

LCD의 Leakage 현상을 고려한 색재현

허 태 옥, 이 상 훈, *한 찬 호, 송 규 익
경북대학교 전자공학과, *경운대학교 소프트웨어공학과
전화 : 053-940-8633 / 핸드폰 : 011-9581-9457

Color Reproduction Based on Leakage Effect of LCD

Tae-Wook Heo, Sang-Hoon Lee, *Chan-Ho Han, Kyu-Ik Sohng
Dept. of Electronics, Kyungpook University, *Kyungwoon University
E-mail : htw398@palgong.knu.ac.kr

Abstract

Recently, PC monitor users have been replacing cathode ray tubes (CRT) with liquid crystal displays (LCD). But the chromaticity of the primaries are dependent on RGB input signals. And the colorimetry of LCD changes with gray scale and has a poor performance in color reproduction.

In this paper we propose the enhanced algorithm of color reproduction considering color leakage error and black subpixel error in LCD.

In order to test performance of this algorithm we use the colors of Macbeth colorcheck. As a result of experiments, it was confirmed that the color difference of the LCD using the proposed algorithm was considerably reduced.

색 영역 범위를 제한 받고 있다. 또한, 상관 색온도 CCT(correlated color temperature)가 gray level에 따라 일정하게 유지되지 않는 특징을 가진다.^[3]

본 논문에서는 LCD에서 CRT와 동일한 색 재현을 구현하기 위해서 additivity가 만족하며, leakage 현상을 고려한 A.cazes의 LCD 특성 모델링^[4]을 사용하였고, 이 모델링을 사용하여, LCD의 black subpixel error와 color leakage error를 보정하였다.

LCD의 삼자극치를 CRT의 삼자극치를 기준으로 mapping 함으로써, 원 피사체와 동일한 색 좌표를 나타낼 수 있는 디지털 R, G, 및 B의 값을 구하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 사용하여 Macbeth 샘플색을 측정하여 실험한 결과, 색오차가 현저히 줄어들었음을 확인하였다.

I. 서론

액정 디스플레이 (liquid crystal display; LCD)는 얇고 가벼우며, 저 소비 전력과 저 동작 전압 등의 우수한 특성을 갖추고 있기 때문에 개인용 컴퓨터의 모니터나 TV, 비디오 관련 분야 및 항공기 차량 등 다양한 분야에서 이용되고 있다. LCD는 시야 각, 응답 속도 등의 기술적 분야에서는 상당한 발전을 하였으나, 색 재현력은 액정의 물리, 전기-광학적 특성 때문에 아직 기존의 CRT의 성능에 못 미치고 있다.^{[1]-[4]}

CRT는 그레이 스케일에 독립적으로 일정한 색온도를 지니고 있으며, 색 재현 품질이 우수하다. 반면, LCD는 백 라이트를 이용하여 백색을 나타내고 있으며 R, G, 및 B 삼색의 컬러필터에 의해 나타낼 수 있는

II. LCD의 특성

2.1 Color Leakage 현상

LCD의 특성을 모델링하기 위해서는 먼저, 액정의 물리적 성질을 이해해야 한다. 예를 들어 디지털 R값에 대해 고려해 보면 다음과 같다. 즉, 그림에서와 같이 백 라이트에서 발생하는 삼파장 형광등의 광이 액정을 통과할 때, 레벨에 따라 액정이 뒤틀리는 각도가 달라지므로, r subpixel을 통해서 나오는 빛의 일부가 빛의 굴절, 및 반사 등에 의해서 좌우의 g, b subpixel을 통과한다. 이러한 성분이 삼원색의 색좌표를 일정치 못하게 하고, additivity가 성립하지 못하게 한다. 그림 1은 $R=R(i), G=0, B=0$ 일 때의 Color Leakage 현상을 모델링한 것이다.

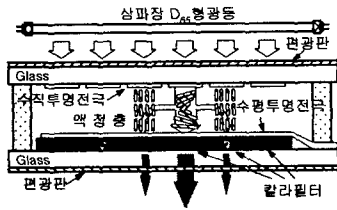


그림 1. LCD의 구조 및 Color Leakage 현상

2.2 LCD 특성 모델링

LCD의 특성을 모델링하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 한 픽셀에 대한 R의 삼자극치는 r subpixel의 삼자극치와 total error(TE)의 합으로 이루어지며, 이를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_{R(i)} \\ Y_{R(i)} \\ Z_{R(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r(i)} \\ Y_{r(i)} \\ Z_{r(i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{TE_R(i)} \\ Y_{TE_R(i)} \\ Z_{TE_R(i)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 디지털 R값에 대한 TE는 실험에 의해 측정되는 삼자극치와 r subpixel을 통과하는 순수한 r의 삼자극치와의 차이이다. TE는 두가지 성분의 합으로 이루어지며, 첫번째 성분은 black subpixel이 back light에 의해 완전히 차단되지 못하여 발생하는 black subpixel error이고, 이를 KE로 정의한다. 두번째 성분은 투과하는 광의 세기에 따라 다른 g, b 성분이 r subpixel에 영향을 주어서 발생하는 color leakage error이다. 이를 LE로 정의한다. TE를 행렬식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} X_{TE_R(i)} \\ Y_{TE_R(i)} \\ Z_{TE_R(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{KE_R(i)} \\ Y_{KE_R(i)} \\ Z_{KE_R(i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{LE_R(i)} \\ Y_{LE_R(i)} \\ Z_{LE_R(i)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 구성된다.

TE 중 첫 번째 성분인 KE는 각각 자신을 제외한 두 black subpixel의 합으로 구성되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{KE_R(i)} \\ Y_{KE_R(i)} \\ Z_{KE_R(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{g(0)} \\ Y_{g(0)} \\ Z_{g(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{b(0)} \\ Y_{b(0)} \\ Z_{b(0)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

black subpixel의 삼자극치는 디지털 값 0을 인가했을 때의 subpixel의 삼자극치이다. r subpixel에 대해 고려해보면, g, b에 비해 상대적으로 큰 디지털 R = 255을 인가해서 그 값에 비례상수를 곱하여 사용한다. 이를 행렬식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} X_{r(0)} \\ Y_{r(0)} \\ Z_{r(0)} \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} X_{R(255)} \\ Y_{R(255)} \\ Z_{R(255)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이다. g와 b의 black subpixel도 식 (4)와 동일하게 비례계수 β, γ 를 이용하여 나타낼 수 있다. $\alpha, \beta,$ 및 γ 를 구하기 위해 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R(255)} & X_{G(255)} & X_{B(255)} \\ Y_{R(255)} & Y_{G(255)} & Y_{B(255)} \\ Z_{R(255)} & Z_{G(255)} & Z_{B(255)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{W(0)} \\ Y_{W(0)} \\ Z_{W(0)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $X_{W(0)}, Y_{W(0)}, Z_{W(0)}$ 은 LCD에 $R=0, G=0,$ 및 $B=0$ 을 인가했을 때의 삼자극치이다.

식 (5)를 이용하여 $\alpha, \beta,$ 및 γ 를 구하고, 식 (4)에 대입하면, r, g, 및 b 각 black subpixel의 삼자극치를 구할 수 있다. 여기서 구한 black subpixel의 삼자극치를 식 (3)에 적용시켜 KE를 구할 수 있다.

두번째 성분인 LE는 R의 leakage 성분과 RGB 모두의 leakage 성분의 비가 R의 삼자극치와 RGB 합삼자극치의 비와 같다고 가정한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{X_{LE_R(i)}}{X_{LE_RGB(i)}} &= \frac{X_{R(255)}}{X_{RGB(255)}} \\ \frac{Y_{LE_R(i)}}{Y_{LE_RGB(i)}} &= \frac{Y_{R(255)}}{Y_{RGB(255)}} \\ \frac{Z_{LE_R(i)}}{Z_{LE_RGB(i)}} &= \frac{Z_{R(255)}}{Z_{RGB(255)}} \end{aligned} \quad (6)$$

물론, 디지털 G와 B의 LE성분에 대해서도 R에서와 동일하게 가정하였다.

앞에서 구한 KE와 LE를 이용하여, 디지털 R값에 대한 삼자극치를 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[3]

$$\begin{bmatrix} X_{MOD_R(i)} \\ Y_{MOD_R(i)} \\ Z_{MOD_R(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R(i)} \\ Y_{R(i)} \\ Z_{R(i)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{g(0)} \\ Y_{g(0)} \\ Z_{g(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{b(0)} \\ Y_{b(0)} \\ Z_{b(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{LE_R(i)} \\ Y_{LE_R(i)} \\ Z_{LE_R(i)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

G와 B에 대해서도 동일하게 KE와 LE를 고려하여 변환된 삼자극치를 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 식 (7)의 디지털 RGB값에 대한 변환된 삼자극치를 사용하여, LCD의 특성을 모델링한다. 그리고 그림2의 (a)에 R, G, 및 B 각각의 디지털 입력값에 대한 변환 전의 색도좌표를 나타내었고, 그림 2의 (b)에는 변환 후의 색도좌표를 나타내었다. 그림 2의 (b)에서 변환된 삼자극치가 일정한 색좌표를 가짐을 알 수 있다. 이로써, LCD 예측 모델링이 타당함을 알 수 있다.

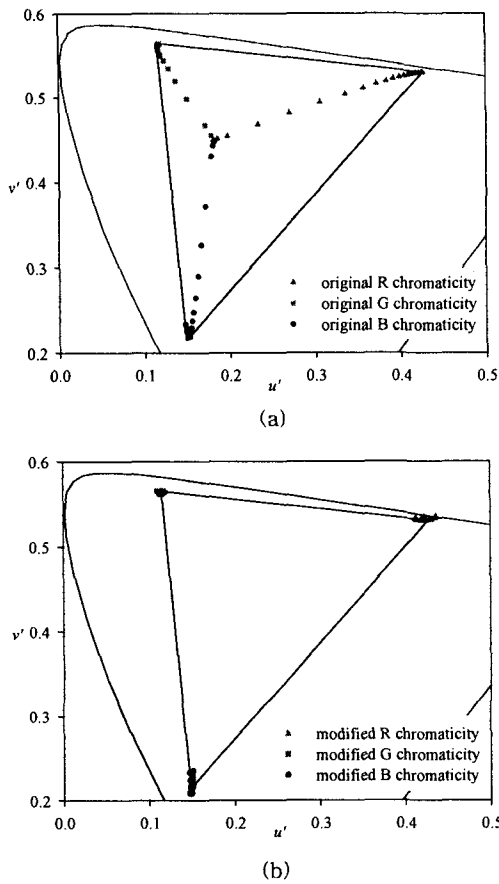


그림 2. R, G, 및 B 각각의 디지털 입력 값에 대한 색도 좌표 비교: (a) 변환 전 색도 좌표; (b) 변환 후 색도 좌표

2.3 CRT와 동일한 색좌표 재현

CRT에서 디지털 R, G 및 B로부터 삼자극치에의 표현은 다음 식 (8)과 같다.^[5]

$$\begin{bmatrix} X_{CRT} \\ Y_{CRT} \\ Z_{CRT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ 1-x_R-y_R & 1-x_G-y_G & 1-x_B-y_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{Rmax} \left(\frac{D_R}{255}\right)^\gamma \\ L_{Gmax} \left(\frac{D_G}{255}\right)^\gamma \\ L_{Bmax} \left(\frac{D_B}{255}\right)^\gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, \$x_R, y_R, x_G, y_G, x_B, y_B\$ 는 CRT의 인광체 색좌표를 나타내고, \$\gamma\$ 는 CRT의 감마 값이다.

한편, CRT와 LCD에서 각각 나타낼 수 있는 동일 백색의 최대 삼자극치가 서로 다르기 때문에, 스케일링 팩터 \$\delta\$ 를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_{LCD} \\ Y_{LCD} \\ Z_{LCD} \end{bmatrix} = \delta \begin{bmatrix} X_{CRT} \\ Y_{CRT} \\ Z_{CRT} \end{bmatrix} \quad \text{where, } \delta \equiv \begin{bmatrix} X_{LCDmax}/X_{CRTmax} \\ Y_{LCDmax}/Y_{CRTmax} \\ Z_{LCDmax}/Z_{CRTmax} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, \$\delta\$ 는 최대 밝기를 나타내는 LCD와 CRT의 white의 삼자극치 비이다.

\$\delta\$ 를 이용하여 구한 LCD의 삼자극치는 R, G, 및 B 성분의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 특성은 식 (7) 이 각각 R, G, 및 B의 크기에 무관한 색 좌표를 가지며, additivity를 만족시키는 성질을 이용한 것이다.^[3] 이를 행렬식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{LCD} \\ Y_{LCD} \\ Z_{LCD} \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} x_{MOD_R} \\ y_{MOD_R} \\ z_{MOD_R} \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} x_{MOD_G} \\ y_{MOD_G} \\ z_{MOD_G} \end{bmatrix} + c \begin{bmatrix} x_{MOD_B} \\ y_{MOD_B} \\ z_{MOD_B} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, \$x_{MOD_R}\$ 은 식 (7)의 \$X_{MOD_R(i)}\$ 의 \$x\$좌표이다.

식 (10)에서 \$a, b, c\$ 를 구하기 위해 행렬식을 바꾸어 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{MOD_R} & x_{MOD_G} & x_{MOD_B} \\ y_{MOD_R} & y_{MOD_G} & y_{MOD_B} \\ z_{MOD_R} & z_{MOD_G} & z_{MOD_B} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{LCD} \\ Y_{LCD} \\ Z_{LCD} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (10)의 LCD 삼자극치는 식 (11)에서 구한 \$a, b, c\$ 로부터 R, G, 및 B의 삼자극치 성분의 합으로 나타낼 수 있다.

마지막으로, 식 (7)에서 R, G, 및 B에 대한 변환된 삼자극치를 미리 table로 만들고, 분리된 R, G, 및 B 성분의 삼자극치와 서로 비교하면, 디지털 R, G, 및 B 를 구할 수 있다.

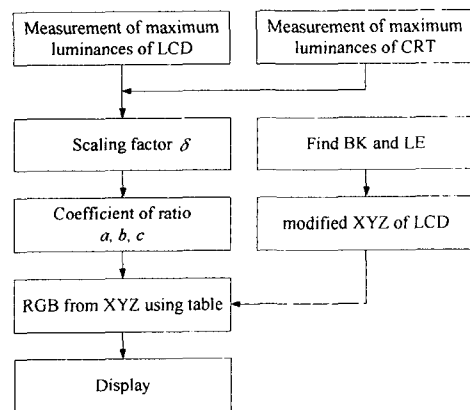


그림 3. LCD 상에서의 색재현을 위한 블록도

그림 3에서는 LCD상에서의 색재현을 위한 블록도를 나타내었다. 그림 4에서는 Gray Scale CCT 보정을

결과를 나타내었고, 보정하기 전보다 보정한 후에 CCT가 6500 ± 300 K 로 거의 일정함을 알 수 있었다.

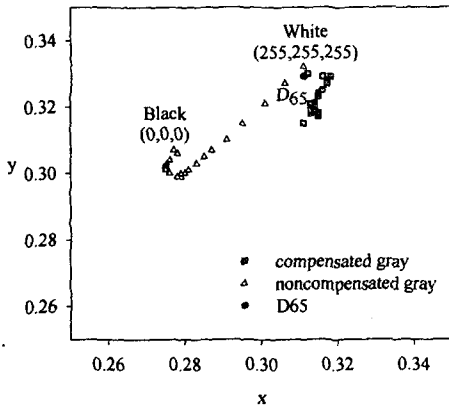
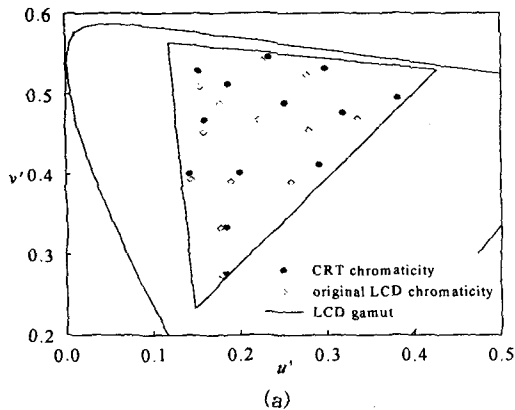


그림 4. Gray scale CCT 보정 결과

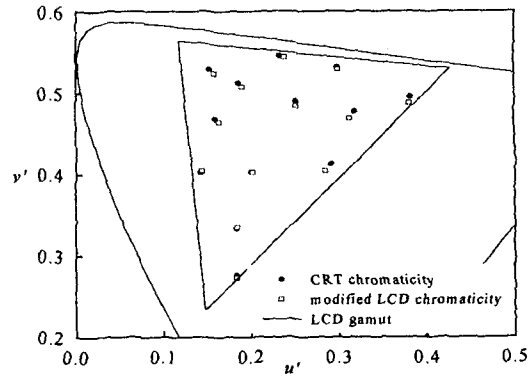
III. 실험 결과 및 고찰

LCD 모니터 상에서 CRT와 동일한 등색을 재현하기 위해 Macbeth Chart의 샘플색에 대해서 모의 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 CRT와 LCD는 LG-FLATRON 795FT와 실험용 LCD-panel이고, 디지털 R, G, 및 B의 삼 자극치는 컬러 분석기 MINOLTA CA100, 및 CA110을 각각 이용하여 측정하였다.

본 논문에서 제안한 색보정 알고리즘으로 Macbeth Chart의 샘플색에 대해 실험한 결과를 그림5에 나타내었다. $L^*u^*v^*$ 의 색도 오차 식에 의해서 색보정 전에는 ΔE_{uv}^* 가 15.39 이었으나, 색보정 후에는 ΔE_{uv}^* 의 값이 3.95로 현저히 줄어들었음을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 5. 샘플색에 대한 색도 좌표 비교; (a) 변환 전, (b) 변환 후.

IV. 결 론

본 논문에서는 LCD에서 CRT와 동일한 색 재현을 구현하기 위해서 A. Cazes의 LCD 특성 모델링을 사용하였다. LCD의 삼자극치를 나타내는데, CRT의 삼자극치를 기준으로 mapping 함으로써, 원 피사체와 동일한 색 좌표를 나타낼 수 있는 디지털 R, G, 및 B의 값을 구하는 방법을 제안하였다.

제안한 방법으로 실험한 결과, LCD는 CRT의 감마 특성을 지니고, gray level에서 6500 ± 300 K의 색온도를 가진다. Macbeth chart의 샘플색에 대한 오차가 색보정 전 $\Delta E_{uv}^* = 15.39$ 에서 색보정 후 $\Delta E_{uv}^* \approx 3.95$ 로 현저히 줄어들었음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] G. Wyszecki and W.S. Stiles, *Color Science*, John Wiley & Sons, 1982.
- [2] Mark D. Fairchild, David R. Wyble, "Colorimetric Characterization of the Apple Studio Display (Flat Panel LCD)," *Munsell Color Science laboratory Technical Report*, July 1998.
- [3] Jason E. Gibson, Mark D. Fairchild, "Colorimetric Characterization of Three Computer Display (LCD and CRT)," *Munsell Color Science laboratory Technical Report*, January 2000.
- [4] Albert Cazes, "On the color calibration of liquid crystal displays," *IS&T/SPIE Conference on Display Metrology*, pp. 154-161, January 1999.
- [5] 畑田豊彦, *カラ画像と畫質評價*, 技術情報協會, 1992.