'(\lambda)$, $cr'(\lambda)$ 를 만들게 된다.

$$y'(\lambda) = \frac{ma(\lambda) + ye(\lambda) + gr(\lambda) + cy(\lambda)}{2} \quad (1)$$

$$cr'(\lambda) = (ma(\lambda) + ye(\lambda)) - (gr(\lambda) + cy(\lambda)) \quad (2)$$

$$cb'(\lambda) = (ye(\lambda) + gr(\lambda)) - (cy(\lambda) + ma(\lambda)) \quad (3)$$

이렇게 만들어진 $y'(\lambda)$, $cb'(\lambda)$, $cr'(\lambda)$ 신호는 YCbCr color space 를 RGB color space 로 conversion 해주는 matrix M^* 에 의해 $ro(\lambda)$, $go(\lambda)$, $bo(\lambda)$ 로 conversion 을 한다.

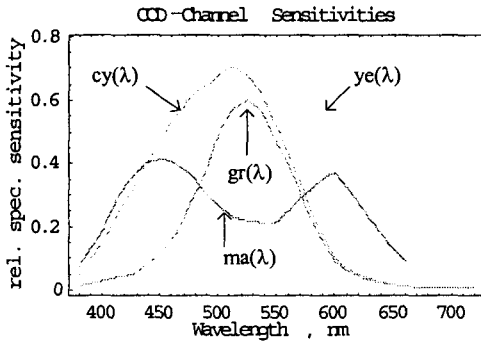
이와 같이 단순히 color space 만 바꾸어주게 되는 단순연산을 이용한 기존 방법에서는 CCD 의 channel spectral sensitivity 특성과 CIE-color matching function 과의 관계를 고려하지 않음으로 인해 많은 color error 를 만들게 된다.

2.2 Least Mean Squares Fit

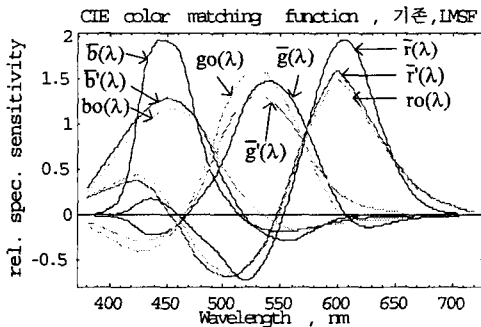
이상적인 CCD camera 의 spectral sensitivity 특성을 $V = (V_1(\lambda), V_2(\lambda), V_3(\lambda))$, CIE standard color matching function 의 spectrum 특성을 $X = (\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda))$ 라고 정의할 때, CCD camera 의 입력 신호와 RGB 출력과의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$X = MV \quad (4)$$

여기서 M 은 CCD camera 의 spectral sensitivity 특성과 CIE standard color matching function 특성과의 선형적 관계를 나타내는 matrix 이다. 그러나 식(4)을 만족하는 CCD Camera System 을 만들기란 쉽지가 않다. 따라서 일반 consumer 용으로 사용되는 대부분의 CCD Camera 는 이 조건을 만족하지 못하므로 Systematic Color Capturing Error 가 발생하게 된다. 근본적인 비선형적 문제를 보정하기 위한 방법으로 식(5)와 같은 LMSF 관계식을 사



[그림 2] spectrum



[그림 3]

음을 제시하였다. 즉, Color matching function 의 spectrum 과 CCD sensor 의 color spectrum 과의 관계를 Least Mean Square Fitting 방법으로 전달함수를 만들어 color 를 재구성하는 방법이다.

제시된 알고리즘을 이용하여 재구성한 $\bar{r}'(\lambda)$, $\bar{g}'(\lambda)$, $\bar{b}'(\lambda)$ color 의 spectrum 은 기존의 방법과 비교하여 color matching function 과 graph 형태가 많이 비슷하여 진 것을 확인할 수 있다. [그림 3]

용하게 된다.

$$M \equiv (VV^T)^{-1}(VX) \quad (5)$$

여기서 V^T 는 V 의 전치행렬, V^{-1} 은 V 의 역행렬을 나타낸다.

[그림 2]와 같은 Mosaic Filter형 CCD sensor의 Cyan, Magenta, Yellow, Green 4개의 color 별 spectrum 특성을 이용해 우선 CCD charge transfer 과정 및 preprocessing 과정에서 계산의 용이성을 위해 식(6), (7), (8)에 의해 V space로 변환한다. 이렇게 구해진 V 값을 식(5)에서 사용하게 된다.

$$V_1 = \frac{cy(\lambda) + ma(\lambda) + ye(\lambda) + ge(\lambda)}{2} \quad (6)$$

$$V_2 = -cy(\lambda) + ma(\lambda) + ye(\lambda) - gr(\lambda) \quad (7)$$

$$V_3 = -cy(\lambda) - ma(\lambda) + ye(\lambda) + gr(\lambda) \quad (8)$$

위에서 얻은 V 와 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function X 와의 관계를 식(5)에 의해 LMSF로 근사하면 $y'(\lambda)$, $cb'(\lambda)$, $cr'(\lambda)$ 신호를 $\bar{r}'(\lambda)$, $\bar{g}'(\lambda)$, $\bar{b}'(\lambda)$ 신호로 conversion해주는 matrix M 을 얻을 수 있다.

CCD sensor의 출력 신호를 preprocessing 알고리즘을 이용하여 만들어낸 V_1, V_2, V_3 신호를 식(9)과 같은 관계식을 이용하여 $\bar{r}'(\lambda)$, $\bar{g}'(\lambda)$, $\bar{b}'(\lambda)$ 출력을 만들어 낼 수 있다. 이렇게 만들어진 출력은 기존방법을 이용한 출력신호에 비해 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function 특성에 보다 근접하게 된다.

식(9)에 의해 재구성된 $\bar{r}'(\lambda)$, $\bar{g}'(\lambda)$, $\bar{b}'(\lambda)$ data와 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ data, 기존방법으로 구해진 $ro(\lambda)$, $go(\lambda)$, $bo(\lambda)$ data를 아래 [그림 3]에 나타내었다. 그림[3]에서 확인할 수 있듯이 재구성된 data의 spectral sensitivity가 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function의 spectral sensitivity에 보다 근접함을 알 수 있다. 참고로 각 Spectrum의 Amplitude 차이는 White Balance에 의해 자동 보정되어 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function의 Integral Value와 일치시키도록 한다.

$$\begin{pmatrix} \bar{r}'(\lambda) \\ \bar{g}'(\lambda) \\ \bar{b}'(\lambda) \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} V_1(\lambda) \\ V_2(\lambda) \\ V_3(\lambda) \end{pmatrix} \quad (9)$$

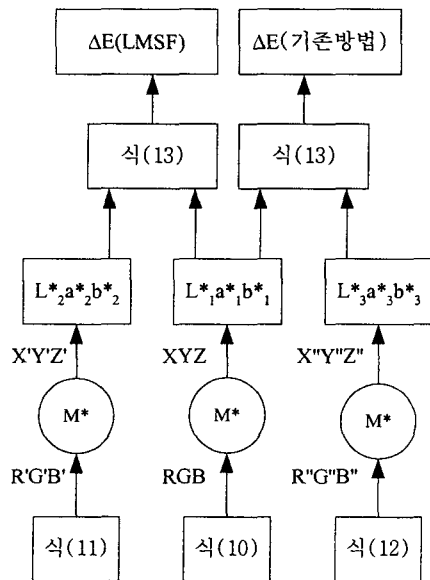
식(9)에 의해 계산된 $\bar{r}'(\lambda)$, $\bar{g}'(\lambda)$, $\bar{b}'(\lambda)$ data의 performance를 확인하기 위해서 즉, 구해진 Matrix에 의해 계산된 값이 기존 방법으로 구해진 $ro(\lambda)$, $go(\lambda)$, $bo(\lambda)$ data 대비 얼마나 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function의 spectral sensitivity 특성과 유사한 특성을 갖는가를 측정해보기 위해 고유반사율을 알고 있는 AGFA IT8.7-2 test chart, Dupont Paint Chips, Mcbeth Color Checker 및 Natural Objects를 이용하여 확인하였다. [그림 4]

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} \cdot R(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{r}'(\lambda) \\ \bar{g}'(\lambda) \\ \bar{b}'(\lambda) \end{pmatrix} \cdot R(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} R'' \\ G'' \\ B'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ro(\lambda) \\ go(\lambda) \\ bo(\lambda) \end{pmatrix} \cdot R(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_{11} - L^*_{21})^2 + (a^*_{11} - a^*_{21})^2 + (b^*_{11} - b^*_{21})^2} \quad (13)$$



[그림 4]

2.3 Compute delta E with known reflectance

색차 비교는 인간 눈의 특성과 연관된 data를 만들

기 위하여 각각 구하여진 XYZ data 를 CIE-L*a*b* color space 로 conversion 하여 비교 하였다.^[4] 또 비교한 data 의 객관성을 유지 하기 위하여 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function 과 기존방법에 구하여진 $r_o(\lambda)$, $g_o(\lambda)$, $b_o(\lambda)$ 의 spectral sensitivity 특성, 본 논문에서 제시한 알고리즘을 통하여 구하여진 $\bar{r}'(\lambda)$, $\bar{g}'(\lambda)$, $\bar{b}'(\lambda)$ 의 spectral sensitivity 특성을 고려한 값과의 색차를 구하여 평균, 최대값과 표준편차를 수치화하였다. [그림 4]에서는 ΔE 을 구하는 과정을 도시 하였다. M*는 RGB color space 를 XYZ color space 로 conversion 하는 표준 matrix 로 CIE 표준 규격을 따른다. 구하는 과정에서 사용된 식(10), (11), (12)의 R(λ)는 물체의 고유 spectral sensitivity, I(λ)는 비추어준 조명의 spectral sensitivity 이고 CIE-D₆₅조명을 사용하였다

논문에서 제시한 알고리즘의 결과가 기존방법에 의한 결과에 비교해 object 별 ΔE 의 Mean 값이 3~6 대로 약 절반정도 개선 되었음을 확인할 수 있다.

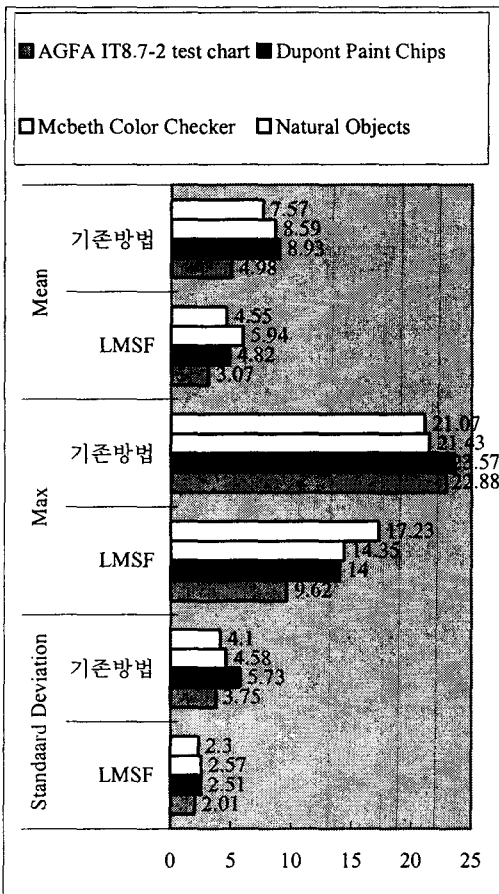
III. 결론 및 고찰

논문에서 제시한 방법에 의거 capture 한 color signal 과 기존방법에 의한 재구성한 방법에 대해 standard observer 가 보았을 때의 color 신호와의 색차를 uniform color space 인 CIE-L*a*b*상에서 비교한 결과 총 대상 spectrum 637 개에 대해 object 별로 모두 현저히 개선 되었음을 알 수 있다. 이는 인간이 CCD camera system 을 이용해 사물을 capture 한 data 를 표준 display 장치에서 보았을 때 capture 한 피사체의 영상정보를 보다 정확히 보존하여 표현한다는 것을 의미한다. 즉, 인간의 눈으로 직접 피사체를 본 것과 그 피사체를 CCD camera system 으로 capture 하여 표준 display 장치에서 display 하는 것과 인간이 느끼기에는 거의 유사하다고 말할 수 있다. 통계적으로도 복잡한 정지영상에서 display 되는 영상신호의 spectral sensitivity 와 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ color matching function 의 spectral sensitivity 와의 ΔE 값이 3 정도이면 인간이 구별하기 힘든 것으로 알려져 있다. 동영상에서는 이 값이 더욱 커질 것이므로 [그림 5]에 도시된 값에서 확인할 수 있듯이 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용 시 standard observer 가 느끼는 색차는 거의 무시 할 수 있을 것이다.

이와 같이 본 논문에서 제시한 알고리즘은 기존 방법대비 모든 color camera system 의 Transformation Matrix 를 간단히 변경함으로써 Camera System 의 Color Fidelity 를 효과적으로 상승시킬 수 있다.

참고문헌

- [1] <http://www.ite.rwth-aachen.de/ITE/inhalt/service/downloads.html>
- [2] <ftp://server.ite.rwth-aachen.de/pub/spectra>
- [3] Sony ICX220AK data sheet
- [4] Colorimetry. CIE Pub. 15.2, 2nd ed., Commission International de L'Eclairage, Vienna,



[그림 5] ΔE

이렇게 구한 ΔE 의 mean 값, max 값 및 표준편차 값을 [그림 5]에 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 본