

디지털 카메라에서 컬러 필터 어레이를 위한 평가 시스템

배 태 옥[†]

Evaluation System for Color Filter Array (CFA) in Digital Camera

Tae Wuk Bae[†]

ABSTRACT

In commercial digital-cameras, color-filter filters light according to wavelength range of color filter array (CFA) and the filtered intensities contain color information of light. Then, output data of CFA is transformed to final rendered image through demosaicing process. In image processing of digital-camera, the quality of the final rendered image is affected by optical cross talk of CFA, kind of CFA pattern etc. Basically, pattern of CFA plays important role in image quality of final image rendered by digital-camera. Therefore, an evaluation system capable of quantitatively evaluating CFA is needed. This paper proposes a novel evaluation system using existing and proposed image metrics for evaluating CFAs of digital-camera. Proposed CFA evaluation system consist of color difference in CIELAB and S-CIELAB, Structure Similarity (SSIM), MTF50, moire starting point (MSP), and subjective preference (SP). MSP and SP are newly designed for the proposed evaluation system. Proposed evaluation system is expressed in polar coordinates to analyze the characteristics of CFA objectively and intuitively. Through simulations, we confirmed that proposed CFA evaluation system can objectively assess performance of developed CFAs.

Key words: Image Quality, Color Filter Array, Color Metrics, Moire, Color Difference

1. 서 론

컬러 필터 어레이(color filter array, CFA) 또는 컬러 필터 모자이크(color filter mosaic, CFM)는 컬러 정보를 캡처하는 이미지 센서 중 화소 센서 위에 있는 얇은 컬러 필터들의 모자이크 패턴을 의미한다. 컬러 필터는 그 파장 범위에 따라 빛을 여과시키며, 이처럼 독립적으로 여과된 빛의 강도는 빛의 컬러 정보를 포함한다. 예를 들면 Bayer 필터는 R , G , 및 B 각각의 필터에서, 각 파장 영역에서 빛의 강도에

대한 정보를 제공한다. 이미지 센서에 의해 획득된 이미지 데이터는 각 컬러 필터 타입에 맞춰진 디모자이킹 (demosaicing) 알고리즘에 의해 삼원색이 포함된 컬러 영상으로 변환된다. 즉, 디모자이킹 알고리즘에 따라 컬러 필터 어레이의 분광 투과성 (spectral transmittance)이 컬러 특성을 결정한다 [1]. 센서의 통과대역 양자 효율성 및 컬러 필터 어레이의 분광 응답의 폭은 가시영역 스펙트럼 보다 넓기 때문에 가시영역의 모든 컬러는 구별가능하다. 이 필터 응답은 CIE 컬러 매칭 함수 (color matching function)와

※ Corresponding Author : Tae Wuk Bae, Address: (42994) 1, Techno sunhwan-ro 10-gil, Yuga-myeon, Dalseong-gun, Daegu, 42994, KOREA, TEL : +82-53-670-8063, FAX : +82-53-670-8008, E-mail : nanninggo@gmail.com
Receipt date : Aug. 26, 2017, Revision date : Oct. 10, 2017

Approval date : Nov. 6, 2017

[†] Medical IT Convergence Research Section, Daegu-Gyeongbuk Research Center, Electronics and Telecommunications Research Institute

일치하지 않기 때문에 컬러 해석을 위해 삼자극치를 다른 색 공간으로 변환하는 작업이 필요하다.

현재까지 다양한 컬러 필터 어레이들이 개발되었다[2-4]. 각각의 컬러 필터 어레이들은 서로 다른 컬러 필터 및 그 구조를 가지기 때문에 그 특성이 서로 다르다. 이는 컬러 필터의 분광 투과성 및 그 응답 특성에 관련되지만, 인간의 시각 특성과의 밀접한 관련이 있다. 기존의 많은 영상 화질 평가 항목들이 개발되었다[5-8]. 하지만 이 개별 항목들만으로는 처리된 영상을 평가하기엔 한계가 있으며, 사용자의 의견 또한 다를 수 있다. 이에 본 논문에서는 기존의 영상 화질 평가 항목 및 새로 제안한 평가 항목을 선정하여 각각의 컬러 필터 어레이들을 정량적으로 평가하기 위한 방법을 제안하였다. 컬러 필터 어레이의 화질 평가를 위한 평가 항목은 1) CIELAB을 이용한 컬러 차이 (color difference), 2) S-CIELAB을 이용한 컬러 차이, 3) 구조적 유사도 (Structure SIMilarity, SSIM)를 이용한 객체 구조 정보의 유사도, 4) 모아레 시작점 (moire starting point, MSP)을 이용한 공간 주파수 표시, 5) 변조 전달 함수 (Modulation Transfer Function, MTF)를 이용한 대조비, 및 6) 주관적 선호도 (subjective preference, SP)로 구성되어 있다. 이 중 모아레 시작점 및 주관적 선호도는 컬러 필터 어레이의 화질 평가 시스템을 위하여 제안된 항목이다. 각각의 평가 항목의 동적 범위 (dynamic range)가 다르기 때문에 각각의 평가 항목을 정규화한 후 극좌표에 나타내었다. 이로 인해 각 컬러 필터 어레이의 성능을 객관적 및 직관적으로 평가할 수 있다. 또한 본 연구는 기존의 컬러 필터 어레이의 평가뿐만 아니라 새로운 컬러 필터를 제안하기 위한 기본 틀로 사용될 수 있는 장점이 있다.

2. 컬러 필터 어레이의 종류

Fig. 1은 현재까지 개발된 다양한 컬러 필터 어레이들을 보여준다[2-4]. 기본적인 Bayer 컬러 필터 어레이는 개발자인 Dr. Bryce E. Bayer의 이름을 본따 지어졌으며, 센서, 카메라, 및 스캐너에서 사용되는 포토 다이오드 위에 1개의 *R*, 2개의 *B*, 및 2개의 *G* 컬러 필터 패턴을 가지고 있다. RGBW 컬러 필터 어레이는 *R*, *B*, *G*, 및 *W* 필터 패턴을 가지고 있으며, 여기서 *W*는 특정 포토 다이오드가 모든 색의

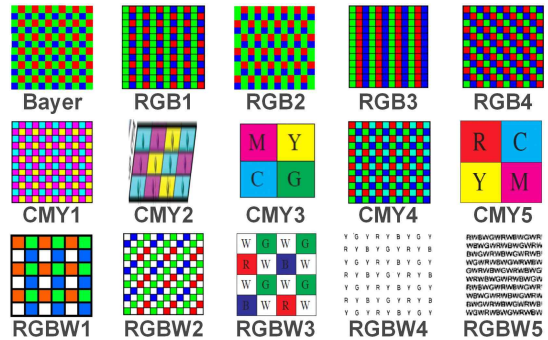


Fig. 1. Various CFAs.

컬러에 응답하도록 하는 ‘화이트’ 또는 ‘투명’ 필터 요소를 의미한다. 또한 CYGM 컬러 필터 어레이는 대부분 부차적인 컬러인 *C* (Cyan), *Y* (Yellow), *G*, 및 *M* (Magenta) 필터 패턴을 사용한다. 이러한 부차적인 컬러들은 더 많은 입사 빛이 흡수 보다는 검출되도록 하는 구조를 갖는다. 또한 이를 변화시켜 CMY 또는 CMYW 컬러 필터 어레이가 개발되었다. 이처럼 컬러 필터 어레이의 패턴이 다르기 때문에 그 분광 투과성 다르며, 이로 인해 획득되는 최종 영상 또한 다른 화질 특성을 보여준다. 이로 인해 본 논문은 디지털 카메라에서 컬러 필터 어레이를 위한 평가 시스템을 제안한다.

3. 제안하는 컬러 필터 어레이 평가 시스템

2절에서 소개된 컬러 필터 어레이 평가를 위한 6가지 항목은 ΔE_{ab} [5], Spatial CIELAB (S-CIELAB)에서의 ΔE_{ab} [6], 구조적 유사도 [7], 모아레 시작점, MTF50 [8], 및 주관적 선호도로 구성된다. 이들 항목 중 ΔE_{ab} , S-CIELAB에서의 ΔE_{ab} , 구조적 유사도, 및 MTF50은 기존의 항목이며, 모아레 시작점 및 주관적 선호도는 제안된 항목이다. 또한 각 항목의 동적 범위가 다르기 때문에 각 항목을 정규화한 후, 각 항목의 극 좌표 표현을 이용한 컬러 필터 어레이 평가 시스템이 소개된다.

3.1 CIELAB 공간에서의 색차, ΔE_{ab}

컬러 영상 장비에서 다루는 RGB는 균등색 공간 (uniform color space)가 아니기 때문에 공학적인 계산의 의미가 없으며, 이로 인해 다른 색공간으로 변

환시켜 두 색들 사이의 거리를 계산하여 활용한다. ΔE 는 CIELAB 표준 컬러 색공간을 이용하며, 인지-컬러 정확도 (perceptual color fidelity)를 측정하기 위해 널리 사용된다 [5]. 즉, 인간의 눈으로 관찰할 때 재생산된 컬러가 원 컬러에 얼마나 정확한지를 계산한다. 또한 CIELAB 시스템은 넓은 범위의 균일 컬러 표적 (2° 시야각)에서의 색차를 측정하는데 적당하다. ΔE (color difference)는 2개의 광원사이의 인지 컬러 차이 (perceptual difference)를 측정하기 위하여, 먼저 2개 광원의 분광 분포 (spectral power distribution)가 삼자극치 XYZ로 변환되며, 눈의 레티나에 존재하는 3개의 cone의 분광 민감도 (spectral power sensitivity)를 반영한다. 이후 XYZ는 Lab 색공간으로 변환된 후, 두 컬러의 유클리디안 거리 (Euclidean distance)에 의해 계산된다. 컬러 필터 어레이 평가 시스템을 위한 첫 번째 항목은 Macbeth Color Checker를 사용한 CIELAB의 ΔE 를 사용한다. CIELAB ΔE 는 1976, 1994, 및 2000년도에 각각 제안된 ΔE_{ab} (CIE76), ΔE_{94} (CIE94), ΔE_{00} (CIEDE 2000)이 있다. 이 중 CIELAB ΔE_{ab} 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (1)$$

Fig. 2는 Macbeth Color Checker를 이용한 색차 계산을 보여준다. Color1 (Ideal) 및 Color2 (Test)의 삼자극치 값을 Lab 색공간의 ab 좌표상에서 두 컬러의 거리를 계산할 수 있다. a색도 다이어그램에서 +a는 빨강, -a는 초록 방향을 나타내고, b색도 다이어그램에서 +b는 노랑, -b는 파랑 방향을 나타낸다. Fig. 2에서 각 Mecbeth Color 24가지 색의 오차값 ΔE_{ab}

및 이들의 평균 ΔE_{ab} 를 볼 수 있다.

3.2 S-CIELAB 공간에서의 색차, ΔE_{sab}

S-CIELAB은 CIELAB의 ΔE 과 마찬가지로 인지-컬러 정확도를 계산한다 [6]. 한편 컬러의 식별 및 외형은 공간 패턴 (spatial pattern)의 함수이다. 컬러의 공간 주파수가 증가할수록 색차는 구별하기 어렵다. 특히 이 현상은 파랑-노랑 컬러 방향에 대해서 더 구별하기 어렵다 [9], [10]. 따라서 CIELAB의 ΔE 를 컬러 영상에 적용하기 위해서는 영상의 공간 패턴이 설명되어야 한다. S-CIELAB의 목적은 인간 눈의 공간 컬러 민감도 (spatial-color sensitivity)를 설명하기 위하여 기본 CIELAB의 ΔE 시스템에 공간 선처리 단계를 추가하는 것이다. Fig. 3은 S-CIELAB 모델의 계산 절차를 보여준다. 그림에서 보이는 것처럼 컬러 분리 (color separation) 및 공간 여과 (spatial filtering) 처리가 기본 CIELAB의 ΔE 시스템 앞에 존재한다. 이는 패턴-컬러 분리 (pattern-color separable) 구조를 추가함을 의미한다.

3.3 구조적 유사도 (Structure SIMilarity, SSIM)

구조적 유사도는 2개의 영상 사이에 구조적 유사성을 측정하는 방법이다[7]. 구조적 유사도는 전체 참조 체계 (full reference metric)이다. 즉, 참조 영상으로서 무압축 또는 무왜곡 영상에 기초한 영상 화질을 측정하는 것이다. 구조적 유사도는 인간의 눈 인지 관점과 일치하지 않는 기존의 PSNR (peak signal-to-noise ratio) 및 MSE (mean squared error)를 개선하기 위해 설계되었다. PSNR 및 MSE와 같은

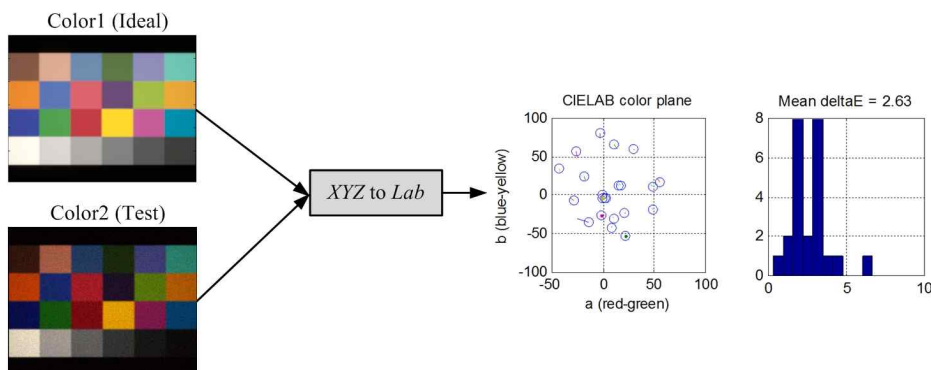


Fig. 2. Color difference using Macbeth Color Checker.

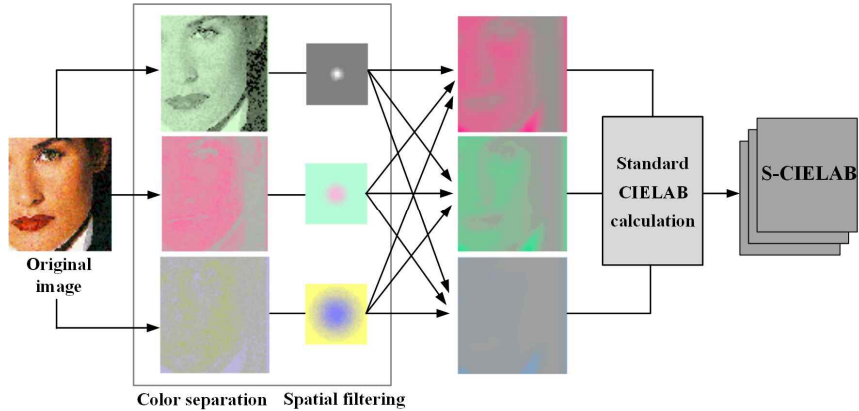


Fig. 3. S-CIELAB model.

기존의 방법들과 구조적 유사도와의 차이점은 인지 되는 에러 (perceived errors)를 평가한다는 점이다. 즉, 구조적 유사도는 영상의 구조적 정보에서의 인지 변화 (perceived change)로서 영상 열화를 고려한다. 구조적 정보는 화소들이 공간적으로 인접해 있을 때, 그 화소들은 상호 의존성이 존재할 것이라는 개념에서 출발한다. 이들 의존성은 시각적 화면에서 객체의 구조에 대한 중요한 정보를 수반한다. 구조적 유사도는 영상의 다양한 국부 창에 의해 계산되며, 국부 창 x 및 y 사이의 구조적 유사도 값은 다음과 같이 계산된다.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (2)$$

여기서 μ_x 및 μ_y 는 x 및 y 의 평균을 의미하며, σ_x^2 및 σ_y^2 는 x 및 y 의 분산을 나타낸다. 또한 σ_{xy} 는 x 및 y 의 공분산을 의미한다. c_1 및 c_2 는 값이 작은 분모에 의한 나눗셈을 안정화시키기 위한 두 상수를 의미

한다.

3.4 모아레 시작점(moire starting point, MSP)

Fig. 5에서와 같이 모아레 (moire) 현상은 직물 또는 울타리등과 같이 높은 공간 주파수 (spatial frequency)의 반복되는 패턴을 가진 영상에서 보여지는 인공적인 컬러 대역 (artificial color banding)이다. 이는 나이퀴스트 (Nyquist) 주파수 이상에서 발생하는 엘리어싱 (aliasing)의 결과이다. 또한 모아레 현상은 카메라의 렌즈 선명도, 영상을 부드럽게 만드는 안티-엘리어싱 (저역 통과) 필터, 및 디모자이킹 등에 의해 영향을 받는다.

실제로 모아레 현상을 정량적으로 평가하기는 쉽지 않다. 모아레 현상은 공간적으로 불규칙하며, 그 컬러 대역 또한 크기가 다양하기 때문이다. 이에 본 논문에서는 Lab 색공간에서 모아레 시작점을 측정하는 방법으로 모아레 발생 정도를 정량적으로 측정하

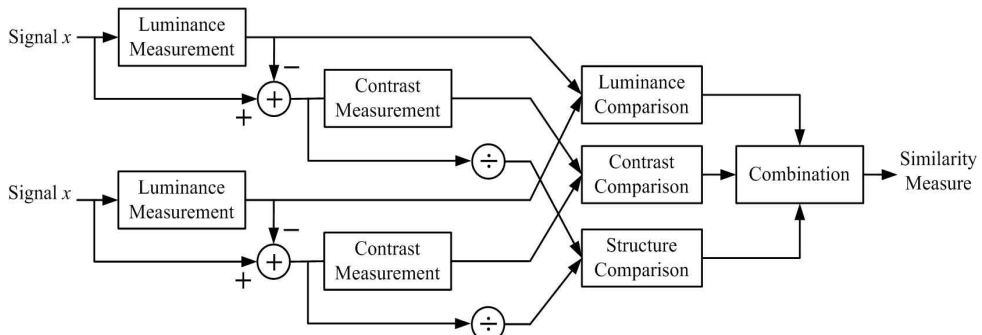


Fig. 4. Block-diagram of SSIM.



Fig. 5. Moire phenomenon.

고자 한다. Fig. 6(a)는 모아레 측정 패턴인 사인파 줄무늬 (sinusoidal stripe)이며, Fig. 6(b)는 ideal 경우의 실제 카메라 출력 영상이며, Fig. 6(c)는 출력 영상 6(b)의 *ab* 영상이다. 그리고 Fig. 6(d)는 Fig. 6(c) 영상의 가로 선에 대한 $\sqrt{a^2 + b^2}$ 곡형이며, 및 Fig. 6(e)는 Fig. 6(c) 영상의 가로 선에 대한 1×5 화소들의 평균에 대한 곡형이다. Fig. 6(e)의 곡형에서 모아레 시작점을 위한 문턱치 $T_m = 15$ 이상이 되는 화소 지점을 모아레 시작점으로 설정한다.

3.5 MTF50

MTF (Modulation Transfer Function)은 ISO-

12233 (Slanted bar)를 이용하여 계산할 수 있다 [8]. MTF는 공간 주파수의 함수로서 영상 장치가 대조비 (contrast)를 얼마나 잘 표현하는지를 나타낸다. ISO 12233 방법은 각 컬러 채널을 통하여 MTF를 계산하기 위하여 경사 에지 (slanted edge)를 측정하여 계산된다. 그 방법은 휘도 MTF(luminance MTF)를 계산하기 위하여 독립된 컬러 채널의 데이터를 결합한다. 에지 부근의 응답은 직접적으로 미분을 통한 선상 분포 함수 (line spread function)에 관계된다. 선상 분포 함수는 푸리에 변환에 의한 MTF에 관련된다. 따라서 본 방법은 선상 분포 (line spread) 및 MTF를 계산하기 위하여 에지 응답을 계산한다. 일반적으로 이 방법은 선상 분포 변화에 대한 샘플과 비교하여 다소 다른 위치에서 측정됨에 따라 실제 시스템 선상 분포를 평가하기에 제한적이다. 경사 에지 방법은 에지의 다른 레벨에 대하여 선 측정을 결합함으로써 이러한 문제를 피한다. 이 결합된 측정 방법은 본질적으로 에지의 슈퍼 샘플 (super-sampled)을 제공하며, 디지털 영상 장치에 의한 언더 샘플 (under-sampled)에 관련된 문제를 줄인다. Fig. 7(a)는 경사 에지, 즉 ISO-12233을 보여주며, Fig. 7(b)는 및 이에 대한 (b) MTF50 결과 곡선을 보여준

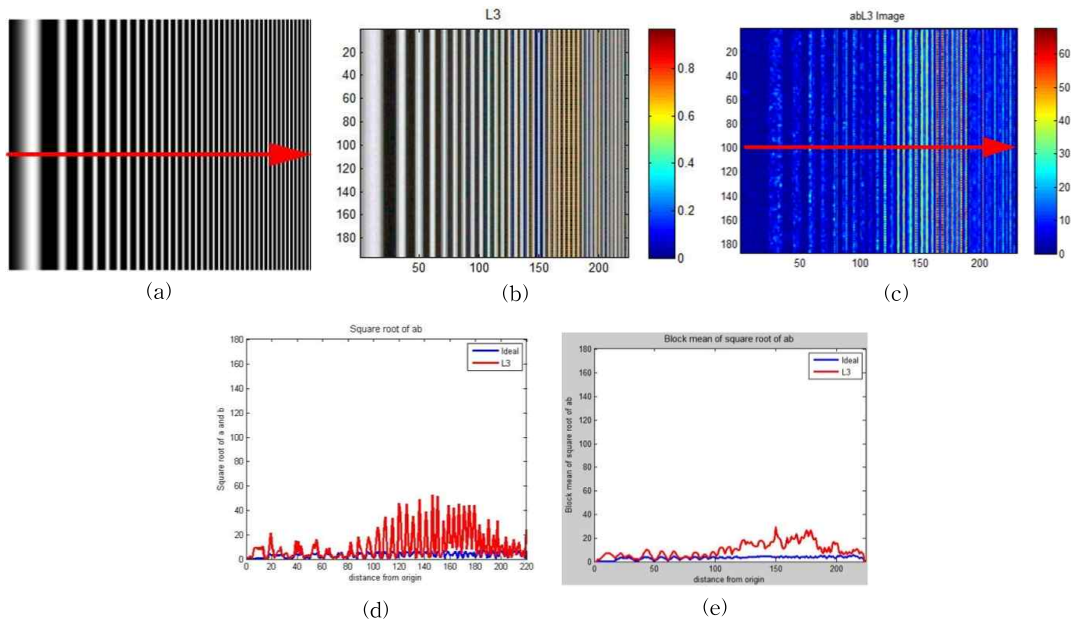


Fig. 6. (a) Sinusoidal stripe pattern, (b) output image of ideal camera, (c) *ab* color output image for (b), (d) $\sqrt{a^2 + b^2}$ curve for center horizontal line of (c) image, and (e) 1×5 block mean curve for center horizontal line of (c) image.

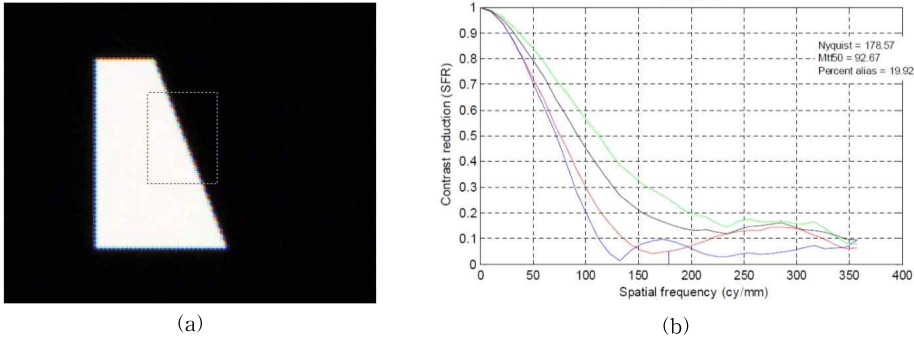


Fig. 7. (a) ISO-12233 (Slanted bar) and (b) its MTF50 curve.

다. Fig. 7(a)에서 선택된 영역에서의 수평선들이 하나의 시스템 에지 응답에 결합된다. 이 에지 응답으로부터 선상 분포 및 MTF 응답이 각 컬러 채널에 대해 계산된다. 또한 3개의 컬러 채널의 결합을 기초로 한 시스템 휘도 응답 (system luminance response)이 계산된다. Fig. 7(b)의 곡선은 공간 주파수 (cycles/m)의 함수로서 대조비 감소 곡선을 보여준다.

3.6 주관적 선호도(subjective preference, SP)

앞에서 언급된 5개의 화질 평가 항목과는 달리 Fig. 8에서와 같이 주관적인 영상 비교 및 선택(pair-wise comparison)을 통한 주관적 선호도가 더해졌다. 주관적 선호도 점수를 계산하기 위하여, 각 컬러 필터 어레이의 출력 영상들에 대하여 버블 선별 (bubble sort)를 이용하여 2개의 컬러 필터 어레이 영상에서 하나를 선택하게 한다. 임의로 정렬된 컬러 필터 어레이의 출력 영상부터 시작하여, 모든 인접한 2개의 영상을 비교하여 선호도가 높은 영상이 순서상 앞쪽으로 배치시키는 작업을 반복하여 수행한다. 주관적 선호도에 사용된 영상은 Fig. 8(e) 영상이 사용되었다. 이러한 방법으로 각 컬러 필터 어레이의 선호도 점수는 실험에 사용된 각 영상에 대한 컬러

필터 어레이의 선호도 점수들의 합이 된다. 이때 한 영상에 대한 선호도의 최대 점수는 컬러 필터 어레이의 개수가 된다.

3.7 컬러 필터 어레이의 평가 시스템

앞에서 소개되어진 영상 평가 체계들을 통합하여 실제 영상에 적용하기 위하여 모든 평가 요소들에 대한 점수를 [0, 1]의 동적 범위로 정규화 작업을 해야 한다. 식 (2)의 구조적 유사도 (SSIM)는 수식 자체가 [0, 1]의 동적범위를 가지기 때문에 정규화 작업에서 제외된다. CIELAB의 색차 ΔE_{ab} 및 S-CIELAB의 색차 ΔE_{sab} 그리고 모아레 시작점 (MSP)은 그 값이 작을수록 컬러필터의 성능이 우수함을 나타내기 때문에 식(3), 식(4) 및 식(5)에서 색차의 최대값이 분자 및 분모의 앞에 위치에 있다. 하지만 MTF50은 그 값이 높을수록 컬러필터의 성능이 우수함을 나타내기 때문에, 식(6)에서 그 최소값들이 분자 및 분모의 뒤에 위치한다. 먼저 CIELAB의 색차 ΔE_{ab} 의 정규화 식은

$$\frac{\Delta E_{max} - \Delta E_{ab}}{\Delta E_{max} - \Delta E_{min}} \tag{3}$$

와 같다. 여기서 $\Delta E_{max} = 5$ 및 $\Delta E_{min} = 0$ 는 Mac-

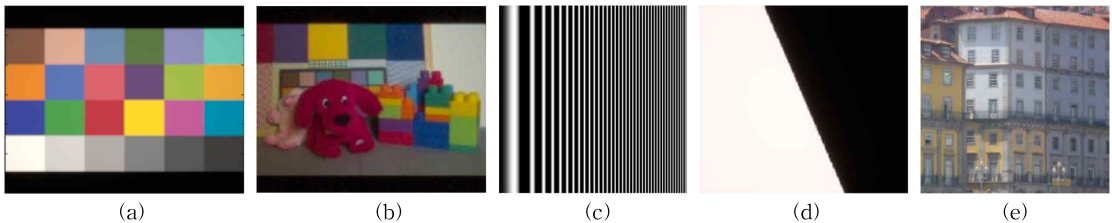


Fig. 8. (a) Macbeth Color Checker, (b) PUPPY, (c) Sinusoidal pattern, (d) Slanted bar, and (e) BUILDING.

beth Color Checker를 이용한 CIELAB 색차 ΔE_{ab} 의 최대값 및 최소값을 의미하며, ΔE_{ab} 는 테스트 컬러 필터에 의한 Macbeth Color Checker에서 CIELAB의 색차값을 나타낸다.

S-CIELAB의 색차 ΔE_{sab} 의 정규화 식은

$$\frac{\Delta E_{smax} - \Delta E_{sab}}{\Delta E_{smax} - \Delta E_{smin}} \quad (4)$$

와 같다. 여기서 $\Delta E_{smax} = 25$ 및 $\Delta E_{smin} = 0$ 는 S-CIELAB 색차 ΔE_{sab} 의 최대값 및 최소값을 의미하며, ΔE_{sab} 는 테스트 컬러 필터의 색차값을 나타낸다.

모아레 시작점 (MSP)의 정규화 식은

$$\frac{MSP_{max} - MSP}{MSP_{max} - MSP_{min}} \quad (5)$$

와 같다. 여기서 $MSP_{max} = 230$ 및 $MSP_{min} = 0$ 는 최대 및 최소 모아레 시작점을 의미하며, MSP 는 테스트 컬러 필터의 모아레 시작점을 나타낸다.

MTF50의 정규화 식은

$$\frac{MTF - MTF_{min}}{MTF_{max} - MTF_{min}} \quad (6)$$

와 같다. 여기서 $MTF_{max} = 130$ 및 $MTF_{min} = 50$ 는 최대 및 최소 MTF값을 의미하며, MTF 는 테스트 컬러 필터의 MTF 값을 나타낸다.

주관적 선호도 점수의 경우, 선호도 최대 점수는 실험에 사용된 컬러 필터 어레이의 개수와 영상의 개수의 곱이 된다. 따라서 각 컬러 필터 어레이의 선호도 점수를 선호도 최대 점수로 나눔으로써 정규화할 수 있다. 결과적으로 좋은 성능의 컬러 필터 어레이는 ΔE_{ab} , ΔE_{sab} , 및 MSP 값은 작고, SSIM, MTF50, 및 SP 값은 큰 값을 가진다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 8은 컬러 필터 어레이를 평가할 테스트 영상을 나타낸다. Fig. 8(a)는 CIELAB의 색차 ΔE_{ab} 의 계산하기 위해 사용되며, Fig. 8(b)는 S-CIELAB의 색차 ΔE_{sab} 및 구조적 유사도를 계산하기 위해 사용된다. Fig. 8(c)는 모아레 시작점을 계산하기 위한 사인파 줄무늬이며, Fig. 8(d)는 MTF50를 계산하기 위한 ISO-12233 영상이다. Fig. 9(e)는 주관적 선호도를 계산하기 위해 사용되며, 추가적으로 Fig. 8(a) 및 8(b)가 사용된다.

Fig. 9는 Bayer, CMY4, RGBW1, 및 RGBx 컬러 필터 어레이에 의해 처리된 출력 영상, S-CIELAB 색차 ΔE_{sab} , 구조적 유사도, 및 모아레 시작점에 대한 결과 영상을 보여준다. Bayer, CMY4, RGBW1, 및 RGBx 컬러 필터의 순서대로 S-CIELAB 색차 ΔE_{sab} 는 9.20, 10.45, 6.27, 및 9.51이며, 구조적 유사도 값은 0.93, 0.91, 0.88, 및 0.91이며, 모아레 시작점은 66, 31, 40, 및 66를 가진다. S-CIELAB 색차 ΔE_{sab} 결과에서는 색차값이 작은, 즉 파란색 범위가 많은 RGBW1이 우수했고, 구조적 유사도 결과에서는 SSIM값이 큰, 즉 빨간색 범위가 많은 Bayer가 우수했으며, 모아레 시작점 결과에서는 모아레 공간 패턴에서 MSP값이 큰 Bayer 및 RGBx가 우수한 것으로 나타났다. 이처럼 테스트에 사용된 컬러 필터들은 각각의 컬러 필터 평가 요소에서 그 우수함이 각각 다르다. 각 컬러 필터의 전체 성능을 객관적으로 평가하기 위하여 극좌표 (polar coordinate)상에 정규화된 컬러 필터 평가 요소를 표시함으로써 사용자로 하여금 각 컬러 필터의 전체 성능을 평가할 수 있다.

Fig. 10은 Bayer, CMY4, RGBW1, 및 RGBx 컬러 필터에 대하여 극 좌표상위에 CIEL ΔE_{ab} , ΔE_{sab} , SSIM, MSP, MTF50, 및 SP값을 표시하였다. 각 컬러 필터 평가 요소들은 정규화되어 극 좌표상에 표시되어 있기 때문에, 각 요소들을 연결한 넓이값이 제일 큰 컬러 필터가 성능이 우수한 것으로 평가할 수 있다. 그림에서 보이는 것처럼 Bayer 및 CMY4의 경우 색차 ΔE_{ab} 및 MSP에서 성능이 좋지 못했으며, RGBW1 및 RGBx의 경우 MSP에서 성능이 좋지 못함을 볼 수 있다. 향후 더 다양한 실험을 통하여 각 평가 항목의 더 정확한 파라미터 계수값을 적용한다면, 제안한 평가 시스템을 통한 컬러 필터 어레이의 정량적 분석 성능 향상될 것으로 판단된다. 또한 기존의 후처리 기반의 화질 개선 기법 [11]과 병행되어 연구된다면, 컬러 필터 어레이가 화질에 미치는 영향을 더 정확하게 분석할 수 있을 것이다.

5. 결 론

현재까지 다양한 컬러 필터 어레이들이 개발되었다. 각각의 컬러 필터 어레이들은 서로 다른 컬러 필터 및 그 구조를 가지기 때문에 그 특성이 서로 다르다. 이는 컬러 필터의 분광 투과성 및 그 응답 특성에

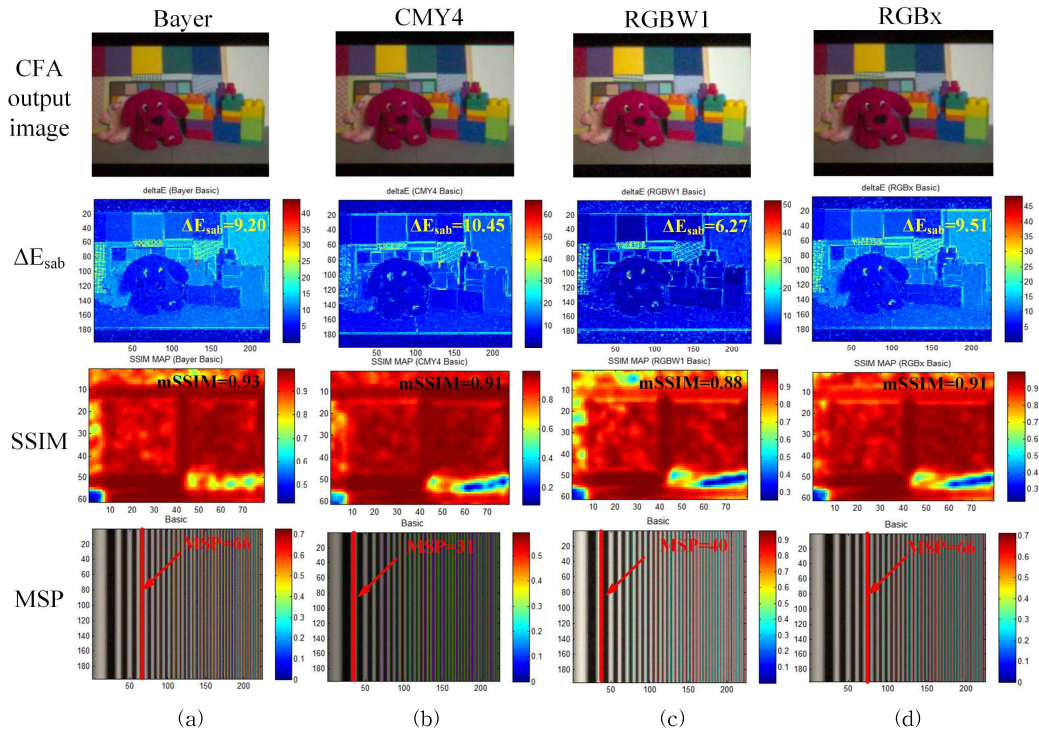


Fig. 9. Output image (for PUPPY), ΔE_{sab} (color difference in S-CIELAB), SSIM, and MSP results for (a) Bayer, (b) CMY4, (c) RGBW1, 및 (d) RGBx.

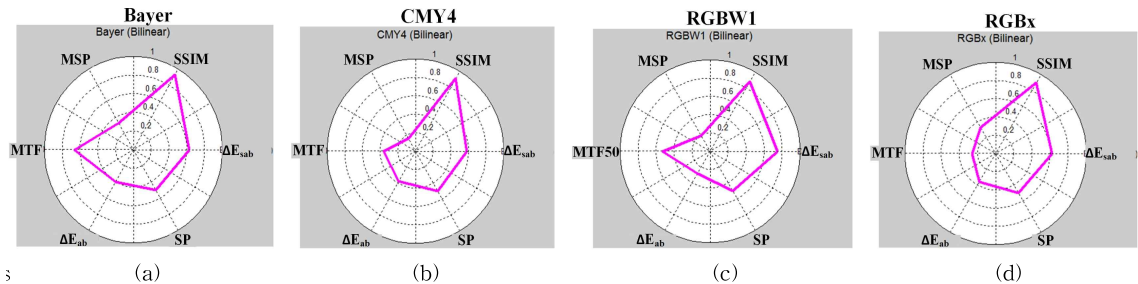


Fig. 10. Evaluation result for (a) Bayer, (b) CMY4, (c) RGBW1, and (d) RGBx using polar coordinate.

관련되지만, 인간의 시각 특성과의 밀접한 관련이 있다. 기존의 다양한 영상 화질 평가 항목들이 개발되었지만, 이 개별 항목들만으로는 처리된 영상을 평가하기엔 한계가 있으며, 사용자의 의견 또한 다를 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 영상 화질 평가 항목 및 제안한 평가 항목을 추가하여, 각각의 컬러 필터 어레이들을 정량적으로 평가하기 위한 방법을 제안하였다. 본 연구는 기존의 컬러 필터 어레이의 평가 뿐만 아니라, 새로운 컬러 필터를 제안하기 위한 기본 틀로 사용될 수 있는 장점이 있다.

REFERENCE

[1] Color Correction for Image Sensors, *Image Sensor Solutions: Application Note Revision 2.0*. Kodak 27, 2003.
 [2] R. Lukac and K.N. Plataniotis, "Color Filter Arrays: Design and Pperformance Analysis," *IEEE Transactions on Broadcast Television Receivers*, Vol. 51, pp. 1260-1267, 2005.
 [3] K. Hirakawa and P.J. Wolfe, "Spatio-spectral

Color Filter Array Design for Optimal Image Recovery,” *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 17, No. 10, pp. 1876–1890, 2008.

[4] M. Kumar, E.O. Morales, J.E. Adams, and W. Hao, “New Digital Camera Sensor Architecture for Low Light Imaging,” *IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 2681–2684, 2009.

[5] R.S. Hunter, “Accuracy, Precision, and Stability of New Photo-electric Color-Difference Meter,” *Journal of Optical Society of America*, Vol. 38, No. 12, pp. 1094, 1948.

[6] X. Zhang and B.A. Wandell, “A Spatial Extension of CIELAB for Digital Color-image Reproduction,” *Society for Information Display Journal*, Vol. 5, No. 1, pp. 61–63, 1997.

[7] Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, and E.P. Simoncelli, “Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity,” *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 13, No. 4, pp. 600–612, 2004.

[8] <http://www.imageval.com/ApplicationNotes/SlantedBarMTF.pdf>, *ISET-Calculating the System MTF using ISO 12233 (Slanted bar)* (accessed Jun., 20, 2017)

[9] A.B. Poirson and B.A. Wandell, “Appearance of Colored Patterns: Pattern-color Separability,” *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 10, No. 2, pp. 2458–2470, 1993.

[10] A.B. Poirson and B.A. Wandell, “Pattern-color Separable Pathways Predict Sensitivity to Simple Colored Patterns,” *Vision Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 515–526, 1996.

[11] H.S. Kang and Y.H. Ko, “Image Quality Enhancement Method Using Retinex in HSV Color Space and Saturation Correction,” *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 20, No. 9, pp. 1481–1490, 2017.



배 태 욱

1995년 3월~2004년 2월 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 학사
 2004년 3월~2006년 2월 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사

2006년 9월~2010년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사
 2011년 9월~2011년 12월 KAIST 전자공학부 박사후 연구원
 2012년 2월~2013년 3월 Stanford 대학교 박사후 연구원
 2014년 3월~현재 한국전자통신연구원
 관심분야: 영상처리, 컬러모델, 멀티미디어시스템