

디지털 카메라 색 특성분석을 통한 sRGB 이미지 생성

유종우[†] · 김홍석 · 박승옥

대진대학교 물리학과 색채과학연구소
Ⓣ 480-711 경기도 포천시 선단동

박철호 · 박진희

디지털 색채연구소
Ⓣ 480-711 경기도 포천시 선단동 대진대학교 창업보육센터 413호

(2003년 12월 4일 받음, 2004년 3월 17일 수정본 받음)

고화질 디지털 카메라가 널리 보급되면서 디지털 카메라는 단순한 영상 기록 장치가 아닌 정보 저장 매체로서 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그러나 디지털 카메라의 분광 감도가 표준 관측자의 색 일치 함수와 다르기 때문에 카메라로는 색이 정확하게 측정될 수 없다. 본 연구는 카메라 이미지를 피사체의 색 정보를 지니고 있는 sRGB 이미지로 변환하는 방법에 관한 것이다. 디지털 카메라의 출력 신호와 CIE 삼자극치간의 변환 행렬은 Macbeth ColorChecker 24색을 기준 색으로 하여 다중 회귀법을 사용하여 구하였다. 변환 행렬을 이용하여 카메라의 출력 신호로부터 피사체의 실제 색을 찾아내어 이상적인 sRGB 표준 모니터에 정확하게 나타낼 수 있는 RGB 데이터로 변환하였다. Kodak DC220 디지털 카메라로 생성된 Macbeth ColorChecker의 sRGB 이미지와 실제 색과의 평균 색차는 2.1 ΔE_{ab}^* 로, 시험 색표로 사용된 IT8 Reference KIT(286색)의 sRGB 이미지와 실제 색과의 평균 색차는 4.6 ΔE_{ab}^* 로 계산되었다.

주제어 : digital camera characterization, multiple regression method, sRGB.

I. 서 론

디지털 카메라는 최근 들어 저가격화·고화질화를 이루면서 일반인들에게 대량 보급되어 사용량이 급증하고 있다. 디지털 이미지가 편집 및 수정, 그리고 저장 및 전송이 손쉽게 이루어질 수 있어 일상생활 뿐 아니라 결혼과 같은 특별한 행사 촬영에도 디지털 카메라가 사용되고 있다. 최근에는 예술 작품의 기록이나 농작물 작황 촬영 등에도 디지털 카메라가 사용되고 있고, 디지털 카메라로 촬영된 영상을 전송받아 환자를 진찰하는 원격 진료나 원격 수술까지도 이루어지고 있다. 이에 따라 디지털 카메라는 피사체를 아름답게 기록하는 기능 뿐 아니라 사실을 기록하는 기능을 갖추어야 한다.

그러나 현재 디지털 카메라로 촬영된 이미지를 컴퓨터로 옮겨 모니터로 보면 피사체의 색과 다르고 이를 프린터나 인화기로 출력하면 화면의 색과도 크게 다르다. 뿐만 아니라 사용되는 모니터나 프린터와 같은 출력 장치의 제조사나 모델에 따라 그 차이가 크게 달라진다. 그 첫째 이유는 디지털 카메라의 빛 감지 특성이 사람 눈과 동일하지 않기 때문이다. 즉, 디지털 카메라는 사람 눈이 보는 색이 아닌 카메라가 보는 색을 기록한다. 그리고 빛 감지 특성이 서로 다른 두 대의 카메라는 동일 색에 대해서도 서로 다른 양의 데이터를 기록한다. 두 번째 이유는 카메라가 기록한 데이터를 색으로 보여주는 출력 장치의 색 재현 특성이 장치마다 다르

기 때문이다.

근래에는 이러한 색 불일치 문제를 해결하기 위해 이미지가 만들어진 입력 장치의 프로파일 태그를 이미지에 포함시키는 방법을 사용하고 있다.^[13-15] 그래픽 프로그램에서 이미지를 열 때 입력 장치 프로파일을 사용하여 피사체의 원래 색을 추정해 내고 이미지 출력 장치로 일치된 색이 보이도록 이미지 데이터를 출력 장치 프로파일에 맞게 변환시켜서 출력시키는 색 관리(color management)^[14]가 이루어지고 있다. 그러나 디지털 이미지가 만들어지고 보여지는 장치들의 종류나 제품의 특성이 다양하여 일일이 프로파일을 포함하고 전송하는 것이 번거로워 최근에는 sRGB 프로파일로 통일시키려는 시도가 이루어지고 있다. sRGB 색공간^[15]은 HP사와 MS사 등의 디지털 색채 관련 산업체가 모여서 제정한 것으로 XYZ색 공간과 1:1 대응되는 장치 독립적 색 공간이며, sRGB 이미지는 sRGB 색공간에서 원래의 색을 정확하게 나타낼 수 있도록 데이터가 저장된 이미지를 칭한다. 현재 HP 스캐너는 스캐너 특성에 무관하게 sRGB 이미지가 출력되고, HP 프린터는 sRGB 이미지가 입력될 경우 원래 색에 가깝게 프린트되도록 설계되어 있다. 그러나 sRGB 이미지를 출력하는 디지털 카메라는 아직 판매되고 있지 않은데, 최근 들어 스캐너, 디지털 카메라와 같은 입력 장치의 색 보정 연구가 국내외적으로 활발히 이루어지고 있다.^[1-5,10] 본 논문에서는 다중 회귀법을 사용하여 디지털 카메라의 색 특성을 분석함으로써 카메라 출력 이미지에서 피사체의 실제 색 XYZ를 찾아내어 이로부터 sRGB 이미지를 생성하였다.

[†]E-mail: randghiph@hotmail.com

II. sRGB 이미지 생성 과정

디지털 카메라 센서와 사람 눈의 파장별 감도특성이 서로 다르므로 카메라 삼자극치 RGB는 표준 관측자 삼자극치 XYZ와 동일하지 않다. 그러나 두 값들은 관련성을 지니고 있으므로 식 (1)과 같이 변환 매트릭스 T를 사용하여 표현될 수 있다. 만약 RGB와 XYZ가 동일하다면 T는 고유 매트릭스 (Identity matrix)가 된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

하지만 카메라 삼자극치 RGB는 직접 측정할 수 없는 양이므로 카메라 출력 이미지의 디지털 신호 d_r, d_g, d_b 로부터 구해져야 한다. 광센서의 출력은 입력되는 빛의 세기에 비례하지만, 디지털 카메라의 경우 감마보정 회로를 거쳐 나오는 디지털 신호 d_r, d_g, d_b 는 카메라 삼자극치 RGB와 비선형적 관계를 이룬다. d_r, d_g, d_b 와 RGB의 관계는 Y자극치를 알고 있는 여러 밝기 단계의 무채색 색표들을 사용하여 구해질 수 있다.

식 (1)의 T는 카메라의 색 특성에 따라 다른데, 이는 XYZ를 알고 있는 기준 색표들(Target colors)을 대상으로 알아낼 수 있다. 즉, 기준 색표들의 고유한 XYZ와 촬영 이미지의 d_r, d_g, d_b 로부터 유추된 RGB를 식 (1)의 양변에 대입하고 양변이 일치되도록 다중 회귀분석법으로 T를 산출한다. 산출된 T를 식 (1)에 대입하면 임의의 시험 색표들(Test colors)에 대해서도 촬영 이미지로부터 피사체의 XYZ를 추정해 낼 수 있다.

일반적으로 피사체의 조명은 D50 광원을 표준으로 하고 있으므로 앞으로는 식 (1)에 의해 추정된 XYZ를 $X'_{D50}Y'_{D50}Z'_{D50}$ 으로 표시한다. 하지만 카메라에서 생성된 이미지를 화면으로 보여줄 sRGB 표준 모니터의 기준 백색은 D65이므로 동일한 컬러 어피어런스를 느낄 수 있는 $X'_{D65}Y'_{D65}Z'_{D65}$ 로 변환되어야 한다. 서로 다른 두 광원 하에서 동일한 컬러 어피어런스를 느낄 수 있는 삼자극치의 변환은 컬러 어피어런스 모델 중의 하나인 Bradford 행렬을 사용하여 식 (2)와 같이 표현 되어진다.^[6,8,9]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Destinate} = M_{BFD}^{-1} \begin{bmatrix} r_{D-w}/r_{S-w} & 0 & 0 \\ 0 & g_{D-w}/g_{S-w} & 0 \\ 0 & 0 & b_{D-w}/b_{S-w} \end{bmatrix} M_{BFD} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Source} \quad (2)$$

여기서,

$$M_{BFD} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix},$$

$$M_{BFD}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.9870 & -0.1471 & 0.1600 \\ 0.4323 & 0.5185 & 0.0493 \\ -0.0085 & 0.0400 & 0.9685 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r_{S-w} \\ g_{S-w} \\ b_{S-w} \end{bmatrix} = M_{BFD} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Source},$$

$$\begin{bmatrix} r_{D-w} \\ g_{D-w} \\ b_{D-w} \end{bmatrix} = M_{BFD} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Destinate} \quad \text{이다.}$$

$r_{D-w}, g_{D-w}, b_{D-w}$ 는 변환하려고 하는 광원에 대한 눈의 감응 정도이고 $r_{S-w}, g_{S-w}, b_{S-w}$ 는 변환 이전 광원에 대한 눈의 감응 정도이다.

식 (2)를 사용하여 변환된 $X'_{D65}Y'_{D65}Z'_{D65}$ 를 모니터 화면에 색으로 나타내기 위해서는 사용 모니터의 특성을 고려하여 디지털 입력 신호 $d_{r,sRGB}, d_{g,sRGB}, d_{b,sRGB}$ 가 결정되어야 한다. 이를 위해 먼저 화면에 $X'_{D65}Y'_{D65}Z'_{D65}$ 를 나타내기 위해 모니터에서 방출되어야 하는 삼원색 각각의 상대 휘도 값(최대 휘도를 1로 규격화 한 값) $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB}$ 는 sRGB 표준 모니터의 경우 식 (3-1)에 의해 산출된다.^[15]

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7151 & 0.0072 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X'_{D65} / 100 \\ Y'_{D65} / 100 \\ Z'_{D65} / 100 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

또한 식 (3-1)로 계산된 $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB}$ 을 방출시킬 수 있는 모니터 디지털 입력신호 $d_{r,sRGB}, d_{g,sRGB}, d_{b,sRGB}$ 는 sRGB 표준 모니터의 경우 식 (3-2)와 같이 정의된다.^[6,15]

$$R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \leq 0.00304 \text{인 경우}$$

$$\begin{aligned} d_{r,sRGB} &= 255(12.92 \times R_{sRGB}) \\ d_{g,sRGB} &= 255(12.92 \times G_{sRGB}) \\ d_{b,sRGB} &= 255(12.92 \times B_{sRGB}) \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} > 0.00304 \text{인 경우}$$

$$\begin{aligned} d_{r,sRGB} &= 255(1.055 \times R_{sRGB}^{1/2.4}) - 0.055 \\ d_{g,sRGB} &= 255(1.055 \times G_{sRGB}^{1/2.4}) - 0.055 \\ d_{b,sRGB} &= 255(1.055 \times B_{sRGB}^{1/2.4}) - 0.055 \end{aligned}$$

III. 실험 장치 및 기준 색표

그림 1과 같이 D50 형광등이 설치된 GretagMacbeth PROOFLITE Viewing Booth(31"×114"×83")의 내부 벽면에 기준 색표인 Macbeth ColorChecker를 붙이고, 이를 화이트 발란스가 "AUTO"로 설정된 Kodak DC220 디지털 카메라로 촬영하였다(그림 1 참조). Macbeth ColorChecker는 6단계 무채색과 색역 전반에 고루 분포되어 있는 18색의 유채색으로 구성되어 총 24색이며 무광택 페인트로 채색되어 있다(그림 2 참조). 디지털 카메라로 촬영된 Macbeth ColorChecker 이미지의 각 픽셀의 디지털 신호 d_r, d_g, d_b 는 그래픽 프



그림 1. D50 광원 하에서 기준 색표 Macbeth ColorChecker의 촬영 장면.

1.DS	2.LS	3.BS	4.F	5.BF	6.BG
7.O	8.PB	9.MR	10.P	11.YG	12.OY
13.B	14.G	15.R	16.Y	17.M	18.C
19.W	20.N8	21.N6.5	22.N5	23.N3.5	24.Bk

그림 2. Macbeth ColorChecker 24색.

로그랩인 포토샵의 히스토그램 기능을 사용하여 추출하였다. 실제로는 사용된 D50 형광등의 분광분포나 균일도가 표준 광원 D50과는 차이가 있을 수 있으나, 광원 부스 크기에 비해 상대적으로 작은 ColorChecker(3.3"×2.3")를 사용함으로써 광원의 불균일도를 최소화 시켰으며 분광분포의 차이는 무시하였다. 이에 따라 기준 색표 24색에 대한 표준광원 D50 하에서의 삼자극치 $X_{D50}Y_{D50}Z_{D50}$ 와 표준광원 D65 하에서의 삼자극치 $X_{D65}Y_{D65}Z_{D65}$ 는 분광광도계(CM 3600d, Minolta)를 사용하여 측정하였다.

IV. 결과 및 분석

표 1에 기준 색표 24색에 대한 $X_{D50}Y_{D50}Z_{D50}$, $d_r d_g d_b$ 그리고 $d_{r,sRGB}$ $d_{g,sRGB}$ $d_{b,sRGB}$ 를 나타내었다. $X_{D50}Y_{D50}Z_{D50}$ 은 분광광도계로 측정된 표준 광원 D50 하에서의 기준 색표의 삼자극치를 나타내고, $d_r d_g d_b$ 는 카메라 출력 이미지에서 동일 색으로 간주되는 영역에서 추출된 디지털 신호의 평균값이며, $d_{r,sRGB}$ $d_{g,sRGB}$ $d_{b,sRGB}$ 는 최종적으로 변환된 sRGB 이미지의 디지털 신호 값이다.

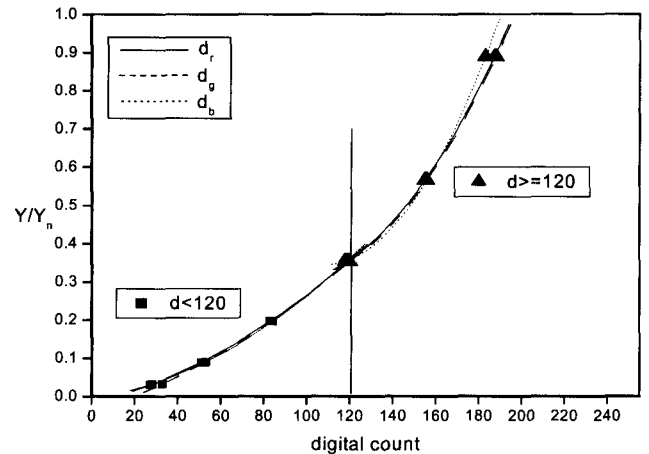


그림 3. 6단계 무채색의 Y/Y_n 과 카메라 출력 이미지의 디지털 신호 간의 관계 그래프.

24색의 $d_r d_g d_b$ 로부터 카메라 삼자극치 RGB를 구하기 위하여 무채색 6단계의 실제 세기를 나타내는 Y자극치의 Y/Y_n 에 대한 $d_r d_g d_b$ 의 그래프를 그림 3에 나타내었다. 이들의 비선형적인 관계를 정확하게 분석하기 위하여 두 영역으로 나누어 각 구간의 관계식을 식 (4)와 같이 2차 다항식으로 구하였다.

$d_r d_g d_b \geq 120$ 인 경우

$$\begin{aligned} R &= 0.7863 - 1.1 \times 10^{-2} d_r + 6.1 \times 10^{-5} d_r^2 \\ G &= 0.7973 - 1.1 \times 10^{-2} d_g + 6.2 \times 10^{-5} d_g^2 \\ B &= 1.4965 - 2.1 \times 10^{-2} d_b + 9.8 \times 10^{-5} d_b^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$d_r d_g d_b < 120$ 인 경우

$$\begin{aligned} R &= -0.0186 + 1.3 \times 10^{-3} d_r + 1.5 \times 10^{-5} d_r^2 \\ G &= -0.0411 + 1.7 \times 10^{-3} d_g + 1.2 \times 10^{-5} d_g^2 \\ B &= -0.0048 + 8.4 \times 10^{-4} d_b + 1.9 \times 10^{-5} d_b^2 \end{aligned}$$

6단계의 무채색에 대해 산출된 식 (4)에 유채색 18색의 $d_r d_g d_b$ 를 대입하면 이에 대응하는 카메라 삼자극치 RGB를 구할 수 있다. 식 (1)의 좌항에 기준 색표 24색의 $\frac{X_{D50}}{X_{D50,n}} \frac{Y_{D50}}{Y_{D50,n}} \frac{Z_{D50}}{Z_{D50,n}}$ 을 ($X_{D50,n} Y_{D50,n} Z_{D50,n}$: 표준광원 D50의 삼자극치) 대입하고 우항에 대응되는 카메라 삼자극치 RGB를 대입한 후, 다중 회귀분석법을 이용하면 변환행렬 T를 산출할 수 있다. 본 실험에서는 카메라 삼자극치 RGB간의 상호 의존성을 고려하여 $1, R, G, B, RG, GB, BR, R^2, G^2, B^2$ 의 항을 대입하여 식 (5)와 같이 3×10 의 변환 행렬을 산출하였다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0058 & 0.4544 & 0.3506 & 0.0936 & 0.2752 & 0.109 & -0.1683 & -0.106 & -0.1993 & 0.1994 \\ 0.0072 & 0.2454 & 0.6242 & 0.0247 & 0.2017 & 0.0872 & -0.1464 & -0.0881 & -0.101 & 0.16 \\ 0.0023 & 0.0312 & 0.0459 & 0.8623 & 0.0472 & 0.1268 & -0.1522 & -0.0316 & 0.0275 & 0.0498 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R \\ G \\ B \\ RG \\ GB \\ BR \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

표 1. 기준 색표 24색의 $X_{D50}Y_{D50}Z_{D50}$ 측정값과 카메라 출력 이미지의 디지털 신호, 그리고 sRGB 이미지의 디지털신호

sample	기준 색표 측정값			카메라 출력 이미지			sRGB 이미지		
	X_{D50}	Y_{D50}	Z_{D50}	d_r	d_g	d_b	$d_{r,display}$	$d_{g,display}$	$d_{b,display}$
Dark Skin	11.63	10.06	4.84	81	51	41	118	83	68
Light skin	38.27	34.59	18.84	163	117	96	201	152	130
Blue sky	16.83	18.08	25.58	59	85	119	96	123	161
Foriage	10.6	13.23	5.7	58	77	43	91	112	69
Blue flower	24.14	22.84	32.85	97	92	137	138	131	173
Bluish green	30.67	41.79	35.14	72	154	136	91	191	175
Orange	39.62	31.03	4.85	172	87	29	213	123	41
Purplish blue	11.9	10.98	26.95	34	55	124	66	90	164
Moderate red	30.8	20.43	10.72	167	59	68	201	88	97
Purple	8.48	6.48	10.52	59	35	71	91	58	107
Yellow green	33.28	42.38	8.62	122	151	42	152	186	62
Orange yellow	48.9	43.62	6.25	183	126	35	230	161	46
Blue	7.2	5.66	21.24	13	29	102	10	50	144
Green	14.22	22.31	7.54	43	110	46	58	144	70
Red	22.98	13.35	4.51	159	32	37	191	50	60
Yellow	59.66	60.53	8.15	189	161	29	239	200	34
Magenta	30.29	19.71	22.09	158	56	111	189	83	147
Cyan	12.92	17.82	29.16	10	94	122	10	131	163
White	85.56	88.73	73.2	187	188	183	242	242	242
Neutral 8	54.44	56.46	46.57	155	156	156	195	195	197
Neutral 6.5	33.97	35.24	29.07	119	120	118	156	157	158
Neutral 5	18.97	19.68	16.23	83	84	84	119	120	121
Neutral 3.5	8.54	8.86	7.31	51	53	52	83	84	83
Black	3.03	3.15	2.59	28	33	27	51	54	49

식 (5)는 피사체의 실제 색에 대한 $X_{D50}Y_{D50}Z_{D50}$ 와 대응되는 카메라 삼자극치 간의 관계식을 나타낸다. 이를 역으로 이용하면 기준 색표 24색 이외의 색에 대해서도 카메라 삼자극치로부터 표준광원 D50 하에서의 실제 색 $X_{D50}Y_{D50}Z_{D50}$ 을 추정하는 것이 가능하다. 식 (5)의 변환 행렬을 산출할 때 사용된 기준 색표의 재질과 수, 그리고 색의 종류 등에 따라 그 정확도가 달라지므로 식 (5)에 의해 추정된 피사체의 삼자극치를 $X'_{D50}Y'_{D50}Z'_{D50}$ 으로 표시하겠다. 식 (2)를 사용하여 $X'_{D50}Y'_{D50}Z'_{D50}$ 를 sRGB 표준 모니터에서 동일한 컬러 어퍼어런스를 느낄 수 있는 $X'_{D65}Y'_{D65}Z'_{D65}$ 로 변환한 후, 식 (3-1)과 식 (3-2)를 사용하여 sRGB 이미지의 디지털 신호 $d_{r,sRGB} d_{g,sRGB} d_{b,sRGB}$ 를 구하였다.

카메라 출력 이미지나 sRGB 이미지 모두 인쇄 매체의 특성에 따라 나타나는 색이 달라지므로 눈으로 직접 색을 비교할 수 없다. 따라서 두 이미지가 sRGB 표준 모니터에 재현되었을 때 각각 나타낼 색과 표준광원 D65 하에서의 실제 색과의 색차를 계산해 보았다. 여기서 카메라 출력 이미지가 sRGB 표준 모니터에서 나타낼 색의 삼자극치는 디지털 신호 d_r, d_g, d_b 로부터 식 (3-1)과 식 (3-2)의 역으로 계산되었다. 카메

라 출력 이미지의 색, sRGB 이미지의 색, 그리고 실제 색의 $X_{D65}Y_{D65}Z_{D65}$ 를 식 (6-1)을 사용하여 L^* 는 밝기를 의미하고 a^*b^* 평면은 색도를 의미하는 $L^*a^*b^*$ 좌표계로 변환하고, 식 (6-2)를 사용하여 각 이미지 색과 실제 색 간의 LAB 색차 ΔE^*_{ab} 를 구하였다.

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \text{ for } Y/Y_n \geq 0.008856$$

$$L^* = 903(Y/Y_n) \text{ for } Y/Y_n < 0.008856$$

$$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \tag{6-1}$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \tag{6-2}$$

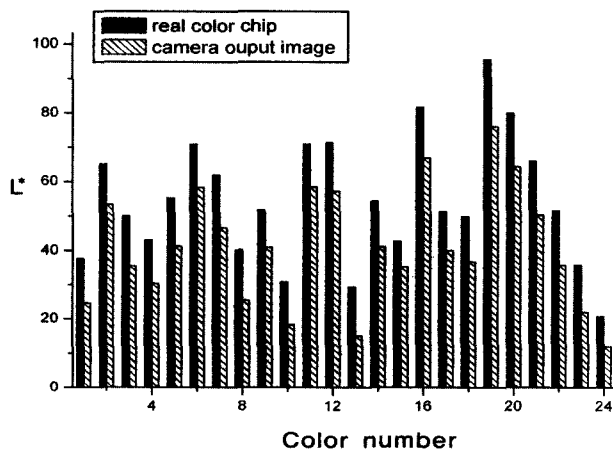
그림 4는 두 이미지와 실제 색표의 밝기 L^* 를 비교한 그래프이다. 그림 4(a)에서 카메라 출력 이미지는 실제 색표에 비해 24색 모두 L^* 가 낮음을 보여주고, 그림 4(b)에서 sRGB 이미지는 24색 모두 실제 색표와 거의 같은 L^* 를 나타냄을 보여준다. 다음으로 그림 5는 각 이미지가 이상적인 sRGB 표준 모니터에서 나타낼 색의 색도와 실제 색표의 색도를 a^*b^* 평면에 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 카메라 출력 이미지의 경우 24색 모두 실제 색표와 좌표가 크게 떨어져 있는

것을 보여주고, 그림 5(b)는 sRGB 이미지는 실제 색표와 좌표가 거의 일치함을 보여준다. 그림 6은 실제 색표에 대한 카메라 출력 이미지와 sRGB 이미지의 색차를 24색 각각에 대해 비교한 그래프이다. 카메라 출력 이미지는 실제 색과의 평균색차가 $14.6 \Delta E_{ab}^*$ 인 반면에, sRGB 이미지는 평균 색차가 $2.1 \Delta E_{ab}^*$ 로 sRGB 이미지의 경우 실제 색과 매우 근사함을 알 수 있다. 그러나 13번 Blue, 15번 Red, 18번 Cyan, 24번 Black은 색차가 $4 \Delta E_{ab}^*$ 이상을 보인다. 이들은 그림 6-b에서 볼 수 있듯이 실제 색표와의 색도 차이로 인한 것이다.

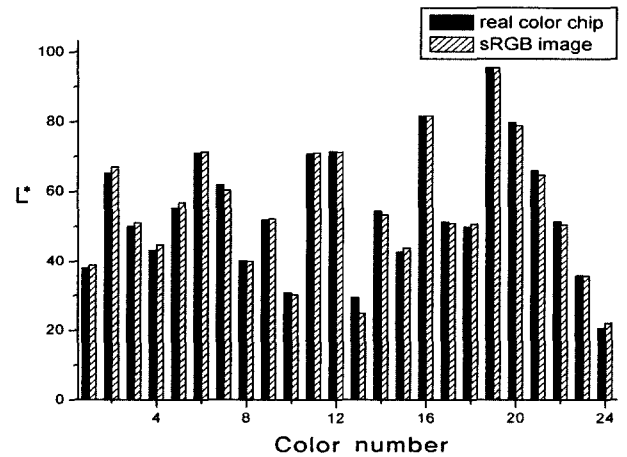
그림 7은 그림 5-b의 a^*b^* 색도도를 xy 색도^[8]로 변환하여 나타낸 것이다. 여기서 삼각형은 sRGB 색역을 나타낸다. 18번 Cyan은 색역 밖에 위치하는 색이므로 sRGB 이미지에서는 이를 정확하게 재현할 수 없다. 그러나 13번과 15번은 sRGB 색역 안쪽에 위치하여 sRGB 이미지로 정확한 재현이 가능하므로 앞으로 이에 대한 오차 요인 분석이 이루어져야

한다. 24번과 같은 검정색은 그림 3에 나타난 그래프의 함수 결정시 유발되는 오차로 인한 것으로 추정된다.

다음으로 기준 색표 이외의 색들로 구성된 AGFA IT8 Reference KIT(C90453xx)를 시험대상으로 하였다. IT8은 7"x5" 크기의 사진 인화지에 286색이 수록되어 있으며 각 색의 $X_{D50}Y_{D50}Z_{D50}$ 와 $X_{D65}Y_{D65}Z_{D65}$ 는 분광광도계(Spectroscan, Gretag-Macbeth)를 사용하여 측정하였다. 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. IT8 Reference KIT를 ColorChecker와 동일한 조건에서 촬영한 후, 카메라 출력 이미지의 $d_d d_b$ 로부터 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 sRGB 이

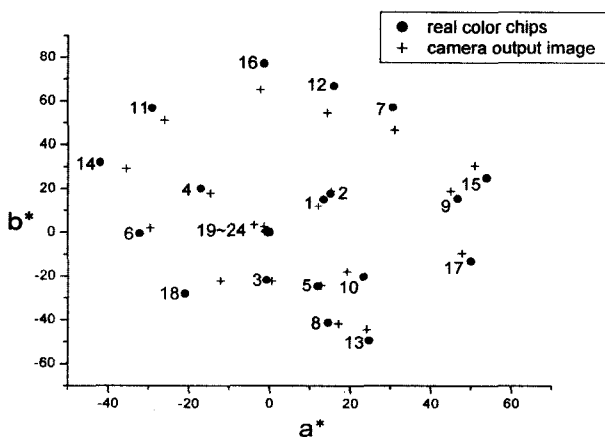


(a) 카메라 출력 이미지와 실제 색표

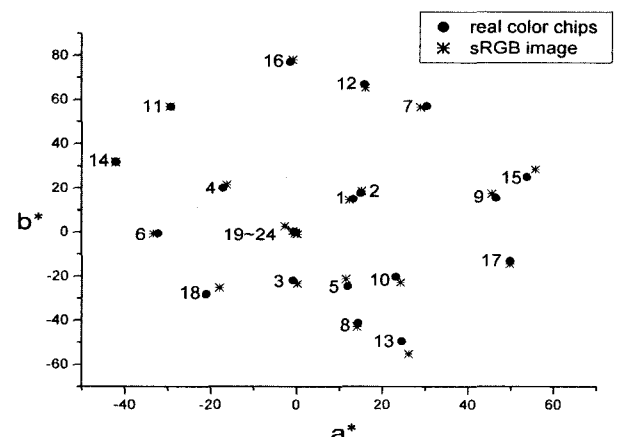


(b) sRGB 이미지와 실제 색표

그림 4. 실제 색표의 밝기 L^* 에 대한 카메라 출력 이미지와 sRGB 이미지의 밝기 비교



(a) 카메라 출력 이미지와 실제 색표



(b) sRGB 이미지와 실제 색표

그림 5. 실제 색표에 대한 카메라 출력 이미지와 sRGB 이미지의 a^*b^* 색도 비교

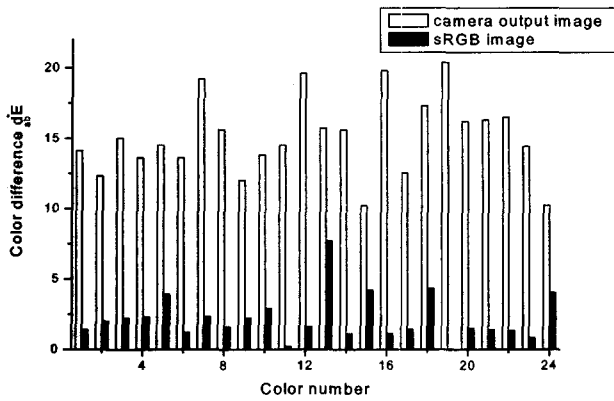


그림 6. 실제 색표에 대한 카메라 출력 이미지와 sRGB 이미지의 색차 비교

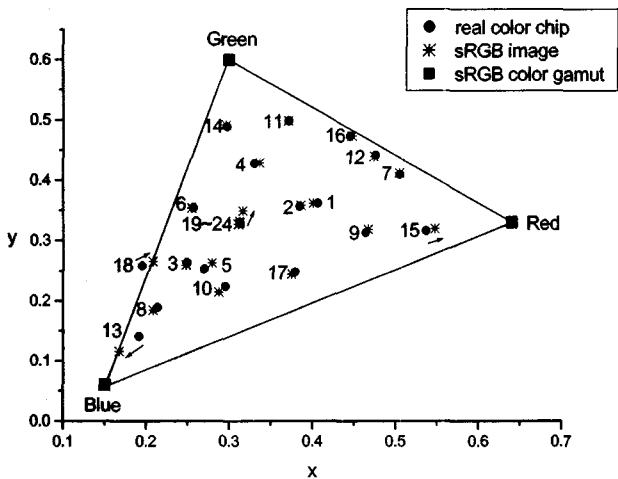


그림 7. 실제 색표에 대한 sRGB 이미지의 xy 색도 비교

미지로 변환하였다.

표 2에 기준 색표 24색과 IT8 286색에 대한 실험 결과를 비교하여 나타내었다. 기준 색표 24색의 평균 색차가 $2.1 \Delta E_{ab}^*$ 이고 IT8 286색의 평균 색차는 $4.6 \Delta E_{ab}^*$ 으로써 시험 색표로 사용된 IT8은 기준 색표 24색의 평균 색차의 2배 정도를 나타낸다. 두 색을 나란히 놓고 눈으로 그 차이를 인식하기 시작하는 색차(perceptibility)가 약 $2.2 \Delta E_{ab}^*$ 임을 고려하면^[7,11,12] 식 (5)의 변환행렬을 구할 때 사용된 기준 색표의 sRGB 이미지는 정확한 색 재현성을 보였다 할 수 있다. 또한 복합 이미지(complex image)의 경우 두 색의 차이가 인식되기는 하지만 동일색으로 인정할 수 있는 색차(acceptability)가

perceptibility의 2~3.5배 임을^[13-15] 고려하면 IT8의 sRGB 이미지도 상당한 색 재현성을 지녔다고 평가될 수 있다.

V. 결 론

Kodak DC 220 디지털 카메라로 촬영된 이미지를 sRGB 표준 모니터에서 실제 색을 나타낼 수 있는 sRGB 이미지로 변환하였다. 그 과정은 디지털 카메라 색특성 분석을 통한 실제 색의 XYZ 추정, 기준 광원의 차이를 고려한 XYZ 변환, 그리고 XYZ와 RGB의 색공간 변환으로 구성된다. 디지털 카메라의 색 특성을 나타내는 카메라 자극치 RGB와 기준 색표의 XYZ간의 변환행렬은 Macbeth ColorChecker 24색을 대상으로 하여 다중 회귀법에 의해 (3×10)으로 구하였다. 이때 디지털 카메라의 출력 신호 $d_r d_g d_b$ 와 카메라 자극치 RGB 간의 비선형성을 두 구간으로 나누어 분석함으로써 변환행렬의 정확도를 높였다.

기준 색표인 Macbeth ColorChecker 24색의 sRGB 이미지의 평균 색차는 $2.1 \Delta E_{ab}^*$ 로써 매우 정확한 결과를 보였으나, 시험 색표인 IT8 Reference KIT 286색의 sRGB 이미지의 평균 색차는 $4.6 \Delta E_{ab}^*$ 으로 약 2배 정도의 오차가 예측된다. 이는 시험 색표의 재질이 기준 색표와 다를 경우 동일색이라도 서로 다른 카메라 출력 이미지로 저장되는 카메라 메타메리즘 현상^[2]이 주 원인으로 간주된다. 앞으로 카메라 메타메리즘 현상 및 주위 환경 변화를 고려한 특성화 모델의 보완 연구가 수행될 예정이다.

감사의 글

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

참고문헌

[1] 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.
 [2] Guowei Hong, M.Ronnier Luo, and Peter A.Rhodes, "A Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling," *Color research and application*, vol. 26, no.1, pp. 77-84, 2001.

표 2. 기준 색표(macbeth Colorchecker)와 시험 색표(IT8 Reference KIT)에 대한 카메라 출력 이미지와 sRGB 이미지의 실제 색과의 색차 분석

Patch	카메라 출력 이미지				sRGB 이미지			
	Mean	SD	Max	Min	Mean	SD	Max	Min
Macbeth ColorChecker	15.1	2.7	20.4	10.2	2.1	1.6	7.7	0.02
IT8 ReferenceKIT	17.2	6.9	46.7	4.4	4.6	3.7	35.5	0.4

- [3] 김나나, “분할된 색공간에서 비선형 다중회귀분석법을 이용한 스캐너 캘리브레이션에 관한 연구,” 석사학위논문, 부경대학교 대학원, 2001.
- [4] 박진희, “다중회귀분석법을 이용한 스캐너-모니터간 색보정에 관한 연구,” *한국광학회지*, 제 14권 4호, pp. 473-479, 2003.
- [5] 김성수, 최성호, 김은수, 한찬호, 장종국, 송규익 “촬영 조건에서 HVS를 고려한 등색감 재현 알고리즘,” *대한전자공학회*, 2003.
- [6] 김정우, “색공간 변환 프로그램개발,” 석사학위논문, 대전대학교 대학원, 2001.
- [7] Stokes, “M. Precision requirements for digital color reproduction,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 11, no. 4, pp. 406-422, 1992.
- [8] Roy S. Berns, *Principles of Color Technology* (JOHN WILEY & SONS, USA, 2000), pp. 215-223.
- [9] Mark D. Fairchild, *Color Appearance Models* (Addison Wesley), pp. 378-380.
- [10] 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.
- [11] Song T, “Testing color-difference formulae on complex images using a CRT monitor,” *Proc. IS&T/SID 8th Color Imaging Conf*, pp. 44-48, 2000.
- [12] Kim Dong-Ho, Park Seung-Ok, Kim Youn-Jin, and Kim Hong-Suk, “Perceptual quality of still images,” *25th Session of CIE*, pp. D8 14-17, 2003.
- [13] International Electrotechnical Commission, Technical Committe 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.
- [14] <http://www.color.org>
- [15] <http://www.sRGB.com>

Making of sRGB image through digital camera colorimetric characterization

Jong-Wu Ryu[†], Hong-Suk Kim, and Seung-Ok Park

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

[†]E-mail: randghiph@hotmail.com

Chul-Ho Park, Jin-Hee Park

Digital Color Research Institute, 413, Business Incubation Center, Daejin university, Pocheon-si 480-711, KOREA

(Received December 4, 2003, Revised manuscript March 17, 2004)

As high quality digital cameras become readily available, digital cameras are being used not only for simple picture recording but also as information storing media in various fields. However, due to the fact that the spectral responses of the camera sensors are different from color matching functions of the CIE standard observer, the color can not be measured using these cameras. This study shows a method for converting camera image to sRGB image, in which color information is preserved. The transfer matrix between camera output signals and CIE stimulus values was determined using a multiple regression method with Macbeth ColorChecker as target colors. The CIE stimulus values for camera output signals can be mapped with a transfer matrix, and these values are converted to sRGB signals. As the result of testing a Kodak DC220 digital camera, the average color difference of Macbeth ColorChecker between true and displayed colors was $2.1 \Delta E_{ab}^*$.

OCIS Codes : 330.1690, 330.1710.