

다중 회귀분석법을 이용한 스캐너-모니터간 색보정에 관한 연구

박진희 · 김홍석 · 박승욱[†]

대진대학교 물리학과 색채과학연구소

☎ 480-711 경기도 포천군 포천읍

(2003년 4월 3일 받음, 2003년 7월 9일 수정본 받음)

본 연구는 스캔된 이미지의 원본색이 모니터에 그대로 디스플레이 될 수 있게 하는 것을 목적으로 한다. 색보정 과정은 스캐너의 색 특성 묘사를 통한 원본색의 XYZ 추정, 기준 광원의 차이를 고려한 XYZ 변환, XYZ와 RGB간의 색공간 변환으로 구성된다. 특히, XYZ 추정에 있어서 스캐너에 입사되는 빛의 세기와 출력신호간의 비선형적 관계를 두 구간으로 나누어 묘사함으로써 그 정확도를 높였다. EPSON Expression 1680 스캐너를 대상으로 실시한 결과, 228가지 기준색의 기준값과 추정값의 평균 색차는 $1.47 \Delta E_{*}^{*}$ 이었으며, 36가지의 유채색과 22가지의 무채색으로 구성된 시험색의 평균 색차가 각각 $1.51 \Delta E_{*}^{*}$ 와 $0.90 \Delta E_{*}^{*}$ 이었다. 또한 시험색 36가지에 대해 기준값과 추정값으로부터 산출된 sRGB 모니터 입력신호를 동일 모니터에 디스플레이한 결과, 두 이미지의 색이 동일하게 보였다.

주제어 : scanner characterization, multiple regression methode, sRGB.

I. 서 론

디지털 방식을 기반으로 하는 이미지 관련 작업에서 스캐너의 사용은 필수적이다. 그러나 모니터로 보여지는 스캔된 이미지의 색은 원본색(Original Color)과는 크게 다르다. 이를 프린터로 출력하면 모니터로 보여졌던 색과 다를뿐 아니라 원본의 색과도 크게 다른 색을 나타낸다. 이러한 색의 불일치 정도는 사용한 스캐너나 모니터, 그리고 프린터의 제조회사나 모델에 따라서도 큰 차이가 있다. 기존의 색보정 연구는 주로 스캐너-프린터간의 색보정을 목적으로 이루어져 왔다.^[1-3] 그러나, 요사이 인터넷의 발달로 홈페이지나 웹 문서의 이미지를 모니터 화면으로 보는 경우가 많아지고 있다. 스캔된 이미지를 그대로 웹에 올린 경우 원본색이 지니고 있던 정보가 왜곡될 뿐 아니라 웹 사용자의 디스플레이 시스템에 따라서도 다른 색으로 보여지므로 정보 전달에 커다란 혼란이 야기되고 있다.

이에 따라 스캔된 이미지로부터 원본색을 추정하여, 이를 정확하게 재현시킬 수 있는 표준 모니터의 입력 신호를 예측해 내는 기술이 요구되고 있다. 이론적으로 스캐너-모니터간 색보정 알고리즘은 스캐너 색 특성 묘사를 통한 원본색의 $(XYZ)_{D50}$ 추정, 기준 광원 차이를 고려한 $(XYZ)_{D65}$ 변환, 그리고 XYZ와 RGB간의 색공간 변환으로 구성된다. 현재 외국에서는 스캐너나 디지털 카메라와 같은 입력 장치의 색보정을 위하여 이러한 연구가 활발히 수행되어^[4-7] 산업계에서 활용되고 있으며, 국내에서도 산업체의 요구로 점차적으로 관심을 갖게 되었다. 본 연구에서는 EPSON Expression 1680스캐너와 sRGB 모니터를 대상으로 스캐너-모니터간 색보정을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

II. 색보정 알고리즘

2.1. 스캐너 색 특성 묘사 및 스캔된 색의 CIE XYZ 추정

스캐너는 각각 R, G, B 영역의 빛을 투과시키는 세 종류의 필터를 지닌 센서들로 이루어져 있다. 각 필터를 통과한 빛의 세기는 센서에 의해 전기 신호의 크기로 바뀐다. RGB 필터의 투과 스펙트럼은 우리 눈의 LMS(Long wavelength, Middle wavelength, Short wavelength) 추상체의 감도 스펙트럼과 다르므로, 동일한 스펙트럼을 지닌 빛을 스캐너로 스캔한 경우에 스캐너가 받아들이는 삼자극치 $(R, G, B)_{scanner}$ 와 눈으로 직접 본 경우에 눈이 받아들이는 삼자극치인 XYZ는 일치하지 않는다. 즉, $(R, G, B)_{scanner} \neq XYZ$ 이 된다. 따라서 스캔된 원본색의 XYZ를 알아내기 위해서는 식 (1)과 같이 선형관계를 유지해주는 변환 행렬을 구해야 한다. 그런데 스캐너마다 RGB 필터의 투과 스펙트럼이나 광학소자의 특성이 다르므로 각 스캐너에 맞는 변환행렬을 구하는 것을 스캐너 색 특성 묘사 (Scanner characterization)라 한다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{0,x} & C_{1,x} & C_{2,x} & C_{3,x} \\ C_{0,y} & C_{1,y} & C_{2,y} & C_{3,y} \\ C_{0,z} & C_{1,z} & C_{2,z} & C_{3,z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R_{scanner} \\ G_{scanner} \\ B_{scanner} \end{bmatrix} \quad (1)$$

XYZ가 제시되어 있는 기준색들을 스캔하여 각 색의 스캐너 자극치 $(R, G, B)_{scanner}$ 을 구하면 식 (1)을 만족하는 변환행렬을 구할 수 있다. 행렬식의 미지수가 12개이므로 최소한 12가지의 기준색이 필요하다. 시험색을 전 색 영역에서 고르게 선택할수록, 그리고 수를 많이 선택할수록 임의의 색에 대해서도 식 (1)의 관계가 유지되는 변환 행렬을 구할 수 있다. 또한 식 (2)와 같이 스캐너 자극치 간의 상호 영향까지 고려한다면 더욱 많은 수의 기준색이 필요하지만 보다 정확한 변환 행렬

[†]E-mail: colorscience@yahoo.co.kr

을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{0,x} & C_{1,x} & C_{2,x} & C_{3,x} & C_{4,x} & C_{5,x} & C_{6,x} & C_{7,x} & C_{8,x} & C_{9,x} \\ C_{0,y} & C_{1,y} & C_{2,y} & C_{3,y} & C_{4,y} & C_{5,y} & C_{6,y} & C_{7,y} & C_{8,y} & C_{9,y} \\ C_{0,z} & C_{1,z} & C_{2,z} & C_{3,z} & C_{4,z} & C_{5,z} & C_{6,z} & C_{7,z} & C_{8,z} & C_{9,z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R_{scanner} \\ G_{scanner} \\ B_{scanner} \\ R_{scanner}G_{scanner} \\ G_{scanner}B_{scanner} \\ R_{scanner}B_{scanner} \\ R_{scanner}^2 \\ G_{scanner}^2 \\ B_{scanner}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

한편 스캐너 삼자극치 $(R, G, B)_{scanner}$ 는 ADC(Analog to digital converter)에 의해 디지털 신호 (d_r, d_g, d_b) 로 변환되어 출력되므로 스캔된 이미지로부터 $(R, G, B)_{scanner}$ 을 직접 알아낼 수 없다. 일반적으로 두 값은 비선형적 관계를 지니므로 이를 고려하여 출력 신호 (d_r, d_g, d_b) 로부터 삼자극치 $(R, G, B)_{scanner}$ 를 알아내야 한다.

식 (1) 또는 식 (2)에 의해 변환 행렬이 산출되면 XYZ를 모르는 임의의 원본색들에 대해서도 XYZ를 추정해 낼 수 있다. 스캔 대상체인 사진 인화지나 인쇄물의 색은 빛을 반사하여 보여지는 것이므로 조명의 종류에 따라서 색이 달라지는데, 일반적으로 D50이 표준 조명으로 사용되고 있다. 따라서 스캐너 색 특성 묘사과정에서는 D50 조명하에서의 삼자극치인 $(X, Y, Z)_{D50}$ 이 추정된다.

2.2. 기준 광원의 차이를 고려한 XYZ 변환

스캔된 이미지를 보여주는 모니터의 표준 백색은 D65이므로, 만일 $(X, Y, Z)_{D50}$ 를 그대로 D65 모니터에 재현시키면 백색의 차이로 모든 색이 달라진다. 예를 들어 D50 하에서의 백색의 삼자극치 $(X=96.42, Y=100, Z=82.49)$ 를 그대로 D65 모니터에 재현시키면, D65 모니터에서의 백색의 삼자극치 $(X=95.04, Y=100, Z=108.89)$ 보다 붉은 기미의 백색으로 보인다. 즉, 컬러 어피어런스(color appearance)가 달라진다. 따라서 D50 하에서의 보여지는 색 그대로 모니터에 재현되기 위해서는 추정된 $(X, Y, Z)_{D50}$ 가 $(X, Y, Z)_{D65}$ 로 변환되어야 한다.

D50과 D65간의 변환은 컬러 어피어런스 모델 중의 하나인 Bradford 매트릭스를 사용하여 이루어진다.^{14,81} 식 (3)은 Bradford 매트릭스를 사용하여 XYZ 삼자극치와 사람 눈의 추상체의 자극량의 관계를 나타낸 것이다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X/100 \\ Y/100 \\ Z/100 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)의 (R, G, B) 는 (X, Y, Z) 를 지닌 색을 눈으로 봤을 때 자극되는 추상체의 자극량이다. 이때 이 자극량은 조명에 따라 달라진다. 예를 들어 세기가 동일하다고 가정하고 조명이 D50에서 D65로 바뀌면 추상체의 자극량은 식 (4)와 같은 비율로 변화된다.

$$\begin{aligned} R_{D65} &= 0.94R_{D50} \\ G_{D65} &= 1.02G_{D50} \\ B_{D65} &= 1.331B_{D50}^{0.98} \end{aligned} \quad (4)$$

먼저 추정된 $(X, Y, Z)_{D50}$ 를 식 (3)에 대입하여 식 (5)와 같이 $(R, G, B)_{D50}$ 을 산출한 후,

$$\begin{bmatrix} R_{D50} \\ G_{D50} \\ B_{D50} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{D50}/100 \\ Y_{D50}/100 \\ Z_{D50}/100 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이를 식 (4)에 대입하여 D65하에서의 추상체 자극치로 환산한다. 식 (3)을 역변환하면 (R, G, B) 에서 (X, Y, Z) 를 구할 수 있는 식 (6)을 얻을 수 있다. 식 (6)에 $(R, G, B)_{D65}$ 을 대입하면 $(X, Y, Z)_{D65}$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{D65}/100 \\ Y_{D65}/100 \\ Z_{D65}/100 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.98699 & -0.14705 & 0.15996 \\ 0.43231 & 0.51836 & 0.04929 \\ -0.00853 & 0.04004 & 0.96849 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{D65} \\ G_{D65} \\ B_{D65} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3. 모니터 입력 신호 예측

식 (6)으로 변환된 $(X, Y, Z)_{D65}$ 를 지닌 색을 모니터에 재현시키기 위해서는 해당 모니터의 특성을 고려하여 입력 신호를 구해야한다. 모니터는 삼원색 빛의 혼합인 가법혼합으로 색이 재현되므로, 모니터에 재현되는 색의 XYZ와 각 원색이 방출하는 빛의 상대 휘도 값(최대 휘도를 1로 규격화 한 값) $(R, G, B)_{display}$ 간에는 다음과 같은 선형적인 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r, \max} & X_{g, \max} & X_{b, \max} \\ Y_{r, \max} & Y_{g, \max} & Y_{b, \max} \\ Z_{r, \max} & Z_{g, \max} & Z_{b, \max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{display} \\ G_{display} \\ B_{display} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $(X_r, Y_r, Z_r)_{\max}$ 는 Red 원색이 최대 방출될 때의 삼자극치를 나타낸다. Green과 Blue에 대해서도 동일하게 표시된다. 이때 식 (7)에서 행렬의 각 항을 $Y_{r, \max} + Y_{g, \max} + Y_{b, \max} = 1.0$ 이 되도록 규격화한 값을 대입하면 좌변의 행렬 요소 XYZ는 100으로 나눈 값이 대입되어야 한다. 따라서 $(X, Y, Z)_{D65}$ 인 색을 재현시키기 위해 필요한 삼원색의 휘도 값을 식 (7)의 역변환으로 표시하면

$$\begin{bmatrix} R_{display} \\ G_{display} \\ B_{display} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r, \max} & X_{g, \max} & X_{b, \max} \\ Y_{r, \max} & Y_{g, \max} & Y_{b, \max} \\ Z_{r, \max} & Z_{g, \max} & Z_{b, \max} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{D65}/100 \\ Y_{D65}/100 \\ Z_{D65}/100 \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 된다. 식 (8)에 의해 구해진 $(R, G, B)_{display}$ 를 방출시킬 수 있는 모니터 입력 신호 $(d_r, d_g, d_b)_{display}$ 는 해당 모니터의 입

력신호와 방출 휘도간의 관계함수로 구할 수 있다. CRT 모니터의 경우 일반적으로 GOG 모델⁹⁾이 사용되고 있다. 예로써 Red 원색에 대한 식을 식 (9)에 나타내었다.

$$d_{r, display} = \left(\frac{d_{r, max}}{k_{g,r}} \right) (R_{display}^{1/\gamma_r} - k_{o,r}), \quad 0 \leq R_{display} \leq 1 \quad (9)$$

여기서 Red 채널이 8비트인 경우 $d_{r, max}$ 는 255가 된다. $k_{g,r}$, $k_{o,r}$, γ_r 은 대상 모니터의 Red 채널의 특성을 나타내는 계인, 오프셋, 그리고 감마값이다.

III. 실험 대상 및 방법

본 연구에서 선정한 스캐너는 EPSON 사의 평판형 컬러 이미지 스캐너인 Expression 1680 모델(제품번호 DB3X000350)로써, 최대 스캔 해상도가 1,600×3,200 ppi인 전문가용 스캐너이다. 대상 이미지를 스캔할 때는 스캐너 프로그램에서 '컬러 보정 사용 안함'으로 설정하고 스캔하였다. 사용된 색표는 전 영역의 색상을 고루 포함하고 있는 AGFA IT8 Reference KIT "C90453xx"이다(그림 1 참조).

IT8은 D50하에서의 $(X, Y, Z)_{D50}$ (본 논문에서는 이를 기준값이라 칭함)가 제시되어 있는 286개 색표를 포함하고 있다. IT8의 1~12열에는 3가지 명도단계로 구분된 다양한 색상과 채도의 색들이 분포되어 있다. 13~15열에는 Cyan, Magenta, Yellow의 농담별 스케일이 분포되고, 17~19열에는 Red, Green, Blue의 농담별 스케일이 분포되어 있다. 또한 20~22열에는 1~19열에 포함되지 않은 유채색들이 분포되어 있다. 또한 IT8의 밑단에는 22단계의 무채색 스케일이 분포되어 있다. 본 실험에서는 1~19열까지의 228색을 기준색(Target color)으로 하고 20~22열까지의 유채색 36색과 22 단계의 무채색을 시험색(Test color)으로 정하였다.

IV. 결 과

4.1. $(X, Y, Z)_{D50}$ 추정 및 $(X, Y, Z)_{D65}$ 변환

먼저 IT8의 색중에 12단계의 밝기를 지닌 무채색(A16,

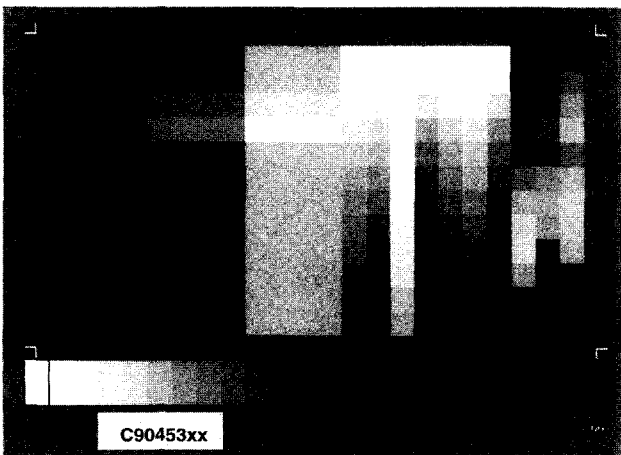


그림 1. AGFA IT8 Reference KIT의 286색.

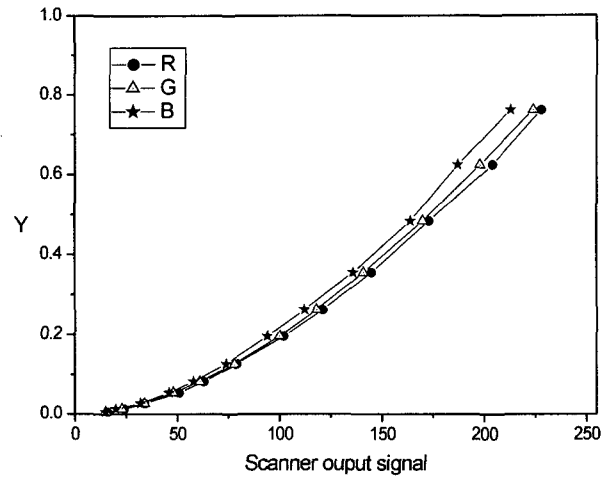


그림 2. IT8 무채색의 값과 스캐너 출력 신호의 관계그래프.

B16,~L16)을 스캔하여, 각 색표의 밝기를 나타내는 자극치와 스캐너 출력 신호 (d_r, d_g, d_b)간의 관계를 구하였다. 그림 2의 x축은 0부터 255까지의 스캐너 출력 신호를 나타내고 y축은 이상적인 검정색의 Y 자극치를 0, 이상적인 백색의 자극치를 1로 규격화한 Y 자극치를 나타내었다. 본 실험에서는 낮은 출력 신호에 대해서도 정확한 스캐너 자극치를 구하기 위해 임의로 스캐너 출력 신호 50을 기준으로 두 구간으로 나누고, 각 구간의 관계를 식 (10)과 같이 2차 함수로 구하였다.

If $d_r > 50$,

$$R_{scanner} = -0.04527 + 0.00144 \times 10^{-4} d_r + 9.16215 \times 10^{-6} d_r^2$$

Else $d_r \leq 50$,

$$R_{scanner} = -0.00767 + 6.75825 \times 10^{-4} d_r + 1.04094 \times 10^{-5} d_r^2$$

If $d_g > 50$,

$$G_{scanner} = -0.05133 + 0.00158 d_g + 9.18078 \times 10^{-6} d_g^2$$

Else $d_g \leq 50$,

$$G_{scanner} = -0.00491 + 4.66782 \times 10^{-4} d_g + 1.56358 \times 10^{-5} d_g^2$$

If $d_b > 50$,

$$B_{scanner} = -0.03569 + 0.00138 d_b + 1.11377 \times 10^{-5} d_b^2$$

Else $d_b \leq 50$,

$$B_{scanner} = -0.00473 + 4.10746 \times 10^{-4} d_b + 1.8619 \times 10^{-5} d_b^2 \quad (10)$$

기준색들을 스캔한 후 각 색표 이미지의 평균 (d_r, d_g, d_b)를 Adobe Photoshop 6.0의 Histogram 기능을 사용하여 측정하고 이를 식 (10)에 대입하여 스캐너 자극치 (R, G, B)_{scanner}를 구하였다. 그런데 이 값들은 각 신호의 최대값을 1로 규격화한 것이므로 식 (1)이나 식 (2)의 좌변에 대입될 기준색의 $(X, Y, Z)_{D50}$ 도 규격화해야 한다. 예로써 기준색 228가지 중 일부 색의 데이터를 표 1에 나타내었다. 첫째 항에는 기준색들의 기준값 $(X, Y, Z)_{D50}$ 을, 둘째 항에는 이들을 D50 조명하에서의 백색의 삼자극치인 $X=96.42, Y=100, Z=82.49$ 로 규격화한 값 $(X_{nor}, Y_{nor}, Z_{nor})$ 를 기록하였다. 또한 셋째 항에는 기준색들의 스캐너 출력 신호 (d_r, d_g, d_b)를, 넷째 항에는 이들을

표 1. IT8 기준색의 기준값($(X, Y, Z)_{D50}$ 와 $(X_{nor}, Y_{nor}, Z_{nor})$)과 스캐너 출력값((d_r, d_g, d_b) , $(R, G, B)_{scanner}$)의 예시

		기준값						스캐너 출력값					
		X_{D50}	Y_{D50}	Z_{D50}	X_{nor}	Y_{nor}	Z_{nor}	d_r	d_g	d_b	$R_{scanner}$	$G_{scanner}$	$B_{scanner}$
1	A1	3.56	2.99	1.99	0.04	0.03	0.02	44	32	29	0.04	0.03	0.02
2	A2	4.47	3.08	1.68	0.05	0.03	0.02	55	29	26	0.06	0.02	0.02
3	A3	5.6	3.34	1.58	0.06	0.03	0.02	65	26	24	0.09	0.02	0.02
4	A4	5.43	3.22	1.67	0.06	0.03	0.02	64	26	25	0.08	0.02	0.02
5	A5	13.56	11.86	7.95	0.14	0.12	0.10	92	69	64	0.17	0.10	0.10
6	A6	16.78	12.47	7.61	0.17	0.12	0.09	112	65	62	0.23	0.09	0.09
7	A7	17.9	11.35	6.05	0.19	0.11	0.07	124	57	54	0.27	0.07	0.07
8	A8	19.38	11.07	5.2	0.20	0.11	0.06	135	51	49	0.32	0.05	0.06
9	A9	43.19	42.32	31.29	0.45	0.42	0.38	170	151	141	0.46	0.40	0.38
10	A10	45.5	42.4	32.13	0.47	0.42	0.39	180	149	143	0.51	0.39	0.34
...													
281	GS17	3.66	3.82	2.97	0.04	0.04	0.04	41	40	38	0.04	0.04	0.04
282	GS18	2.57	2.67	2.09	0.03	0.03	0.03	34	33	31	0.03	0.03	0.03
283	GS19	1.8	1.88	1.42	0.02	0.02	0.02	28	27	24	0.02	0.02	0.02
284	GS20	1.21	1.28	0.98	0.01	0.01	0.01	23	22	20	0.01	0.01	0.01
285	GS21	1.04	1.07	0.85	0.01	0.01	0.01	21	20	17	0.01	0.01	0.01
286	GS22	0.85	0.87	0.73	0.01	0.01	0.01	19	18	16	0.01	0.01	0.01

식 (10)에 대입하여 구한 $(R, G, B)_{scanner}$ 를 기록하였다. 본 실험에서는 식 (2)의 좌변에 228 색의 $(X_{nor}, Y_{nor}, Z_{nor})$ 를 대입하고, 우변에 해당 색들의 $(R, G, B)_{scanner}$ 를 대입하였다. 이때 변환 행렬은 Origin 6.1 Software(OriginLab Co., Northampton, USA)의 Multiple Regression 기능을 사용하여 표 2와 같이 산출되었다. 산출된 변환행렬을 다시 식 (2)에 대입하여 계산된 $(X_{nor}, Y_{nor}, Z_{nor})'$ 를 표 3의 추정값의 첫째 항에 나타내었다. 이

는 규격화된 값이므로 다시 D50 조명하에서의 백색의 삼자극치인 $X=96.42, Y=100, Z=82.49$ 를 곱하여 계산된 D50 조명하에서의 기준색들의 삼자극치 $(X, Y, Z)'_{D50}$ 을 추정값의 둘째 항에 나타내었다.

표 3의 마지막 항에는 추정값 $(X, Y, Z)'_{D50}$ 이 기준값 $(X, Y, Z)_{D50}$ 에 얼마나 근접했는지를 평가하기 위해 두 값의 ΔE_{uv}^* 색차를 구하였다. ΔE_{uv}^* 는 두 값의 XYZ를 식 (11)에 의해 $L^*u^*v^*$ 값

표 2. EPSON Expression 1680 스캐너의 변환행렬 계수

	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	R-Square
x	-0.0011	0.6263	0.3110	0.1007	0.4383	-0.1088	0.0139	-0.2602	-0.1782	0.0554	0.99978
y	-0.0008	0.2353	0.7781	0.0163	0.2500	0.1336	-0.0528	-0.1195	0.1992	-0.0475	0.99985
z	0.0011	0.0387	-0.0359	0.9672	0.0391	-0.1981	0.1105	-0.0939	0.0837	0.0746	0.99979

표 3. IT8 기준색의 추정값($(X_{nor}, Y_{nor}, Z_{nor})'$, $(X, Y, Z)'_{D50}$)과 색차 ΔE_{uv}^* 의 예시

		추정값						ΔE_{uv}^*
		X_{nor}'	Y_{nor}'	Z_{nor}'	X_{D50}'	Y_{D50}'	Z_{D50}'	
1	A1	0.04	0.03	0.02	3.43	2.95	1.97	1.98
2	A2	0.05	0.03	0.02	4.40	3.02	1.69	1.17
3	A3	0.06	0.03	0.02	5.70	3.22	1.54	2.35
4	A4	0.06	0.03	0.02	5.57	3.17	1.64	1.78
5	A5	0.14	0.12	0.10	13.64	11.74	8.05	1.89
6	A6	0.17	0.12	0.09	16.82	12.20	7.71	2.99
7	A7	0.19	0.11	0.07	18.02	11.24	6.01	2.34
8	A8	0.20	0.11	0.06	19.32	10.69	5.18	4.09
9	A9	0.44	0.42	0.37	42.62	41.62	30.82	0.74
10	A10	0.47	0.42	0.38	44.89	41.85	31.61	0.43
...								
281	GS17	0.04	0.04	0.04	3.68	3.88	3.11	0.93
282	GS18	0.03	0.03	0.03	2.62	2.75	2.16	0.61
283	GS19	0.02	0.02	0.02	1.79	1.89	1.36	0.67
284	GS20	0.01	0.01	0.01	1.19	1.26	0.97	0.15
285	GS21	0.01	0.01	0.01	0.96	1.028	0.70	1.33
286	GS22	0.01	0.01	0.01	0.75	0.81	0.62	1.13

표 4. 기준값과 추정값의 색차(기준색의 색차와 시험색의 색차 비교)

	1~19열 228색 (기준색)				20~22열 36색 시험색)				GS1~GS22열 22색(시험색)			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
ΔE_{uv}^*	1.47	1.11	0.13	6.65	1.51	1.18	0.22	5.47	0.90	0.54	0.15	2.36

으로 바꾼 후 식 (12)의 식으로 계산되었다.^[10]

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 & \text{for } Y/Y_n > 0.008856 \\
 L^* &= 903(Y/Y_n) & \text{for } Y/Y_n \leq 0.008856 \\
 u^* &= 13L^* (u' - u'_n), & v^* &= 13L^* (v' - v'_n)
 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 $u' = 4X/(X + 15Y + 3Z)$, $v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z)$ 이고, Y_n , u'_n , v'_n 은 기준 백색의 Y, u, v 이다.

$$\Delta E_{uv}^* = [(L_1^* - L_2^*)^2 + (u_1^* - u_2^*)^2 + (v_1^* - v_2^*)^2]^{1/2} \tag{12}$$

기준색으로 사용된 IT8의 1~19열의 228색에 대한 평균 색차와 두 그룹의 시험색에 대한 평균 색차를 표 4에 나타내었다. 228가지 기준색의 색차(ΔE_{uv}^*)는 평균 1.47이고 유채색 36가지(20~22열) 시험색에 대한 색차는 평균 1.51, 무채색인 22가지(GS1~GS22) 시험색에 대한 색차는 평균 0.90을 보였다. 이 결과로부터 임의의 시험색에 대해서도 기준색과 유사한 색차로 $(X, Y, Z)_{D50}$ 이 추정될 수 있음이 입증되었다. D65 하에서의 컬러 어피어런스가 그대로 모니터에 재현될 수 있도록 모

표 5. sRGB 모니터의 삼원색과 백색의 CIE x, y, z와 CIE XYZ

	Red	Green	Blue	White (D65)
x	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127
y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290
z	0.0300	0.1000	0.7900	0.3583
X	0.4124	0.3576	0.1805	0.9505
Y	0.2126	0.7151	0.0721	1
Z	0.0193	0.1192	0.9505	1.0891

표 6. 기준값과 추정값에 대한 $(X, Y, Z)_{D65}$ 와 $(d_r, d_g, d_b)_{display}$ 의 비교

		기준값						추정값					
		X_{D65}	Y_{D65}	Z_{D65}	$d_{r,display}$	$d_{g,display}$	$d_{b,display}$	X_{D65}'	Y_{D65}'	Z_{D65}'	$d_{r,display}'$	$d_{g,display}'$	$d_{b,display}'$
1	A1	3.46	2.96	2.63	65	42	43	3.34	2.95	2.60	63	43	42
2	A2	4.31	3.02	2.23	81	34	38	4.24	3.02	2.23	80	35	38
3	A3	5.37	3.25	2.10	95	25	37	5.47	3.22	2.05	96	22	37
4	A4	5.22	3.13	2.22	93	24	39	5.35	3.17	2.18	95	23	38
5	A5	13.19	11.76	10.50	122	88	87	13.28	11.64	10.63	123	86	87
6	A6	16.23	12.28	10.08	146	79	85	16.28	12.01	10.21	147	76	86
7	A7	17.22	11.08	8.04	159	59	76	17.33	10.97	7.98	160	57	76
8	A8	18.59	10.74	6.93	170	43	70	18.54	10.36	6.91	171	36	71
9	A9	42.27	42.18	41.30	190	169	165	41.71	41.48	40.68	189	168	163
10	A10	44.53	42.21	42.44	201	165	167	43.92	41.66	41.75	200	164	166
...													
281	GS17	3.60	3.82	3.92	55	55	53	3.63	3.88	4.10	54	56	54
282	GS18	2.53	2.67	2.76	46	45	44	2.57	2.75	2.85	46	46	45
283	GS19	1.77	1.88	1.87	38	37	35	1.75	1.89	1.79	37	38	34
284	GS20	1.19	1.28	1.29	29	30	28	1.17	1.26	1.28	29	30	28
285	GS21	1.02	1.07	1.12	27	26	26	0.94	1.03	0.93	25	26	22
286	GS22	0.83	0.87	0.96	24	23	24	0.74	0.81	0.80	21	23	21

니터에 재현될 삼자극치 $(X, Y, Z)_{D65}$ 는 식 (3)~(6)을 사용하여 변환되었다.

4.2. sRGB 입력신호 예측

본 실험에서는 인터넷 표준인 sRGB 모니터를 대상으로 모니터 입력 신호를 구하였다. sRGB 모니터의 삼원색과 백색의 CIE x, y 색도 좌표는 표 5와 같이 지정되어 있다.^[11]

표 5에 나타난 삼원색의 XYZ를 식 (8)의 행렬계수에 대입하면 디스플레이 될 각 원색의 상대 휘도값이 식 (13)과 같이 표현되고,

$$\begin{bmatrix} R_{display} \\ G_{display} \\ B_{display} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7151 & 0.0721 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{D65}/100 \\ Y_{D65}/100 \\ Z_{D65}/100 \end{bmatrix} \tag{13}$$

식 (13)의 역행렬을 계산하면 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} R_{display} \\ G_{display} \\ B_{display} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.24 & -1.54 & -0.50 \\ -9.69 & 1.88 & 0.04 \\ 5.56 & -2.04 & 1.06 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{D65}/100 \\ Y_{D65}/100 \\ Z_{D65}/100 \end{bmatrix} \tag{14}$$

이때 $R_{display}$ 의 범위는 식 (15)와 같고 $G_{display}$, $B_{display}$ 도 같은 범위를 갖는다.

$$\begin{aligned}
 \text{If } R_{display} < 1, & \text{ then } R_{display} = 1 \\
 \text{If } R_{display} < 0, & \text{ then } R_{display} = 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

모니터에서 $(R, G, B)_{display}$ 와 입력신호 $(d_r, d_g, d_b)_{display}$ 는 식

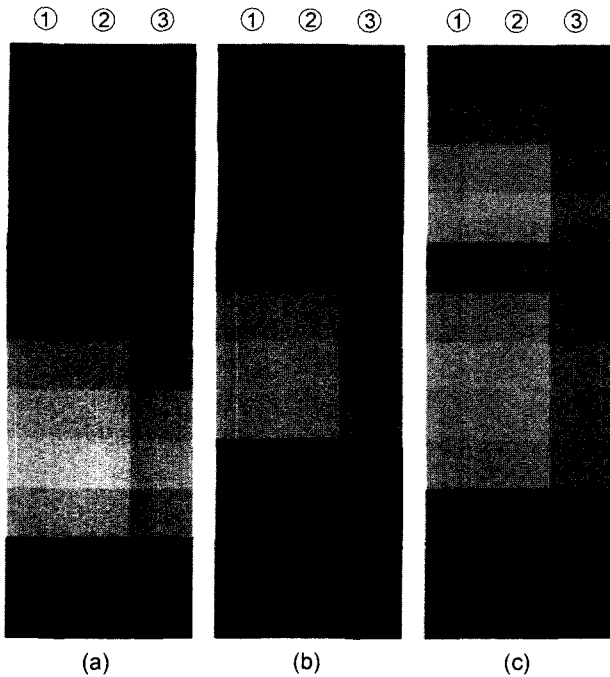


그림 3. IT8 20~22열 시험색의 RGB 디지털 신호를 모니터에 디스플레이한 결과 ① 목표값 $(d_r, d_g, d_b)'_{display}$, ② 보정값 $(d_r, d_g, d_b)'_{display}$, ③ 스캐너 출력값 (d_r, d_g, d_b) : (a) 20열, (b) 21열, (c) 22열.

(9)와 같이 비선형적인 관계를 지닌다. 식 (9)에서 이상적인 모니터의 경우 $k_{g,r}=1, k_{o,r}=0, \gamma=2.2$ 이지만, 실제 모니터에서는 $k_{o,r} \neq 0$ 이므로 sRGB 모니터는 $k_{g,r}=1/1.055, k_{o,r}=0.055/1.055, \gamma=2.4$ 로 정의되어 있다.^[11] 예를 들어 $d_{r,display}$ 는 식 (16)과 같이 구해지고 $d_{g,display}, d_{b,display}$ 도 같은 식이 적용된다.

$$\begin{aligned} \text{If } R_{display} > 0.00304, \quad d_{r,display} &= 255(1.055R_{display}^{1/2.4} - 0.055) \\ \text{Else } R_{display} \leq 0.00304, \quad d_{r,display} &= 255(12.92R_{display}) \end{aligned} \quad (16)$$

표 6에 기준값 XYZ로부터 산출된 $(d_r, d_g, d_b)_{display}$ 와 추정값 $(XYZ)'$ 으로부터 산출된 $(d_r, d_g, d_b)'_{display}$ 를 나타내었다. 여기서 $(d_r, d_g, d_b)_{display}$ 는 목표값이 되고, $(d_r, d_g, d_b)'_{display}$ 는 보정값이 된다. 두 값이 일치할수록 정확한 색보정이 이루어진 것이다. 그림 3에 IT8 20~22열 시험색에 대한 목표값 $(d_r, d_g, d_b)_{display}$ 와 보정값 $(d_r, d_g, d_b)'_{display}$, 그리고 스캐너 출력값 (d_r, d_g, d_b) 를 동일 화면에 디스플레이한 이미지를 나타내었다.

V. 결 론

EPSON Expression 1680 스캐너로 스캔된 원본의 색을 그대로 모니터에 디스플레이하였다. 색보정 알고리즘은 스캐너의 색 특성 묘사를 통한 원본색의 XYZ 추정, 기준 광원의 차이를 고려한 XYZ 변환, 그리고 XYZ와 RGB간의 색공간 변환으로 구성되었다. 특히 색 특성 묘사 과정에서 스캐너 출력 신호 (d_r, d_g, d_b) 와 스캐너 자극치 $(R, G, B)_{scanner}$ 간의 비선형적

관계를 두 구간으로 나누어 묘사하고 다중 회귀분석법을 사용하여 3×10 의 변환행렬을 산출함으로써 추정값 $(X, Y, Z)'_{ds0}$ 의 정확도를 높였으며, 이를 디스플레이시킬 수 있는 모니터 입력 신호 $(d_r, d_g, d_b)'_{display}$ 는 sRGB 표준모니터를 대상으로 구하였다.

IT8의 228가지 기준색(1~19열)을 사용하여 EPSON Expression 1680의 변환행렬을 구하고, 이를 적용하여 다시 228 기준색의 $(X, Y, Z)'_{ds0}$ 를 추정해 본 결과, 기준값과의 평균 색차가 $1.47\Delta E_{uv}^*$ 로 나타났다. 또한 변환행렬 산출시 사용되지 않았던 36가지의 유채색(20~22열)과 22가지의 무채색(GS1~GS22)을 시험색으로 하여 동일한 변환행렬을 적용해본 결과, 평균 색차가 각각 $1.51\Delta E_{uv}^*$ 와 $0.90\Delta E_{uv}^*$ 이었다. 여러 색들로 이루어진 복합 이미지(complex image)에 대해 눈으로 식별되기 시작하는 평균 색차가 약 $2.0\Delta E_{uv}^*$ ^[12]임을 고려하면 매우 만족할 만한 결과를 얻었다고 할 수 있다. 이로써 산출된 EPSON Expression 1680 스캐너의 변환행렬은 전 영역의 색에 대해 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 스캐너의 노후 정도, 외부 전압의 변동 등에 따라 색 특성이 변화되므로 정기적인 색 특성 묘사가 필요하다. IT8 20~22열 시험색에 대해 구해진 보정값 $(d_r, d_g, d_b)'_{display}$ 와 목표값 $(d_r, d_g, d_b)_{display}$ 을 모니터 화면에 디스플레이해본 결과 거의 일치함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제(R05-2000-000-00034-0)지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한규서, “기준색 고정 선형 변환 방법과 칼라 스캐너-프린터에의 응용,” 석사학위논문, 인하대학교 대학원, 1997.
- [2] 김대회, “그레이 밸런스가 고려된 구간별 선형변환 방법을 이용한 스캐너 RGB로부터 기기 독립적인 칼라로의 변환,” 석사학위논문, 인하대학교 대학원, 1998.
- [3] 김나나, “분할된 색공간에서 비선형 다중회귀분석법을 이용한 스캐너 캘리브레이션에 관한 연구,” 석사학위논문, 부경대학교 대학원, 2001.
- [4] Roy S. Berns, *Principles of Color Technology* (JOHN WILEY & SONS, USA, 2000), pp. 215-223.
- [5] Guowei Hong, M.Ronnier Luo, and Peter A. Rhodes, “A Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling,” *Color research and application*, pp. 76-84, 2000.
- [6] Jon Y. Hardeberg, Lars Seime, and Trond Skogstad, “Colorimetric characterization of projection displays using a digital colorimetric camera,” To appear at EI2003, Santa Clara, CA, USA, 2003.
- [7] Jon Y. Hardeberg, “Color Conversion for Desktop Scanners,” In *Piksel'n*, the quarterly magazine of the Norwegian Society for Image Processing and Pattern Recognition, NOBIM, vol. 18, no. 1, 2001.
- [8] Mark D. Fairchild, *Color Appearance Models* (Addison Wesley), pp. 378-380.

- [9] Roy S. Berns, Ricardo J. Motta, Mark E. Gorzynski, "CRT Colorimetry. Part1: Theory and Practice," Color research and application, vol 18, no. 5, pp. 299-314, 1993.
- [10] R.W.G. Hunt, Measuring color (JOHN WILEY & SONS, UK, 1989), pp. 60-68.
- [11] International Electrotechnical Commission, Technical Committee 100, Audio, Video and multimedia systems and equipment, Project team 61966: color measurement and management in multimedia systems and equipment, Part 2.1: Default RGB colour space-sRGB, pp. 6., IEC 1998.
- [12] Mike Stokes, Mark D. Fairchild, and Roy S. Berns, "Precision Requirement for Digital Color Reproduction," ACM Transactions on Graphics, vol. 11, no. 4, pp. 406-422, 1992.

A study on the color management between scanner and monitor using multiple regression method

Jin-Hee Park, Hong-Suk Kim, and Seung-Ok Park

Color Science Laboratory, Department of Physics, Daejin University, Pocheon 480-711, KOREA

[†]E-mail: colorscience@yahoo.co.kr

(Received April 3, 2003, Revised manuscript July 9, 2003)

The purpose of this study is to recover the CIE XYZ tristimulus values of original colors from scanner output signals, and to reproduce true colors on the monitor. The process of this study is composed of three steps; scanner characterization, chromatic adaptation transformation, and color space transformation between and sRGB. Especially, in the process of recovery, scanner stimuli were obtained accurately by dividing the non-linear photometric response curve into two parts. As the result of test to EPSON Expression 1680 scanner, the average color difference between true and recovered XYZ for 228 target colors, 22 test neutrals, and 36 test colors were 1.49, 0.97, and 1.42 ΔE_{uv}^* , respectively. With the transformation from illuminant D50 to illuminant D65, the input signals to sRGB monitor were predicted. Finally, it could be found that displayed colors with predicted input signals were very consistent with true colors.

OCIS Codes : 330.1690. 330.1710.