

측정 기반 BRDF 데이터를 이용한 실감재질표현 연구

Realistic representation based on measured BRDF data

유현진, Hyun Jin Yoo, 김강연, Kang Yeon Kim, 김희민, Hoe Min Kim, 서명국, Myoung Kook Seo,
고광희, Kwang Hee Ko, 이관행, Kwan H. Lee

광주과학기술원 기전공학과

요약 그래픽스 분야에서 다양한 재질을 사실감 있게 표현하려는 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 다양한 재질의 반사특성을 측정하는 방법들이 시도되고 있다. 본 연구에서는 디지털 카메라를 이용하여 영상 기반 양방향 반사 분포함수(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)를 획득할 수 있는 측정 시스템을 구축하였다. 이를 통한 BRDF 모델은 경험적(empirical) 혹은 물리(physical)기반의 모델에 비해 보다 사실성 높은 표현이 가능하다. 영상 기반으로 양방향 반사 분포함수를 생성하는 과정에서 노출시간을 달리한 여러 장의 영상을 가지고 HDR(High Dynamic Range) 영상을 생성하였다. 또한 원색재현을 위해 표준광원을 사용하고 컬러차트와 회귀분석을 통해 컬러 보정을 수행하였다. 본 연구에서는 플라스틱이나 금속재질같이 불투명한 등방성(isotropic) 재질을 사용하였고, 이러한 재질의 BRDF 데이터를 통해 산업제품에서 많이 사용되는 재질의 모델을 보다 실감나게 렌더링(rendering)할 수 있다.

핵심어: BRDF, HDRI, Color characterization

1. 서론

기술 발전의 속도가 빨라짐에 따라 모든 산업제품의 개발주기가 짧아지고 있으며, 품질에 있어서도 지속적인 향상을 보이고 있다. 더불어 근래에는 제품의 디자인과 외관에 대한 요구가 더욱 고급화 되어 가고 있다. 제품의 외관을 디자인할 때에 기존의 치수와 색상만을 사용하는 모델로는 다양한 요구에 부응하는 제품을 디자인 할 수 없게 되었다. 이제 신제품을 모델링 할 때 단순히 제품의 3차원 모델을 생성하는 프로세스로는 이러한 급변하는 제품개발환경에서 경쟁력을 가질 수 없게 되었다. 앞으로는 3차원 모델에 제품의 실감재질을 사실적으로 표현해 줄 수 있어야 제품 모델이 큰 부가 가치를 갖는 상황이 될 것이다.

사실감 있게 재질을 보고자 하는 기대는 산업제품뿐만 아니라 모든 분야에 적용되고 있다. 영화나 게임에서도 더욱 실감나는 재질을 표현하기 위한 노력이 지속되고 있으며, 그 예로 아바타 또는 디지털 액터의 얼굴 피부, 머리카락, 옷 등을 사실감 있게 표현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 산업제품에 주로 사용되는 재질에 대하여 BRDF 데이터를 이용하여 사실적으로 표현하는데 초점을 맞추었다. 핸드폰, MP3 플레이어와 같이 개인이 휴

대할 수 있는 전자제품의 범위는 더욱 증가하고 있으며, 근래에는 기호품으로서 고급화 또는 액세서리화 되는 경향을 보이고 있다.

그래픽스 분야에서 다양한 재질을 사실감 있게 표현하려는 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 다양한 재질의 반사특성을 측정하는 방법들이 시도되고 있다. 전자제품의 외관은 주로 금속재질 또는 플라스틱 소재를 사용하며 표면을 페인트로 코팅하는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 이렇게 불투명하면서 등방성(isotropic)이고 균질(homogeneous)한 재질의 BRDF 데이터를 획득하기 위해 디지털 카메라를 이용하여 영상기반 측정시스템을 구축하였다. 측정시스템으로부터 획득한 영상으로 BRDF 데이터를 생성하는 과정에서 실 세계의 넓은 빛의 범위를 모두 사용하기 위해 노출시간을 달리한 여러 장의 영상을 가지고 HDR 영상을 생성하였다. 또한 원색재현을 위해 측정단계에서 표준광원을 사용하며 컬러차트와 회귀분석을 통해 컬러 보정을 수행하였다. 이러한 과정을 거쳐 측정기반 BRDF 재질 데이터를 이용해 산업제품, 그 중에서도 휴대용 전자제품의 모델을 보다 실감나게 렌더링 할 수 있다.

2. 관련 연구

컴퓨터 그래픽스에서 기존의 텍스처 방식을 대신하여 보다 현실에 가까운 재질을 모델에 입히고자 사용되었던 BRDF 렌더링 방법이 점차 자동차 산업 등의 산업용 제품 렌더링에 응용되면서 그 범주를 넓혀가고 있다. BRDF 렌더링 기술을 활용한 전자제품의 가상 프로토타이핑(virtual prototyping) 또한 이러한 흐름에서 예외가 될 수 없으며 오히려 더욱 빠른 시간 안에 다양한 모델을 생산해야만 하는 전자 산업에 더욱 적합한 해결책이 될 수 있다. 이 장에서는 BRDF에 대해 간단히 기술하고, 기존에 제안된 다양한 BRDF 측정 시스템과 그 측정 원리 및 장단점에 대해서 살펴보고자 한다.

BRDF는 입사 각도(θ_i, ϕ_i)와 반사 각도(θ_o, ϕ_o)로 구성된 4차원 함수로 표현한다. 측정하고자 하는 재질의 특성에 따라 BRDF는 비등방성(anisotropic) BRDF와 등방성(isotropic) BRDF로 나뉜다. 비등방성 BRDF는 스크래치(scratch) 된 금속표면과 같이 걸 표면이 방향에 따라 균일하지 않은 재질의 반사특성을 나타낼 수 있으며, 등방성 BRDF는 모든 방향으로 표면특성이 균일한 재질의 반사특성을 나타내는 데 사용한다. 즉 걸 표면이 균일하여 빛이 어디에서 들어 오든지 재질 표면의 한 점의 법선(normal)을 기준으로 입사방향과 반사방향을 함께 회전시켜도 반사특성이 변하지 않는 경우에는 등방성 BRDF로 표현할 수 있다. 이 경우 법선을 중심으로 재질을 회전시켜도 반사특성이 변하지 않으므로, ϕ_i 와 ϕ_o 의 차이 값인 ϕ_{diff} 를 사용하는 3차원 ($\theta_i, \theta_o, \phi_{diff}$) 함수로 표현할 수 있다.

최근 수 년간 BRDF를 측정하는 다양한 시스템이 개발되었다. 이 장비들은 광원, 재질샘플, 디텍터(카메라)로 구성되어 있으며, 일반적으로 디텍터는 고정되어 있고, 광원이 재질샘플 주위를 회전하거나 재질샘플이 회전하도록 구성되어 있다. 아래에 BRDF를 측정한 몇 가지 중요한 연구에 대하여 기술한다.

한대의 카메라와 광원이 평면 재질 샘플을 중심으로 회전하면서 BRDF 데이터를 획득하는 전형적인 측정시스템[4]은 한 재질을 측정하는데 수 시간이 소요되는데, 이는 디텍터인 카메라와 컴퓨터간의 통신시간이 대부분을 차지한다.

Ward[1]는 한번의 측정으로 한 방향으로의 BRDF만을 얻을 수 있는 평면 재질샘플의 단점을 극복하고자, 반구형 거울과 어안렌즈를 장착한 디지털 카메라를 디텍터로 사용하였다. 이러한 방식을 통해 Ward는 한번의 측정으로 여러 방향의 BRDF 데이터를 얻을 수 있었다. 하지만 영상(image)의 가장자리에 비네팅(vignetting)이 발생하므로 획득한 전체 데이터를 후처리 과정 없이 사용할 수 없다는 단점을 안고 있다.

Ngan[5]는 실린더형 재질샘플을 사용하였는데, 등방형 BRDF와 비등방형 BRDF 두 종류의 데이터 모두 측정이 가능하며, 여러 가지 수학적 BRDF 모델(analytical

BRDF model)들과 비교하였다.

Marschner[3]와 Matusik[2]은 구형 재질 샘플의 주위를 회전하는 광원과 고정된 디지털 카메라를 이용하여 BRDF 데이터를 측정한다. 이러한 등방형 BRDF 측정방식은 구형 재질 샘플을 사용함으로써 한번에 여러방향의 데이터를 얻으므로 측정시간과 측정 영상의 수를 크게 줄이는 장점이 있다. 하지만, 구형 샘플의 사용으로 측정시스템을 단순화 시킬 수 있었으나, 정밀하게 가공된 구형 재질 샘플을 구하기 어렵고 비등방성 재질을 측정할 수 없다는 단점을 갖고 있다.

일반적인 디지털 카메라의 영상은 특정범위의 명암도(intensity)만 표현할 수 있는 LDR(Low Dynamic Range) 영상이며, 반사도로 결정되는 각 픽셀 값은 빛의 세기에 대해 비선형적이다. 디지털 카메라를 통해 정확한 BRDF를 획득하기 위해서는 디지털 카메라가 실 세계에서 반사되는 빛의 명암도 범위(intensity range) 전체를 표현하고, 또한 픽셀 값이 빛의 세기에 명암도에 대해 선형적이어야 한다. 이를 위해서 보다 넓은 범위의 명암도 범위를 갖는 HDR(High Dynamic Range) 영상을 이용할 수 있다[6,7].

3. BRDF 데이터 측정 시스템

3.1 하드웨어 구조

등방성 BRDF는 일반적으로 3자유도를 가진 Goniorelectrometer를 사용하여 측정하고자 하는 재질 샘플의 방향을 조절하면서 디텍터로 BRDF 값을 측정한다. 본 연구에서는 <그림 1>과 같이 구형샘플을 중심으로 광원을 회전시키면서 디지털 카메라로 BRDF 데이터를 획득하는 측정시스템을 구축하였다.

한번의 측정으로 다수의 BRDF 데이터를 얻을 수 있도록 고해상도 디지털 카메라(Canon EOS 1D Mark II, 3,504x2,336)를 디텍터로 사용하고, 20W의 할로겐 램프를 재질 샘플을 중심으로 360도 회전할 수 있도록 고정밀 로터리 스테이지(SURUGA SEIKI Rotary Stage K402-75M, resolution 0.0025°/pulse)위에 고정시켰다. 할로겐 램프의 색온도는 3200K정도이며, 보다 정확한 색보정을 위해 색온도 필터를 사용하여 6500K로 변환시켜 측정하였다. 전자제품에 사용되는 다양한 재질 데이터를 얻기 위해 실제 산업현장에서 사용되고 또한 고려되고 있는 페인트를 도색한 구형 재질 샘플을 사용하였다.

모든 측정은 <그림 2>와 같이 암실에서 이루어졌으며, 측정 중 재질 샘플의 받침대나 주변 환경으로부터 반사되는 빛을 최대한 차단하기 위하여 측정에 사용된 모든 장비 또한 검은 천으로 가리웠다.

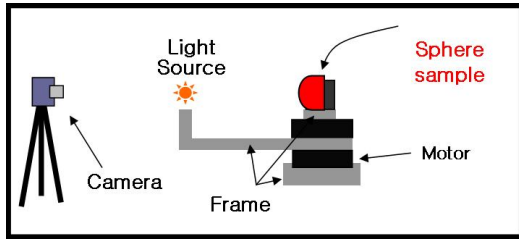


그림 1. 측정 시스템 개념도



그림 2. 측정 시스템 및 환경

3.2 광도 캘리브레이션(Photometric calibration)

디지털 카메라로 BRDF를 측정할 때 빛에 대한 디지털 카메라의 정확한 반응을 알아야 한다. 디지털 카메라로 대상을 한 번 찍어서 실 세계의 우리 눈이 감지하는 빛의 세기의 모든 범위를(dynamic range) 측정할 수는 없다. 실사에 가까운 모든 빛의 범위를 얻기 위하여, 노출시간을 달리하여 획득한 여러 장의 LDR 영상을 이용하여 HDR 영상을 생성하는 방법을 사용한다.[6,7] 이때 빛의 세기에 대한 디지털카메라의 반응이 선형적이지 않기 때문에 정확한 반사도 측정을 위해 적절한 보정을 해주어야 한다. HDR 영상으로 카메라의 빛에 대한 반응을 보정하는 것만큼, 색에 대한 보정 또한 중요하다. 일반적으로 컬러보정은 광원조건을 고정시켜 놓은 상태에서 측정된 영상에서 수행한다.[8,9] HDR 영상을 생성하기 전에 컬러보정을 수행하게 되면, 빛의 양이 아주 많은 범위와 아주 적은 범위에서의 컬러보정은 톤 보정이 없으면 오히려 색의 오차만 더하게 된다. 따라서 본 연구에서는 HDR 영상을 생성한 후 컬러보정을 수행하였다.

3.2.1 HDR를 이용한 카메라 특성 곡선

디지털 카메라를 BRDF측정도구로 사용하려면 빛의 세기에 대한 디지털 카메라의 센서(CCD)의 반응이 선형적이어야 한다. 빛에 대한 카메라의 반응을 선형적으로 보정하기 위해 HDR 영상을 사용하는 경우가 많다.[6,7] 디지털 카메라는 일부 범위에 대해서만 측정이 가능하지만 노출시간을 달리해서 서로 다른 범위의 명암도를 갖는 여러 장의 영상을 조합하면 넓은 명암도 영역을 갖는 HDR

영상을 얻을 수 있다. 예를 들어 맑은 날에 실내사진을 촬영하였을 경우, 창 밖과 같이 아주 밝은 부분은 흰색으로, 실내에서 그림자가 드리워지는 어두운 부분은 검정색으로 포화(saturation)되지만, 노출시간을 달리하여 촬영한 여러 장의 영상을 조합하면 창 밖과 그림자가 지는 부분이 모두 포화되지 않은 영상전체가 선명한 HDR 영상을 구할 수 있다.

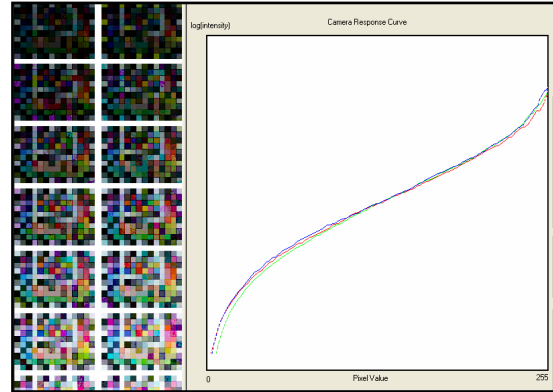


그림 3. 카메라 특성 곡선

BRDF는 입력 광에 대한 반응 함수이고, 디지털 카메라로 이 반응을 감지해야 하므로, 디지털 카메라를 디텍터로 사용하기 위해서 들어오는 빛의 양에 대해 선형적으로 반응해야 한다. 하지만 CCD의 고유적 특성 때문에 대부분의 디지털 카메라의 특성 곡선은 선형적이지 않고 감마곡선을 따른다. 본 연구에서는 노출시간 1초에서 1/100초까지의 22장의 LDR 영상으로 HDR 영상을 생성하면서, <그림 3>과 같은 카메라의 특성 곡선을 복원하였고, 카메라로부터 촬영되는 모든 LDR 재질 영상을 들어오는 빛에 대해 선형적으로 보정한다.

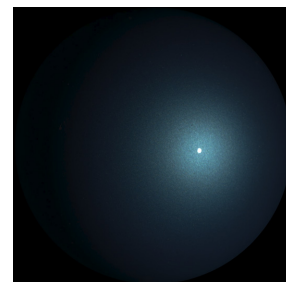
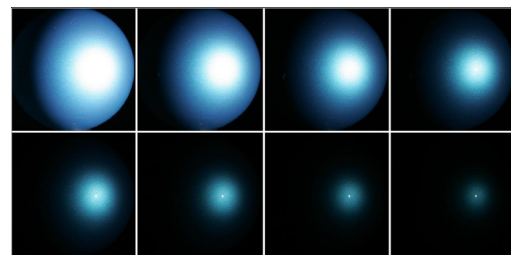


그림 4. 노출시간을 달리한 LDR영상들과 가시화 된 HDR영상

<그림 4>는 노출시간을 달리하여 획득한 메탈릭 페인트 재질의 LDR 영상들과 <그림 3>의 카메라 특성 곡선(camera characteristic curve)을 이용하여 생성한 HDR 영상의 톤맵핑 결과를 보여준다.

3.2.2 컬러 보정

디지털 카메라로부터 획득한 결과는 Red, Green, Blue 각 채널에 대한 값의 조합으로서, 이는 빛에 대한 반응임과 동시에 재질의 색상 정보를 나타낸다. 따라서 측정된 색상정보는 원래의 재질 정보를 동일하게 표현해 주는 것이어야 한다. 그러나 이러한 원색 재현을 성공적으로 수행하기 위해서는 장비의 특성을 잘 파악하여야 한다. 각 장비가 동일한 색공간을 가졌으면 좋겠지만, 모든 장비들은 각기 다른 그 장비만의 색 공간을 갖는다.[10] 한 물체를 카메라로 측정했을 때와, 이것을 모니터로 볼 때, 그리고 모니터에 보이는 영상(image)을 프린터로 출력했을 때 모두 조금씩 다른 색의 영상을 보게 되는 것이 바로 이 때문이다. 카메라로 획득한 영상의 픽셀 값은 그 카메라의 색 공간에서의 RGB값이지 원색이 아니다. 따라서 각 장비에서 표현되는 영상의 색을 장비독립적 색 공간인 CIEXYZ(or CIELAB)상의 영상으로 표현함으로써 장비들 간의 컬러 왜곡을 줄일 수 있다. 이를 위해서 먼저 카메라의 컬러 특성을 파악하고 보정해야 하는데 이러한 과정을 컬러특성화라고 한다.

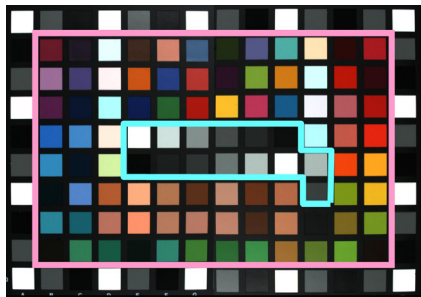


그림 5. Gretag MacBeth Digital ColorChecker Chart SG

컬러특성화를 위해서 먼저 특성화하고자 하는 장비인 디지털 카메라(Canon EOS 1D Mark II)를 이용하여 색 공간에 골고루 분포한 다양한 색상의 컬러패치들로 구성된 <그림 5>의 표준 컬러 차트(Gretag MacBeth, Digital ColorChecker Chart SG, Patch 개수: 140)를 측정한다. 각 컬러패치의 CIEXYZ(or CIELAB)값을 분광광도계(Spectrophotometer)를 이용하여 측색한 후, 디지털 카메라로부터 얻은 RGB 데이터를 실측데이터인 CIEXYZ로 변환하는 모델을 생성한다. 본 연구에서는 분광광도계로 Gretag MacBeth의 Eye-one Pro를 사용하여 D50에서의 모든 패치의 분광분포도 및 CIEXYZ, CIELAB를 측정하였고, CIE 표준 공식에 적용하여 D65에서의 CIEXYZ, CIELAB 또한 계산하였다. 변환모델을 생성하기 위해서

는 컬러차트를 측정할 때의 광원조건과 보정할 영상을 생성할 때의 광원조건이 동일하여야 한다. HDR 영상은 하나의 정해진 광원조건하에 생성되는 것이 아니다. 그렇기 때문에 노출시간을 달리한 채 측정된 영상을 각각 보정한 후 생성된 HDR 영상의 경우, 광량이 많은 영상과 적은 영상은 색의 포화로 인하여 색에 대한 정보가 거의 없기 때문에 보정모델을 적용할 수 없게 된다.

따라서 본 연구에서는 노출시간을 달리한 채 측정된 22장의 LDR 영상을 HDR 영상으로 변환한 후 컬러 보정을 수행하였다. 변환모델을 생성하는 방법에는 선형모델, 신경망 회로이용 등이 있으나, 본 연구에서는 다중회귀분석을 이용하였다.

컬러차트의 패치는 총 140개로 이중 테두리에 위치한 44개의 흰색, 회색, 검정색 패치는 카메라의 비네팅(Vignetting)현상을 확인하기 위한 용도이기 때문에 컬러 보정에서는 사용하지 않는다. 나머지 96개의 패치 중 그레이 계열인 14개의 패치 역시 감마보정을 위해서만 사용하고, 변환 모델 생성에는 이들을 모두 제외한 82개의 패치중 60개를 랜덤하게 선택하여 사용하였다. HDR 영상의 R, G, B 값을 입력으로 하여 CIEXYZ의 X, Y, Z값으로 변환해주는 변환모델을 <수식 1>의 함수와 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_x(H_r, H_g, H_b) &= estX \\ f_y(H_r, H_g, H_b) &= estY \\ f_z(H_r, H_g, H_b) &= estZ \end{aligned} \quad (1)$$

$estX, estY, estZ$ 는 추정된 CIEXYZ의 X, Y, Z값이며 H_r, H_g, H_b 는 각각 HDR 영상의 R, G, B값이다. 독립변수인 H_r, H_g, H_b 를 조합하여 다양한 형태의 변환모델을 생성할 수 있다. 본 연구에서는 <수식 2>와 같이 11개의 독립변수들로 변환모델을 구성하였으며 SAS를 활용하여 각 항의 계수 $b_{1,1}, b_{1,2}, b_{1,3}, \dots, b_{3,10}, b_{3,11}$ 를 구했다.

$$\begin{aligned} estX &= b_{1,1}H_r + b_{1,2}H_g + b_{1,3}H_b + b_{1,4}H_rH_g + \\ & b_{1,5}H_rH_b + b_{1,6}H_gH_b + b_{1,7}H_r^2 + b_{1,8}H_g^2 + \\ & b_{1,9}H_b^2 + b_{1,10}H_rH_gH_b + b_{1,11} \\ estY &= b_{2,1}H_r + b_{2,2}H_g + b_{2,3}H_b + b_{2,4}H_rH_g + \\ & b_{2,5}H_rH_b + b_{2,6}H_gH_b + b_{2,7}H_r^2 + b_{2,8}H_g^2 + \\ & b_{2,9}H_b^2 + b_{2,10}H_rH_gH_b + b_{2,11} \\ estZ &= b_{3,1}H_r + b_{3,2}H_g + b_{3,3}H_b + b_{3,4}H_rH_g + \\ & b_{3,5}H_rH_b + b_{3,6}H_gH_b + b_{3,7}H_r^2 + b_{3,8}H_g^2 + \\ & b_{3,9}H_b^2 + b_{3,10}H_rH_gH_b + b_{3,11} \end{aligned} \quad (2)$$

D65 광원 조건으로 3.2절에서 구해진 컬러 차트의 HDR 영상의 컬러 보정 모델은 <그림 6>와 같다.

0.474	0.234	-0.049	0.849	-0.312	-0.098	-0.081	-0.137	0.271	0.106	-0.043
0.268	0.493	-0.108	0.655	-0.160	-0.032	-0.127	0.111	0.152	-0.030	-0.045
0.044	0.018	0.593	0.210	-0.011	0.849	-0.080	-0.372	-0.002	-0.039	-0.034

그림 6. 컬러 보정을 위한 변환 모델

디지털 카메라뿐 아니라 모든 컬러 관련 장비는 각 장비만의 장비 종속적 색공간이 있기 때문에, 보정된 결과를 모니터나 다른 디스플레이 장치를 통해 눈으로 비교하는 것은 정확한 비교 방법이 될 수 없다. 따라서 <수식 3>과 같이 정의된 색차(Color difference) ΔE 로 표현하며, 본 연구에서의 평균 색차와 최대 색차는 각각 3.253, 12.783이며 색차의 히스토그램은 <그림 7>과 같다.

$$\Delta E = [(L - estL)^2 + (A - estA)^2 + (B - estB)^2]^{1/2} \quad (3)$$

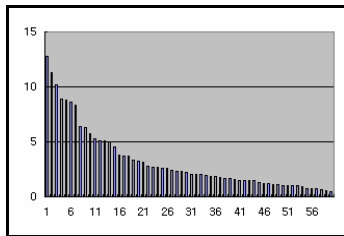


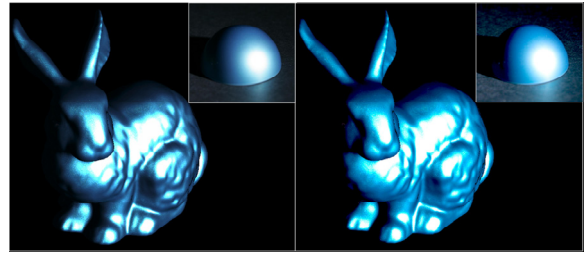
그림 7. 컬러차트 HDR 영상의 색차 히스토그램

4. BRDF 재질 데이터 획득

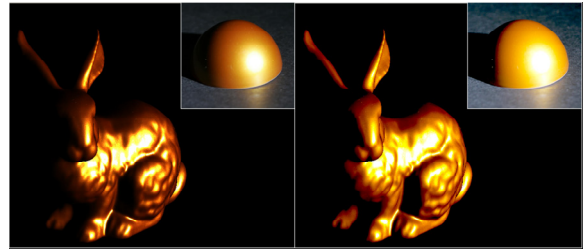
BRDF 측정을 위한 과정은 다음과 같다. 먼저 구형 재질 샘플을 전동 스테이지의 회전축에, 광원은 전동 스테이지가 연결된 바의 끝 단에 위치시킨다. 이후 광원을 카메라 반대편에서 카메라 방향으로 5도씩 회전시키며 LDR 영상을 획득한다. 디지털 카메라로 획득된 LDR 영상을 통해 HDR 영상을 얻고자 광원을 5도씩 회전시킬 때마다 노출 시간(1초~1/100초)을 달리한 채 22장의 영상을 촬영하고, 이 들을 이용하여 1장의 HDR 영상을 생성하였다.

5. 렌더링 결과

<그림 8>은 플라스틱 재질에 산업제품에서 주로 사용되는 메탈릭 페인트(metallic paint)로 밝은파랑과 금색이 도색된 반구형 재질 샘플과 동일 재질 샘플의 BRDF를 측정하여 렌더링한 결과이다. 또한 <그림 8>에서 컬러보정 전후의 차이를 볼 수 있다.



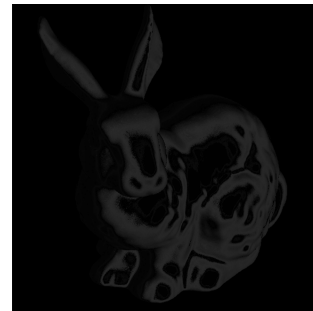
[컬러 보정 전] [컬러 보정 후]
<밝은 파랑 메탈릭 페인트>



[컬러 보정 전] [컬러 보정 후]
<금색 메탈릭 페인트>

그림 8. 메탈릭 페인트 재질과 렌더링 결과
(재질 샘플: 삼성전자 디자인 연구 센터 제공)

HDR 영상의 컬러 보정 결과의 차이를 보이기 위해 <그림 9>에 컬러 보정 결과 전후 영상의 차영상을 보인다. 두 영상에서 모두 포화가 일어난 영역을 제외한 부분에서의 컬러차이를 볼 수 있다.



< 밝은 파랑 메탈릭 페인트 >

그림 9. 컬러보정 전/후 HDR 영상 결과의 차영상

6. 결론

본 연구에서는 플라스틱이나 금속재질같이 불투명하면서 등방성(isotropic) 재질의 BRDF 데이터를 측정하기 위해 디지털 카메라와 할로겐 램프를 이용한 측정 시스템을 구축하였다. 디지털 카메라를 사용하는 대신 보다 넓은 범위의 빛을 다루기 위해 HDR 영상을 생성하고 또한 HDR 영상의 원색 재현을 위한 컬러보정을 수행하였으며, 측정시간을 단축하기 위해 반구형 재질 샘플을 이용하였

다. 본 연구에서 사용된 재질 데이터는 플라스틱 재질에 메탈릭 페인트가 도색된 것으로 이러한 데이터를 이용하여 산업제품에서 많이 사용되는 재질을 보다 실감나게 렌더링 할 수 있다.

본 연구는 진행중인 연구로서, 모든 광원 방향에서의 측정 데이터로부터 BRDF 데이터와 하나의 재질표면 텍스처맵을 분리하는 연구가 요구된다. 또한, 실외 장면이 없는 재질 HDR 영상을 원색 재현을 고려하여 디스플레이 하기 위한 적절한 톤 맵핑(Tone mapping)기법이 요구된다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] G. Ward. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. *Computer Graphics*, 26(Annual Conference Series):265-273, 1992.
- [2] W. Matusik, H. Pfister, M. Brand, and L. McMillan. A Data-driven Reflectance Model. *Computer Graphics*, 37(Annual Conference Series), 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] Murray-Coleman, J.F., A.M. Smith, The Automated Measurement of BRDFs and their Application to Luminaire Modeling. *Journal of the Illuminating Engineering Society*. Winter 1990.
- [5] Ngan A., Durand F., Matusik W., Experimental Analysis of BRDF Models, In *Eurographics Symposium on Rendering*, 117-126, 2005.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] Kang H. R., Color Scanner Calibration, *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 36, No. 2, pp.162-170, 1992.
- [10] Vrhel M. J., and H. J. Trussell, Color Device Calibration: A Mathematical Formulation, *IEEE Transaction on Image Processing*, Vol. 8, No. 12, Dec. 1999.