

HDR-레벨에서 접근한 영상의 컬러보정 기법

유현진, 김강연, 고광희, 이관행
광주과학기술원 기전공학과
e-mail : hjyoo@gist.ac.kr

HDR-level color correction of high dynamic range image

Hyun Jin Yoo, Kang Yeon Kim, Kwang Hee Ko, Kwan H. Lee
Dept. of Mechatronics, GIST

요 약

그래픽스 분야에서 다양한 재질을 사실감 있게 표현하려는 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 다양한 재질의 반사특성을 측정하는 방법들이 시도되고 있고 이때 광디텍터로 디지털카메라를 이용하면서 HDR 영상으로부터 광량을 추정한다. 그러나, 디지털카메라는 분광광도계와 달리 컬러보정이 필요하며 이로부터 생성된 HDR 영상 역시 컬러가 보정되어야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 HDR 영상을 생성하기 전에 LDR 영상들의 컬러를 보정하는 방법의 문제점을 제시하고, 직접적으로 HDR 영상의 컬러를 보정하는 HDR-레벨 컬러보정 방법을 제안한다.

1. 서론

최근에는 실감나게 재질을 표현하기 위해 단순히 컬러나 텍스처(texture)만을 사용하는 것이 아니라, 실제 금속이나 플라스틱, 옷감 재질 등의 복사 휘도(radiance)를 측정하고 BRDF 를 생성하여 좀 더 실감나게 표현하는 연구가 활발히 진행되고 있다.[3-7] BRDF 는 재질 표면의 한 점에서 들어오는 광량에 대해 반사하는 광량을 나타내는 함수 $f(\theta_i, \Phi_i, \theta_o, \Phi_o)$ 로 표현한다. θ_i 와 Φ_i 는 들어오는 광의 방향을, θ_o 와 Φ_o 는 반사하는 광의 방향을 의미한다. 모든 방향에 대한 f 를 생성하기 위해 광원의 방향과 반사하는 광을 측정할 디텍터(detector)의 위치를 달리해 가면서 측정한다.[3-7] 이때 광 디텍터로써 분광광도계(spectrophotometer) 대신 저가의 널리 보급된 디지털카메라를 사용하는 경우가 많다.[3,4,6,7]

하지만 디지털카메라는 실 세계의 넓은 범위의 명암도(intensity)를 한번에 나타낼 수 없기 때문에 디지털카메라를 광 디텍터로써 사용하기 위해서는 HDR(High Dynamic Range) 영상(image)를 생성하여 광량을 추정한다.[1,2] 디지털카메라로 측정한 일반 영상을 LDR(Low Dynamic Range) 영상이라 한다면, HDR 영상은 LDR 영상보다 넓은 범위의 명암도를 표현할 수 있는 영상을 의미한다. 이러한 HDR 영상을 만들기

위해서는 우선 디지털카메라로 노출시간을 달리하여 측정한 여러 장의 LDR 영상으로부터 카메라 특성 곡선(camera characteristic curve)을 생성해야 한다.[1,2] 카메라 특성 곡선은 노출시간에 따라 달라지는 광량에 대한 픽셀 값의 관계를 나타낸다. 예를 들어 강의실 한 가운데에서 창 밖을 바라보며 측정한 영상들을 가지고 카메라 특성곡선을 생성한다고 가정해 보자. 강의실 내부 영역이 잘 나온 노출시간의 영상에서는 창밖의 영역이 너무 밝아서 세추레이션(saturation) 될 것이고, 반대로 창 밖의 영역이 잘 나온 노출시간의 영상에서는 강의실 내부 영역이 어둡게 세추레이션 될 것이다. 즉, 창 밖의 영역이 잘 나온 노출시간의 영상에서는 높은 광량에 대한 픽셀 값의 관계를 추정하고 강의실 내부 영역이 잘 나온 노출시간의 영상에서는 낮은 광량에 대한 픽셀 값의 관계를 추정함으로써 넓은 범위의 광량에 대한 픽셀 값의 관계를 나타내는 카메라 특성 곡선을 생성 할 수 있다. 이렇게 얻어진 카메라 특성 곡선을 이용하여 원하는 대상, 특히 BRDF 분야에서는 노출시간을 달리하여 측정한 재질 샘플의 영상들을 가지고 재질의 HDR 영상을 생성하여 BRDF 를 계산한다.

이렇게 광 디텍터로써 디지털카메라를 사용할 수 있지만, 디지털카메라는 분광광도계와 달리 RGB 세개의 채널에 대한 값만 갖기 때문에 컬러보정이 필수

적이다. 디지털카메라를 포함한 모든 컬러를 다루는 장비들(모니터, 프린터, 스캐너, 등)은 각기 장비 종속적인 컬러공간을 갖는다.[8,10] 동일한 빨강색을 카메라, 모니터, 프린터, 스캐너에서 표현할 때 각기 장비에 종속적인 컬러공간에서 나타내기 때문에 서로 다른 RGB 값으로 표현된다. 즉 카메라로 획득한 영상의 색은 그 카메라의 색 공간에서의 RGB 값이지 원색이 아니기 때문에, 원색재현을 위해서는 장비 독립적인 컬러공간(CIEXYZ or CIELAB)으로의 변환이 필요하다.[8,10] 따라서 장비에 종속적인 컬러공간을 장비에 독립적인 컬러공간으로 변환시키는 모델을 생성해야 하며 이러한 과정을 장비의 컬러 특성화라고 한다.[8,10] 변환모델을 생성시키는 방법으로는 다중회귀분석, 신경망을 이용하는 방법, ICC(International Color Consortium) 프로파일과 같은 룩업테이블(look up table)을 이용하는 방법 등이 있다. HDR 영상을 생성하기 위해 사용한 디지털카메라 역시 컬러를 다루는 장비이므로 컬러 특성화가 수행되어야 하며 이로써 생성된 변환모델을 이용하여 HDR 영상의 컬러를 보정해야 한다. [6,7]에서는 ICC 프로파일을 이용하여 HDR 영상의 컬러를 보정하였고, [11,12]에서는 더 나아가 CIEXYZ 컬러공간에서의 HDR 영상을 생성하였다. 이러한 연구[6,7,11,12]들은 HDR 영상을 생성하기 전에, ICC 프로파일을 이용하여 노출 시간이 다른 여러 장의 LDR 영상들에 적용하여 컬러를 보정한다. 그리고 나서 이렇게 컬러가 보정된 LDR 영상들을 가지고 HDR 영상을 생성함으로써 이를 컬러가 보정된 HDR 영상이라고 간주한다. 하지만 HDR 영상을 생성하기 위해 사용할 LDR 영상들의 픽셀 값은 컬러정보임과 동시에 광량의 의미를 함께 갖는다. 그러므로 HDR 영상을 생성하기 전에 컬러보정을 위해 LDR 영상들의 픽셀 값을 변하게 하면, 광량을 추정하기 전에 LDR 영상의 정보가 변형되기 때문에, 이들로부터 생성된 HDR 영상은 정확한 광량을 갖는다고 볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 HDR 영상을 먼저 생성한 후 컬러를 보정하는 방법을 제안한다.

2. 관련 연구

HDR 영상을 사용하여 BRDF 나 BSSRDF 를 계산하는 연구에서는 ICC 프로파일과 컬러차트를 사용해 카메라의 컬러 특성화를 수행하여 컬러를 보정하고 있다.[6,7,11,12] ICC 프로파일을 이용해 HDR 영상의 컬러를 보정하는 개괄적인 수행방법은 <그림 1>과 같다. HDR 영상을 생성하기 전에 ICC 프로파일을 사용해 각각의 노출시간이 다른 LDR 영상들의 컬러를 보정한다. 그리고 나서 컬러가 보정된 각 LDR 영상들과 카메라 특성 커브를 통해 sRGB 공간의 컬러가 보정된 HDR 영상을 생성한다. 본 논문에서는 이러한 HDR 영상의 컬러보정 방법을 ‘LDR-레벨 컬러보정’이라고 정의한다.

HDR 영상을 생성하기 위해 사용하는 LDR 영상의 픽셀 값은 컬러를 나타내지만 동시에 노출시간에 따른 광량을 의미한다. 즉, 노출시간에 따른 픽셀 값의 변화량으로 광량을 추정하여 HDR 영상을 생성한다.

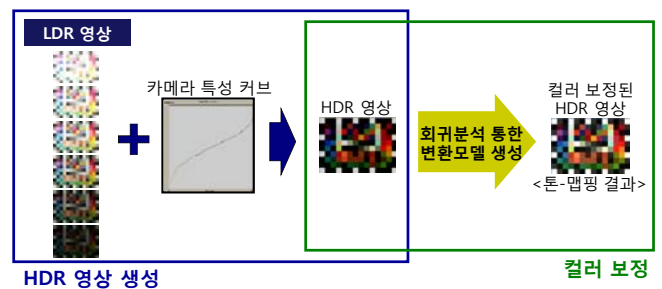
하지만 컬러를 보정하기 위해 HDR 영상을 생성하기 전에 LDR 영상들의 픽셀 값을 변하게 하면, HDR 영상을 생성 하기 전에 컬러보정을 수행하기 위해 LDR 영상들의 픽셀 값이 변하게 되므로, 이들로부터 정확한 광량이 추정된 HDR 영상을 생성 할 수 없다. 따라서 HDR 영상을 생성하기 전에 컬러보정을 수행하는 것은 바람직하지 못하다. 다음 장에서는 보다 정확한 광량을 추정하기 위한 HDR-레벨 컬러보정 방법을 소개한다.



(그림 1) LDR-레벨 컬러보정 방법

3. HDR-레벨 컬러보정

앞에서 언급한 LDR-레벨 컬러보정의 문제점을 해결하기 위해 본 장에서는 HDR-레벨 컬러보정 방법을 제안하고자 한다. <그림 2>는 HDR-레벨 컬러보정의 과정을 간단하게 보이고 있다. 먼저 노출시간을 달리한 LDR 영상들로부터 카메라 특성 커브를 생성하고, 컬러보정을 하기 전에 보다 정확한 광량을 추정하도록 HDR 영상을 생성한다.[1,2] 그리고 나서 회귀분석을 통해 컬러차트의 CIEXYZ 값과의 변환모델을 생성한 수 HDR 영상의 컬러를 보정한다.



(그림 2) HDR-레벨 컬러보정 방법

HDR 영상을 생성한 후, HDR 영상을 LDR 영상처럼 직접 회귀분석을 통해 변환모델을 생성하기에는 두 가지 큰 문제점이 발생한다. 첫 번째 문제점은, HDR 영상의 픽셀 값은 광량을 나타내기에 뚜렷이 정해진 최대값이 존재하지 않고, 이로 인해 일반 LDR 영상의 픽셀 값(0~255)처럼 정규화(normalization) 할 수 없다는 점이다. 측정 환경에 따라 HDR 영상의 최대 픽셀 값은 항상 다르기 때문에 HDR 영상과 컬러차트 사이의 변환모델을 생성하기 위해 회귀분석을 적용하기 위해서는 HDR 영상의 정규화를 먼저 해야

한다.

또 다른 문제점은, HDR 영상이 정규화되었다 하더라도 HDR 영상의 최대 픽셀 값은 입사되는 광량에 대한 비율이지, LDR 영상의 최대값인 흰색을 의미하지는 않는다. HDR 영상을 일반 출력 장치(모니터, 프린터, 등)에서 표현하기 위해 톤-맵핑(tone-mapping)이 필요하듯이 컬러차트의 색과 비교하기 위해서도 역시 톤을 맞춰줘야 한다. HDR 영상과 출력장치 사이의 톤-맵핑과 혼동을 피하기 위해 본 논문에서는 이러한 과정을 톤-밸런싱(tone-balancing)이라고 정의하고자 한다. 다음 두 절에서는 각각의 문제점을 해결하기 위한 정규화 방법과 톤-밸런싱 방법을 소개한다.

3.1. HDR 영상 정규화(Normalization)

앞서 언급한 것과 같이 HDR 영상의 픽셀 값은 환경에 따라 최대값이 항상 다르다. 특히, HDR 영상의 픽셀 값은 광량을 의미하듯이 측정 환경의 광원 조건에 의한 영향을 가장 많이 받는다. 따라서 HDR 영상을 정규화 하는데 측정 환경의 광원을 사용한다. 먼저, 디지털카메라로 거울에 비친 광원 자체의 HDR 영상을 생성한다. 컬러차트의 HDR 영상을 생성할 때와 동일한 조건을 만들기 위해 거울과 광원간의 거리, 거울과 카메라간의 거리를 컬러차트의 경우와 같게 한다. 컬러차트를 측정할 때에는 적정한 노출시간이었어도, 거울에 비친 광원이 훨씬 많은 광량을 갖고 있기 때문에 광원을 측정할 때에는 세채레이션(saturation) 되는 경우가 많다. 따라서 아주 적은 노출시간에서의 측정이 필요하며, 본 연구에서는 1/8000s 부터 1/100s 까지 다양한 노출시간에서 촬영하였다. 이렇게 생성한 광원 HDR 영상의 최대값을 측정환경에서의 최대 광량이라 간주하고, 이 환경에서 측정된 모든 HDR 영상들을 정규화하였다.

3.2. 톤-밸런싱과 변환모델 생성

3.1 절을 통해 HDR 영상을 [0~1]로 정규화 할 수 있지만, 바로 컬러차트의 색과 비교할 수는 없다. 왜냐하면 LDR 영상의 최대 픽셀값은 흰색을, 최소 픽셀값은 검정색을 의미하지만, HDR 영상의 최대 픽셀값은 흰색을 의미하지 않는다. HDR 영상의 픽셀값은 입사되는 광에 대한 비율로써, 최대 픽셀값은 그 측정환경에서 가장 크게 반사된 광량을 의미한다. 따라서 컬러차트의 색과 비교하기 위해서는 HDR 영상의 톤을 컬러차트와 맞춰주는 톤-밸런싱(tone-balancing)이 필요하다.

톤-밸런싱을 하기 위해 우선 컬러차트의 CIEXYZ 값을 분광광도계로 측정하여 데이터를 만든다. 그리고 흰색패치의 CIEXYZ 값과 HDR 영상의 흰색패치의 픽셀 값을 비교하여 비율을 계산하고, HDR 영상의 나머지 모든 패치에 이 비율을 적용한다. 마지막으로 톤이 맞춰진 HDR 영상과 컬러차트 간의 변환모델을 회귀분석을 통해 구한다. 이렇게 생성된 변환모델을 가지고 동일한 환경에서 측정된 모든 HDR 영상에 적용하여 컬러를 보정할 수 있다.

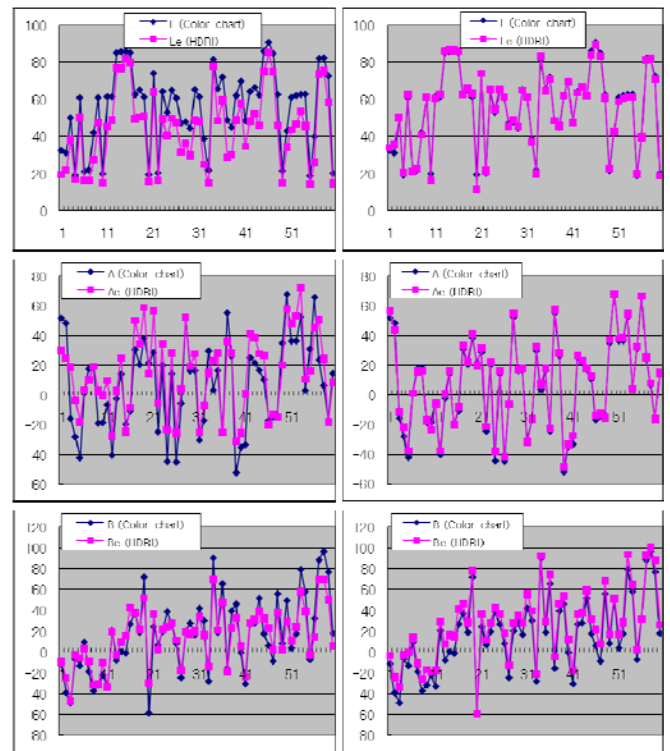
4. 결과

사람의 눈으로는 컬러를 비교할 수 없기 때문에 가장 균등한 색공간인 CIELAB 공간상에서 컬러오차를 계산하여 수치적으로 비교한다. 컬러 오차 ΔE 는 다음 <수식 1>로 계산한다.

$$\Delta E = ((L-L_e)^2 + (A-A_e)^2 + (B-B_e)^2)^{1/2} \quad (\text{수식 1})$$

<수식 1>의 L, A, B 는 각각 컬러차트의 CIELAB 값이고, L_e, A_e, B_e 는 컬러보정을 수행한 컬러차트 HDR 영상의 CIELAB 값이다.

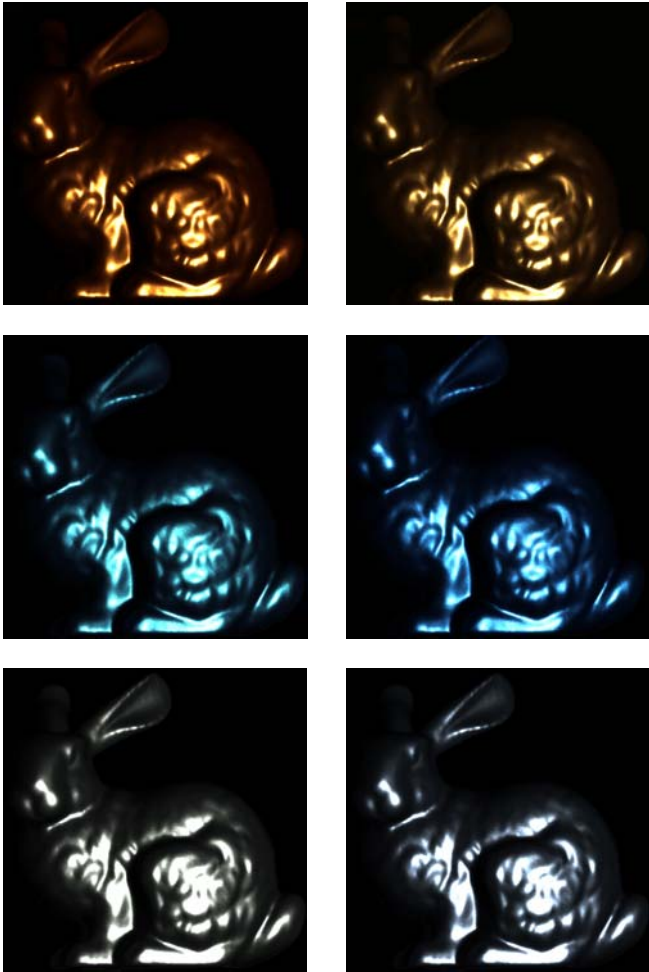
<그림 3>은 LDR-레벨 컬러보정 방법과 HDR-레벨 컬러보정 방법으로 차트의 HDR 영상의 컬러를 보정한 후, 컬러차트의 CIELAB 값과 비교한 그래프이다. <그림 3>의 그래프에서 볼 수 있듯이 HDR-레벨 컬러보정 방법으로 컬러를 보정했을 때가 좀 더 좋은 결과를 보여주고 있다. LDR-레벨 컬러보정 방법으로 보정한 HDR 영상의 평균 ΔE 는 22.8561 이었으며, HDR-레벨 컬러보정 방법의 경우에는 10.2698 로 더 좋은 결과를 보였다.



(그림 3) HDR-레벨 컬러보정을 수행한 HDR의 ΔE

<그림 4>는 HDR 영상을 통해 메탈릭 페인트 재질의 BRDF 를 계산하여 3D 모델에 렌더링 한 결과이다. <그림 4>의 왼쪽 그림들은 컬러보정을 하지 않은 HDR 영상으로 계산한 BRDF 를, 오른쪽 그림들은 HDR-레벨 컬러보정 방법으로 컬러를 보정한 HDR 영상으로 계산한 BRDF 를 렌더링 한 결과이다. 금색 재질의 경우 컬러보정을 하지 않은 경우 붉은 색을 띄고, 파랑색 재질의 경우 녹색을 띄며, 은색 재질의 경

우 노랑색을 띄는 경향이 있었으나, 컬러 보정 후에는 좀더 선명하게 컬러를 표현할 수 있었다.



(그림 4) HDR 영상으로 계산한 BRDF의 렌더링 결과

5. 결론

본 연구에서는 디지털카메라로부터 생성하는 HDR 영상의 컬러를 좀 더 정확히 보정하고자, HDR-레벨 컬러보정 방법을 제안하였다. HDR 영상을 생성 한 후에 컬러차트와의 변환 모델을 계산하기 위해 HDR 영상을 정규화 하고 톤을 맞추었다. 결과 그래프에서 HDR-레벨 컬러보정을 수행한 경우의 컬러오차가 낮은 것을 보였다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 실감방송 연구센터를 통한정보통신부 대학 IT 연구센터(ITRC) 사업의 지원과 광주과학기술원 실감콘텐츠 연구센터(ICRC)를 통한 과학기술부 특정연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

[1] P. E. Debevec and J. Malik, Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs, SIGGRAPH 97 Conf. Proc., Computer Graphics Annual Conf. Series,

pp. 369-378, Aug. 3-8, 1997.
 [2] M. A. Robertson, S. Borman, and R. L. Stevenson, Estimation-theoretic Approach to Dynamic Range Enhancement Using Multiple Exposures. *Journal of Electronic Imaging*, 12(2):219-228, April 2003.
 [3] S. Marschner, S. Westin, E. Lafortune, and K. Torrance. Image-based Measurement of the Bidirectional Reflectance Distribution Function. *Applied Optics*, 39(16):2592-2600, June 2000.
 [4] W. Matusik, H. Pfister, M. Brand, and L. McMillan. A Data-driven Reflectance Model. *Computer Graphics*, 37(Annual Conference Series), 2003.
 [5] Johannes Guenther, Tongbo Chen, Michael Goesele, Ingo Wald, and Hans-Peter Seidel, Efficient Acquisition and Realistic Rendering of Car Paint, *Proceeding of Vision, Modeling, and Visualization 2005*, pages 487-494, 2005.
 [6] Hendrik P. A. Lensch, Michael Goesele, Philippe Bekaert, Jan Kautz, Marcus A. Magnor, Jochen Lang and Hans-Peter Seidel, Image-Based Reconstruction of Spatial Appearance and Geometric Detail, *ACM Transactions on Graphics* 22, 2, pages 234-257, 2003.
 [7] Xin Tong , Jiaping Wang , Stephen Lin , Baining Guo , Heung-Yeung Shum, Modeling and rendering of quasi-homogeneous materials, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, v.24 n.3, July 2005.
 [8] Kang H. R., Color Scanner Calibration, *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 36, No. 2, pp.162-170, 1992.
 [9] Vrhel M. J., and H. J. Trussell, Color Device Calibration: A Mathematical Formulation, *IEEE Transaction on Image Processing*, Vol. 8, No. 12, Dec. 1999.
 [10] G. Hong, M. R. Luo and P. Rhodes, A Study of Digital Camera Colorimetric Characterisation Based on Polynomial Modeliing, *Color Research and Application*, Vol. 26, No. 1, 76-84, Feb. 2001.
 [11] Goesele, M., Heidrich, W., and Seidel, H. Color Calibrated High Dynamic Range Imaging with ICC profiles, *Proceedings of the Ninth Color Imaging Conference*, 286-290, 2001.
 [12] Validation of Color Managed 3D Appearance Acquisition, Michael Goesele, Hendrik P. A. Lensch, and Hans-Peter Seidel, *Proceedings of the 12th IS&T Color Imaging Conference*, Scottsdale, Arizona, USA, November, 9-12, 2004, 265-270..