

BRDF 측정 및 표현을 위한 프레임워크

김해동*, 최병태*, 박태용**

*한국전자통신연구원, 가상현실연구부

**경북대학교, 칼라이미징연구팀

BRDF Measurement and Representation Framework

Hae-Dong Kim*, Byoung-Tae Choi*, and Tae-Yong Park**

*Virtual Reality Department, ETRI

**Color Imaging Lab., Kyungpook National University

E-mail : {hdkim, btchoi}@etri.re.kr, typark@m80.knu.ac.kr

Abstract

In this paper, we present a simple framework to measure BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function) values of objects and to render them using the values more realistically. There are lots of BRDF measurement methods, but the methods have been separated from the effective rendering of the values. Therefore, we suggest the framework which includes the BRDF measurement methods of objects and the effective rendering methods of the measured BRDF data. Before measuring the BRDFs, we do light sources analysis, camera calibration and display device characterization. After measuring them, we apply them to the characterized display device for rendering effectively and realistically.

하고 있다[1]. 그러나 실세계를 정확히 모델링 할 수 없어 여전히 실세계와는 구별됨으로, 이를 보완한 것이 실사를 이용한 텍스처 맵핑 방법이다. 그러나 텍스처 맵핑 방법도 텍스처 원본에 영향을 받으며, 텍스처 자체가 특정 광원의 영향에 의해 생성된 것이므로 그 한계성을 가지고 있다. 그리하여, 최근에는 이러한 한계성을 줄이려는 연구가 진행되고 있는데, 그 중 하나가 물체의 광학적 반사 특성(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)을 측정하여 렌더링 하는 방법이다[2-5].

I. 서론

요즘의 컴퓨터 발전 속도는 무어의 법칙(Moor's law)을 넘어설 만큼 빠르게 발전하고 있다. 그리고 휴대용 기기의 발전과 더불어 그래픽 카드 또한 놀랄만한 발전을 이루면서 이전엔 엄두도 내지 못한 사실적 영상을 만들어 내고 있다. 현재 사실적 표현(photorealistic rendering)에서 가장 널리 이용되는 것은 광선추적법(raytracing)이나 래디오시티(radiosity) 포톤추적법(photon tracing) 등으로, 실세계의 빛 에너지 전달 및 에너지 평형, 에너지의 흡수와 방출이라는 물리적 특성을 적용하여 실세계와 유사하게 표현하려

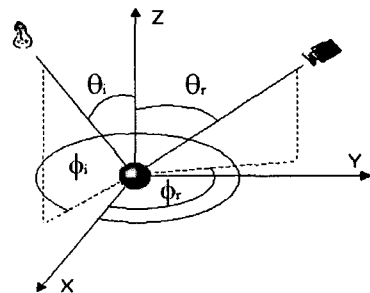


그림 1 극좌표계에서 BRDF 매개변수 관계
Fig. 1 Relationship among BRDF parameter
s on polar coordinates

그림 1은 극좌표계에서 BRDF 매개변수 관계를 나타낸 것이다. BRDF는 물체 색으로 나타나는 반사 성질을 표현한 것으로, 물체가 가지고 있는 기본 성질이다. 이러한 반사 성질은 광원의 위치 및 방향과, 관찰되는 위치 및 방향에 따라 달라지므로 이를 극좌표계로 표현하면 식 1과 같은 4차원 함수가 된다[2].

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\Delta E_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{\Delta E_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (식 1)$$

- 입사광의 Irradiance (E_i)
- 입사광과 표면 법선 사이각 (θ_i, ϕ_i)
- 반사광과 표면 법선 사이각 (θ_r, ϕ_r)
- 표면의 Radiance (E_r)

식 1은 일반적인 BRDF를 표현한 식이다. BRDF는 모든 방향으로 입사는 광원에 대한 모든 방향으로 반사하는 에너지를 측정하여 계산된 결과를 (식 1)과 같이 극좌표계에서 표현되는 4차원 함수($BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$)로 표현할 수 있고, 광원이 주어졌을 때 어디에서 측정하던지 물체의 반사 에너지를 계산해 냄으로써 물체가 어떤 밝기의 색으로 보여질 수 있는지를 시뮬레이션 할 수 있다.

BRDF 측정에 관한 최근 연구들은 이미지 처리를 통한 획득 방법을 고려한다[3-5]. 우선, 이미지 처리를 위해서 카메라 캘리브레이션(camera calibration)을 수행하는데, 그 방법으로 미리 측정된 반사 정보표(Macbeth color checker)를 이용하는 방법과 광학 측정 장치(회도계)를 이용하는 방법 등이 있다. 반사 정보표를 이용하는 것은 그 표가 획득 환경을 재현하여 측정하지 않으면 미리 측정된 정보에 대한 상대적 해석만이 가능하지만, 광학 측정 장치를 이용하면 절대적 해석이 가능하다는 장점이 있다[4].

기존의 방법에서는, BRDF를 획득할 때 조명의 변화에 대한 고려 없이 정해진 조명환경에서 측정함으로써 획득하고 있는데, 조명변화를 고려함으로써 보다 정확한 값을 획득할 수 있다. 그리고 카메라의 색 표현 방법에 따라 다르게 해석될 수 있는데 기존 방법론에서는 주로 제시되지 않고 있고, 획득된 BRDF 값을 디스플레이 장치의 표현 특성에 대한 고려가 없으면 디스플레이 장치에 따라 표현 오차가 발생할 수 있다.

따라서, 본 논문에서 제안한 프레임워크는 크게 BRDF 획득 과정과 이를 표현하는 과정으로 기존 제안되었던 과정[5]을 단순화하여 구성한다. 제안된 프레임워크에서 BRDF 데이터 획득은 카메라에 의해 획득된 이미지 정보를 이용하므로, 카메라 특성화를 통해 광원 변화에 따른 해석과 표준화된 색에 대한 해석을 통해 보다 정확한 BRDF 획득 방법과, 획득된 정보를 일관되게 표현할 수 있도록 디스플레이 장치에 대한 특성화를 통해 정확히 물체 표현 방법을 제공한다.

II. BRDF 측정 및 재현 프레임워크

본 논문에서 제안한 프레임워크는 크게 BRDF 획득

과정과 이를 표현하는 과정으로 구성된다. 그림 2에 보인 것처럼, 우선 표준 패치에 의해 광학 측정 장치를 캘리브레이션한 후 광원에서 방출하는 에너지를 측정하고, 디지털 카메라 특성을 측정하는 캘리브레이션 과정을 거친 후, 위 과정에 획득된 광원 및 카메라 특성 정보를 이용하여 카메라에 의해 획득된 이미지를 해석함으로써 BRDF를 계산해 내는 BRDF 획득 과정과, 그 결과를 표현 상황에 맞게 해석하여 BRDF 값을 구하고 그 결과를 디스플레이 장치의 특성을 적용하여 물체를 표현하는 과정으로 구성된다.

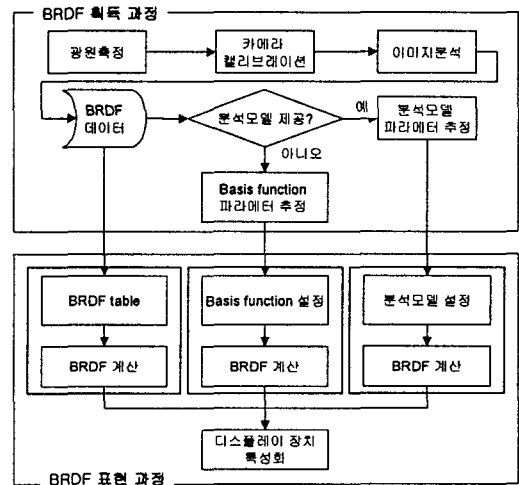


그림 2 BRDF 측정과정 및 재현 프레임워크
Fig. 2 BRDF measurement process and representation framework

광원에 대한 측정은 표준 패치에 의해 광학 측정 장치를 캘리브레이션한 후 방출하는 에너지를 측정하고, 광원 조절 장치에 의해 광원의 세기를 조절하면서 그 방출 에너지를 동일하게 측정한다.

카메라 캘리브레이션 과정은 카메라가 감지하는 색 및 밝기에 대한 민감도를 측정하여 계산이 편리한 선형 색 값으로 변경하는 과정(radiometric calibration)과, 물체의 관찰 위치 및 방향을 결정하는 과정(geometric calibration)으로 구성된다. 카메라의 색 민감도에 대한 측정 방법은 표준 패치를 이용하여 카메라의 고정된 노출과 조리개 상태에서 디지털 카메라가 취득하는 이미지 픽셀 값과 광학 측정 장치의 측정값을 비교함으로써 빛 세기에 대한 관계를 구하고, 다항식 모델(polynomial modeling)에 의한 오차 최소화 방법에 의해 카메라 색을 표준색으로 변환하여 산술 계산이 가능하도록 처리한다.



그림 3 카메라 칼라 특성화 과정
Fig. 3 Camera color characterization process

그림 3은 카메라 캘리브레이션 과정 중 하나인 카메라 칼라 특성화 과정이다. 먼저 알려진 광원에서 칼라 차트를 세팅하고, 디지털 카메라에서 칼라 차트를 인식하는 값을 획득하여 사전 캘리브레이션된 디스플레이 장치에서 인식된 RGB값을 계산함으로써 RGB와 XYZ 함수 관계를 계산할 수 있다. 그리고 RGB와 XYZ 함수 관계를 구하기 위해 다항식 모델에 의해 카메라 색을 표준색으로 변환하도록 처리한다[6-8]. 즉, 아래 (식 2)와 같이 RGB값으로 XYZ를 추정하는 식을 이용하여, Y, Z에 대해서도 구한다.

$$X(R,G,B) = a_{x,1}R + a_{x,2}G + a_{x,3}B + a_{x,4}RG + a_{x,5}GB + a_{x,6}BR + a_{x,7}R^2 + a_{x,8}G^2 + a_{x,9}B^2 + a_{x,10}RGB + a_{x,11} \quad (\text{식 2})$$

$$P = aV \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x,1} & \dots & a_{x,n} \\ a_{y,1} & \dots & a_{y,n} \\ a_{z,1} & \dots & a_{z,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ \vdots \\ RGB \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{식 3})$$

그리고, (식 3)는 한 샘플에 대해 행렬식으로 표현한 것으로, 이 식을 통해 추정된 XYZ값을 구할 수 있고, 구해진 XYZ값은 측정된 XYZ값과 차를 계산하여 색차가 오차 허용 범위 내로 될 때까지 반복하는 polynomial regression 방식을 적용한다. (식 3)에서 V는 획득된 RGB값이고 P는 계산된 표준색 XYZ 값으로, 측정된 값 XYZ와 계산된 값 XYZ의 차가 최소화할 수 있도록 오차 최소화 방법에 의해 구해진 a행렬은 표준색으로 변환할 때 적용된다.

캘리브레이트된 카메라를 이용하여 주어진 물체를 선명하게 촬영하여 물체에 대한 이미지를 얻고, 카메라 캘리브레이션 정보를 이용하여 이미지 해석을 수행함으로써 BRDF를 구한다. 이를 위해 필요한 카메라의 측정 위치 및 방향 방법은 카메라에 의한 이미지 획득 때마다 수행되어 지는 것으로 최적의 위치 및 방향을 구하는 것이다. 카메라에서 획득된 이미지의 픽셀 정보와 그 카메라 정보로 3차원 모델링 데이터를 2차원 이미지 평면에 맵핑했을 때 그 대응점이 일치해야 함을 이용하여, 그 2차원 맵핑 시뮬레이션 결과와 획득된 이미지의 픽셀정보간 차의 거리가 최소가 되도록 카메라의 위치 및 방향을 근사시키는 방법을 사용한다. 이미지 해석은 위 카메라 캘리브레이션 과정이 완

료된 후 획득된 이미지 값을 반사되는 에너지 값으로 변환하고, 입사되는 에너지에 대한 반사되는 에너지의 비율을 계산하여 BRDF를 구한다. 특히, 이미지 해석은 각각의 이미지가 추가됨에 따라 이미지 데이터 모두를 포함할 수 있는 모델로 근사화하는 방법을 사용한다. 근사화 시키는 모델로 기본함수(basis function)들의 조합으로 구성할 수도 있고, 이용자의 요구에 따라 분석 모델(analytic model)로 알려진 풍(Phong)이나 토랜스-스페로우(Torrance-Sparrow) 모델과 같은 여러 분석 모델 중 하나를 선택하고 그 모델에 대한 매개변수(parameter) 값을 데이터에 근사하게 찾아주는 방법으로 사용할 수 있다. 이미지 데이터들이 추가됨에 따라 이들 정보에 가장 근사화시킬 수 있는 에러 최소화 방법(least square method)을 이용함으로써 보다 정확한 물체의 BRDF를 구할 수 있다.

다음은 획득된 정보를 이용한 물체의 표현 과정으로써, 디스플레이 장치 캘리브레이션은 미리 알고 있는 색 값을 디스플레이 장치에 의해 방출되어 광학 측정 장치의 측정되어지는 값을 비교함으로써 미리 알려진 색 값과 방출 빛 세기에 대한 관계를 구한다. 그리고 R,G,B 각 채널별로 최대 세기에 대한 상대값으로 변경하여 디스플레이 장치의 특성화 매개변수를 찾고, 표준색을 디스플레이 장치의 색 표현 방식에 맞게 변환하여 최종적인 물체 표현을 만들어 낸다. 다음 (식 4)는 디스플레이 장치 특성화에 필요한 DAC(Digital Analog Converter) 값을 모니터 RGB 값으로 변환하는 비선형 변환식으로, 실험 측정값에 대해 각 채널별 Kg 와 Ko, 그리고 T(gamma) 값을 구하므로써 표준색 값으로 변경할 수 있다. 여기서, C는 R,G,B 각 채널값을 대표한다.

$$C/C_{max} = [k_s \{d(2^n - 1)\} + k_o], C/C_{max} > 0 \quad (\text{식 4})$$

III. 프레임워크 구축 및 결과

본 논문의 BRDF 획득 장치 구성은 광원과 광원 세기를 조절할 수 있는 조명 조절 장치, 측정하고자 하는 물체와 그 물체를 모델링한 모델링 데이터, 물체를 측정하기 위한 디지털 카메라와 디지털 카메라 방향 조절을 할 수 있는 삼각대, 절대적인 값을 에너지 값을 측정하기 위한 광학 측정 장치와 그 측정 장치를 초기 설정하기 위한 값이 알려진 표준 패치 등으로 구성하여 BRDF 획득에 사용한다. 그리고 디스플레이 장치도 광학 측정 장치와 표준 패치를 이용하여 그 장치 고유의 특성을 고려하여 물체 표현함으로써 보다 사실적으로 표현한다. 특히, 카메라의 색 민감도에 대한 측

정 방법은 표준 패치를 이용하여 캘리브레이션된 광학 측정 장치의 측정값을 비교하는 과정으로 이뤄지고, 물체의 관찰 위치 및 방향 결정은 삼각대를 이용한 방향 결정과 이미지 처리에 의한 위치 결정으로 이뤄진다. 다음의 결과는 Eizo T692 (6500K)에 대한 RGB-XYZ 변환 행렬들과, DAC값을 모니터 RGB 값으로 변환하기 위한 비선형 변환식 (식 4)의 미지수를 구하기 위한 실험값이다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 55.88 & 34.48 & 20.14 \\ 30.20 & 71.50 & 10.00 \\ 4.34 & 15.42 & 105.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0243 & -0.0107 & -0.0034 \\ -0.0100 & 0.0190 & 0.0003 \\ 0.0008 & -0.0022 & 0.0098 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

| $d_x/d_{x,max}$ | $d_y/d_{y,max}$ | $d_z/d_{z,max}$ | X | Y | Z |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|
| 1 | 0 | 0 | 55.88 | 30.20 | 4.34 |
| 0 | 1 | 0 | 34.48 | 71.50 | 15.42 |
| 0 | 0 | 1 | 20.14 | 10.00 | 105.00 |
| 0.2 | 0.2 | 0.2 | 6.83 | 6.37 | 9.56 |
| 0.4 | 0.4 | 0.4 | 20.97 | 20.90 | 24.06 |
| 0.6 | 0.6 | 0.6 | 41.11 | 41.50 | 46.67 |
| 0.8 | 0.8 | 0.8 | 69.63 | 70.50 | 78.14 |
| 1.0 | 1.0 | 1.0 | 107.00 | 108.00 | 118.33 |

다음 그림 4는 획득된 BRDF와 BRDF 값을 해석하는 렌더링 모듈을 Maya shader로 만들어 테스트하고 있다.

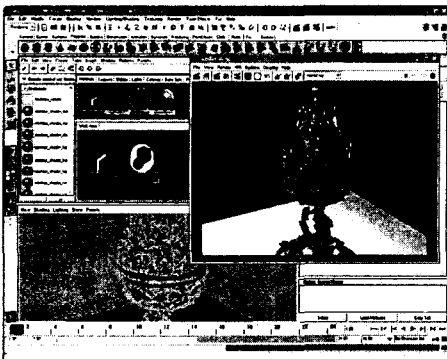


그림 4 BRDF값을 적용할 수 있는 Maya shader
Fig. 4 Maya shader to be able to apply BRDFs

본 논문에서는 BRDF 획득 과정과 이를 표현하는 과정으로 구성된 단순한 프레임워크를 제안했다. 제안된 프레임워크에서 BRDF 데이터 획득은 카메라에 의해 획득된 이미지 정보를 이용하므로, 카메라 특성화를 통해 광원 변화에 따른 해석과 표준화된 색에 대한 해석을 통해 보다 정확한 BRDF 획득 방법과, 획득된 정보를 일관되게 표현할 수 있도록 디스플레이 장치에 대한 특성화를 통해 정확히 물체 표현 방법을 제시했다. 특히, 조명 세기를 달리하여 BRDF를 측정하고, 카메라 색 표현 특성을 고려함으로써 표준화된 색에 대한 고려와 조명 변화에 따른 고려를 통해 기존 방법보다 정확한 BRDF 값을 획득한다. 그리고 획득된 정보를 잘 활용하는 방법으로, 디스플레이 장치에 대한 특성을 고려함으로써 사람의 눈에 의한 관찰과 유사하게 디스플레이 장치에도 물체를 사실적으로 표현하는 단순하지만 효과적인 방법을 제공한다.

현재는 제안된 프레임워크를 구현하고 있는 과정으로 앞으로 자동화되고 편리한 인터페이스를 고려하여 프레임워크를 완성하는 것이 필요하고, 보다 많은 결과의 비교도 필요하다.

참고문헌

- [1] Computer Graphics: principles and Practice, 2nd Ed. Addison Wesley, 1992.
- [2] Chris Wynn, "An Introduction to BRDF-Based Lighting", NVIDIA corporation
- [3] Szymon Rusinkiewicz, "A Survey of BRDF Representation for Computer Graphics", CS348C 1997
- [4] Lun Ke, "A Method of Light Reflectance Measurement", Master thesis 1999, The University of British Columbia
- [5] Donald P. Greenberg, et al, "A Framework for Realistic Image Synthesis", Proc. of SIGGRAPH 97, pp 477-494, 1997.
- [6] G. Hong, M. R. Luo, and P. A. Ronnier, "A Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling," COLOR research and application, Vol. 26, No. 1, pp. 76-84, Feb. 2001.
- [7] M. R. Pointer, G. G. Attridge, and R. E. Jacobson, "Practical camera characterization for colour measurement," The Imaging Science Journal. Vol. 49, No. 2, pp. 63-80, July 2001.
- [8] G. Hong, B. Han, and M. R. Luo, "Colorimetric Characterisation of Low-end Digital Camera and Its Application for On-Screen Texture Visualisation," Image Processing, 2000. Proceedings. 2000 International Conference on , Vol. 1, 10-13, pp. 741-744 Sept. 2000

VI. 결론 및 향후 연구