

BRDF 모델 비교: 측정 BRDF의 표현을 중심으로

이주행*, 김성수**, 박형준***

Comparing BRDF Models: Representation of Measured BRDF

Joo-Haeng Lee*, Sung-Soo Kim** and Hyungjun Park***

ABSTRACT

BRDF (bidirectional reflectance distribution function) is critical in realistic simulation of material appearances since it models the directional characteristics of reflection of light. Although many BRDF models have been proposed so far, it is still not easy to find one specific model that could represent all the reflection properties of real materials such as generalized diffusion, off-specular reflection, Fresnel effect, and back scattering. In this paper, we compare three BRDF models including B-spline volume BRDF (BVB), Cook-Torrance, and Lafortune in their ability to represent the measured BRDF data for physically-based rendering. We show that B-spline volume BRDF surpass the others in quality of data fitting and rendering, especially for materials without specular reflections.

Key words : BRDF, Rendering, B-spline volume, Cook-Torrance, Lafortune

I. 서 론

양방향 반사 분포함수(BRDF, bidirectional reflectance distribution function)는 물체의 표면에 입사된 한 방향의 빛에 대해 특정 방향으로의 반사율을 나타내는 물리적인 양이다. 컴퓨터 그래픽스의 렌더링 과정에서 물체의 표면에 설정된 재질감을 사실적으로 표현하는 이미지를 생성하게 되는데, 이 때 양방향 반사 분포 함수를 이용하여 재질감 고유의 물리적 반사 특성을 반영하게 된다^[1,2]. 그런데, 실제의 반사 현상은 매우 복잡한 양상을 나타내기 때문에, 이를 정확하면서도 간편한 함수로 표현하여 렌더링에 이용할 수 있도록 하는 많은 연구가 있었다. 특히 양방향 반사 분포 함수의 모델로 Blinn-Phong, Lafortune, Cook-Torrance 모델과 같은 수학적인 반사모델들이 개발되어 렌더링에 많이 사용되고 있다^[3].

최근에는 다양한 응용 분야에서 실제로 존재하는 복잡한 재질의 특성을 컴퓨터 그래픽스 영상으로 표

현하는 것을 요구하고 있다^[7]. 그런데, 이들 재질감은 기존의 수학적 반사 모델만으로는 표현이 어려운 경우가 많다. 최근에는 재질감 측정기술을 이용하여 재질 정보를 양방향 반사 분포함수 형식으로 획득하는 것이 가능해졌다^[4,5,6]. 예를 들어, 자동차의 가상 프로토타입에 대한 가시화를 위해서 외장용 페인트 및 내장재에 대해 측정(measured) BRDF를 사용하여 렌더링을 하거나^[7], 영화에서 옷감의 질감을 사실적으로 표현하기 위해서 측정 BRDF를 기반으로 셰이더를 제작하여 렌더링에 사용하고 있다^[1].

우수한 재질감 표현 능력에도 불구하고 측정 BRDF를 렌더링에 활용하는데 있어서의 가장 큰 문제는 원시 데이터의 크기에 있다. 예를 들어, 한 재질에 대한 측정 BRDF의 원시 데이터를 압축 없이 저장할 경우 그 용량은 33 Mbyte에 이른다^[5,8]. 이 정도 용량이면 한두 개의 측정 BRDF를 사용하는 간단한 장면에서는 문제가 없지만, 수십 개를 사용하는 복잡한 장면에서는 재질 정보만 수 Gbyte에 이르게 되고, 더욱이 네트워크 렌더팜이나 GPU를 사용하는 경우라면 문제는 더욱 커지게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 Lee와 Park^[9]의 최근 연구에서 B-spline volume BRDF (BVB) 기법을 소개하였는데, 이를 통해 측정 BRDF 데이터를 획기적으로 압축하면서도 고품질의 재질감

*중신회원, 한국전자통신연구원

**한국전자통신연구원

***교신저자, 중신회원, 조선대학교 산업공학과

- 논문부고일: 2009. 03. 05

- 논문수정일: 2009. 08. 28

- 심사완료일: 2009. 09. 01

표현이 렌더링에서 가능하게 되었다.

본 논문에서는 이전 연구에서 제안된 BVB 기법을 기존의 BRDF 기법인 Cook-Torrance 모델^[10] 및 Lafortune 모델^[11]과 비교하고자 한다. 비교 척도는 측정 BRDF 데이터를 맞춤(fitting)하는 능력과 렌더링에서 사용될 때 재질감을 재현하는 능력이다. 측정 데이터 맞춤을 위해서 BVB모델은 Lee-Park^[9]의 방법을 이용하고, Cook-Torrance와 Lafortune 모델에 대한 맞춤은 Ngan 등의 연구^[8] 결과를 이용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 BRDF의 기본 개념, 측정 BRDF의 특징, 비교 대상인 세 가지 BRDF 모델을 소개하고, 3절에서는 실험 절차를 소개하고, 4절에서는 데이터 맞춤과 렌더링 측면에서의 비교 결과를 제시하고, 5절에서는 논문을 맺는다.

2. BRDF의 소개

2.1 BRDF의 개념

양방향 반사 분포함수(BRDF, bidirectional reflectance distribution function)는 표면의 한 점 p 에 대해 빛의 입사 방향 ω_i 와 반사 방향 ω_o 의 함수로 정의된다^[12].

$$f(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{dL_o(p, \omega_o)}{dE(p, \omega_i)} \quad (1)$$

위에서 E 는 복사조도(irradiance)로서 단위면적당 입사 복사속(radiant flux)이고, L_o 은 복사휘도(reflected radiance)로서 단위 입체각(solid angle)당 단위 면적당 반사 복사속(reflected flux 또는 exitant radiance)를 의미한다. 즉, 한 점에서의 BRDF는 ω_i 방향으로 들어 온 빛에 의해 ω_o 방향으로 얼마나 많은 빛이 반사되는지를 나타낸다.

광선 추적법 기반의 렌더링에서 BRDF는 아래의 반사 방정식(reflection equation)을 정의하는 중요한 요소이다^[13]:

$$L_o(p, \omega_o) = \int_{\mathcal{H}} f(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

위 식에서 $L_o(p, \omega_o)$ 는 표면의 점 p 에서 ω_o 방향으로 반사되는 빛의 총량을 나타낸다. 이 값을 p 를 중심으로 하는 반구 \mathcal{H} 의 전방향에서 입사되는 빛 $L_i(p, \omega_i)$ 를 적분하여 얻는다. 이 때, $f(p, \omega_o, \omega_i)$ 는 두 방향에 대해서 반사의 정도를 결정하게 된다.

방향벡터 ω 가 구면좌표에서 위도와 경도의 쌍 (θ, ϕ) 로 표현된다고 하자. 입사 경도 ϕ_i 와 반사 경도 ϕ_o 의 차이($\phi_d = \phi_o - \phi_i$)가 같을 때 BRDF의 값도 같

다면 그러한 재질을 등방성(等方性, isotropic)이라고 하고, 경도 차이가 같더라도 ϕ_o 와 ϕ_i 의 실제 값에 따라 BRDF 값이 나르면 이방성(異方性, anisotropic) 재질이라고 한다. 보통의 재질들은 대부분 등방성이지만, 가공된 금속 표면과 섬세한 직물과 같이 복잡한 재질에서는 이방성이 나타난다.

표면의 고정된 한 점에서 등방성 BRDF는 $f(\theta_o, \theta_i, \phi_d)$ 로 표현되는 3차원 함수이고, 이방성 BRDF는 $f(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i)$ 로 표현되는 4차원 함수이다. 본 논문에서는 등방성 BRDF데이터의 효율적 표현 문제를 다루게 된다.

2.2 측정 BRDF

BRDF의 측정은 크게 분광계를 이용한 방법과 이미지 기반 방법으로 분류된다. 두 방법 모두 상용 시스템^[14]이 나와 있을 정도로 모두 성숙한 기술로 볼 수 있다. 특히, 이미지 기반 측정 방법은 장치의 가격대 성능비가 우수하여 연구용으로도 많이 채택되고 있다.

본 연구에서는 Matusik 등의 연구^[15]에서 이미지 기반 방법을 통해 측정하여 공개한 측정 BRDF 데이터베이스를 사용한다. 이 데이터베이스는 크롬, 나일론, 페인트, 옷감 등 다양한 재질에 대해서 총 100개의 등방성 재질에 대한 BRDF 측정 값을 담고 있으며, 한 재질당 크기는 약 33 Mbyte이다.

측정 BRDF의 원시 데이터는 보통 다음과 같은 표 형식으로 저장된다:

$$f(\theta_o = a_i, \theta_i = b_j, \phi_d = c_k) = f_{i,j,k} \quad (2)$$

위 식에서 인덱스는 아래와 같이 정의된다.

$$(i, j, k) \in [0, \dots, i_{\max}] \times [0, \dots, j_{\max}] \times [0, \dots, k_{\max}]$$

$$a_i = i \times \Delta\theta_o = i \times \pi / (2 \times i_{\max})$$

$$b_j = j \times \Delta\theta_i = j \times \pi / (2 \times j_{\max})$$

$$c_k = k \times \Delta\phi_d = k \times \pi / (2 \times k_{\max})$$

반사광의 컬러를 나내기 위해 식 (1)은 각 색상 요소(적, 녹, 청)에 대해 벡터 형식으로 표현된다.

$$\mathbf{F}(\theta_i = a_i, \theta_o = b_j, \phi_d = c_k) = \mathbf{F}_{i,j,k} \quad (3) \\ = (r_{i,j,k}, g_{i,j,k}, b_{i,j,k})$$

아래에서, 위와 같은 표 형식으로 저장된 측정 BRDF를 TFB(tabular-form BRDF)라고 부르기로 한다.

2.3 수학적 BRDF 모델

본 절에서는 BRDF를 표현하는 수학적 모델로서

많이 사용되고 있는 Cook-Torrance 모델과 Lafortune 모델을 설명한다. 아래에서, Cook-Torrance와 Lafortune 모델을 각각 CKT와 LFT로 부르기로 한다.

CKT 모델은 물체 표면의 물리적 특성에 기반하고 있으며, 컴퓨터 그래픽스에 응용 물리학을 결합한 기법이다^[10]. CKT 모델을 구성하고 있는 주요한 세가지 구성요소는 미세표면 모델(microfacet model)에 의한 분포 항 D , 입사각에 따른 반사율의 변화를 표현하는 프레넬 항(Fresnel term) F , 미세표면 모델에서 발생하는 그림자 등에 의한 음영효과를 표현하는 기하 감쇠항(geometric attenuation term) G 이며, 이를 이용하여 아래와 같이 정반사를 모델링 할 수 있다.

$$K = \frac{\rho_s \cdot D \cdot G \cdot F}{\pi(N \cdot L)(N \cdot V)}$$

위 식에서 기하 감쇠항 G 는 Torrance-Sparrow 모델과 동일하게 정의되며, 분포항 D 는 Beckmann 분포 함수를 이용한다. 프레넬 항 F 은 프레넬은 잘 알려진 프레넬 반사 함수나 이에 대한 근사 함수(아래 예는, Schlick의 근사)를 이용한다.

$$G = \min\left(1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)}\right)$$

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4(N \cdot H)} e^{-(\tan \delta)^2 / m^2}$$

$$F = F_0 + (1 - F_0)(1 - V \cdot H)^5$$

위 식에서 N 은 표면 점의 법선 벡터, L 은 광원 방향으로의 벡터, V 는 시점 방향으로의 벡터, H 는 V 와 L 의 중간벡터(half vector), ρ_s 는 정반사 계수, F_0 는 수직 입사각에 대한 프레넬 계수이다.

CKT 모델은 다른 모델에 비해 비교적 측정 BRDF 데이터 근사(fitting) 품질이 우수하지만, 물리적 특성 반영에 따른 좀 더 많은 계산을 요구한다는 단점이 있다.

LFT 모델은 풍(Phong) 모델을 일반화 하는데서 출발한다. 기본 구성 요소는 일반화된 풍 로브(lobe)이며, 다수의 일반화된 풍 로브의 합으로 BRDF 모델을 표현한다^[11]. 정반사 부분에 대한 수식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$K = \rho_s \cdot [C_m(l_x v_x + l_y v_y) + C_z l_z v_z]^m \frac{m+2}{2\pi[\max(|C_x|, |C_y|)]^m}$$

위 식에서 l 과 v 는 광원 벡터 L 과 시점 벡터 V 의 성분이며, m 은 풍 모델의 정반사 지수(specular exponent)와 같은 의미이며, 마지막 항은 근사를 위한

정규화(normalization) 목적으로 추가된 것이다. C_x 와 C_z 는 일반화된 풍 로브를 정의하는 LFT의 가상 특징적인 계수이다. 즉, 풍 로브의 중심축과 크기를 변형하여 좀 더 유연하게 반사의 특성을 표현할 수 있다.

LFT 모델은 간단하고 계산량이 적어 자주 사용되고 있지만, 프레넬 항을 고려하고 있지 않고 있기 때문에, ω 와 ω_0 가 표면과 평행이 되는 스킨각(grazing angle)에 가까워 질수록 높은 불일치 결과가 나온다는 단점이 있다.

CKT와 LFT 모델에서 난반사(diffuse) 부분은 램버트(Lambertian) 모델을 적용하고, 최종적으로 위의 정반사 부분과 더해져 반사율을 계산한다.

2.4 B-spline Volume BRDF 모델

비스플라인 볼륨 BRDF는 식 (3)의 TFB 데이터를 비스플라인 볼륨 형태로 근사하고, 렌더링 계산시에 주어진 각도에 대해서 비스플라인 볼륨식을 전개하여 BRDF 값을 얻는 방식이다. 이 방식은 CAGD 분야의 기법^[12-15]이 렌더링 내부에서 활용되는 흥미로운 예로 볼 수 있다.

매개변수 u, v, w 에 대하여 오너(차수+1) p, q, r 의 비스플라인 볼륨 $\mathbf{V}(u, v, w)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{V}(u, v, w) = \sum_{i=0}^{n_u} \sum_{j=0}^{n_v} \sum_{k=0}^{n_w} N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)N_{k,r}(w)\mathbf{v}_{i,j,k}$$
(4)

여기서, $\mathbf{v}_{i,j,k} \in \mathbf{R}^3$ 는 조정점이고, 매개변수 정의구역은 $u \in [u_{p-1}, u_{n_u+1}]$, $v \in [v_{q-1}, v_{n_v+1}]$, $w \in [w_{r-1}, w_{n_w+1}]$ 으로 주어진다. $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v), N_{k,r}(w)$ 은 각각 매개변수 u, v, w 방향의 노트벡터 $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ 상에서 정의된 정규화된 비스플라인 함수들을 나타낸다. 노트벡터 $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{U} = \{u_0, u_1, \dots, u_{n_u+p}\}$$

$$\mathbf{V} = \{v_0, v_1, \dots, v_{n_v+q}\}$$

$$\mathbf{W} = \{w_0, w_1, \dots, w_{n_w+r}\}$$
(5)

본 연구에서 다루고 있는 비스플라인 맞춤(fitting)의 문제는 $(i, j, k) \in [0, \dots, i_{\max}] \times [0, \dots, j_{\max}] \times [0, \dots, k_{\max}]$ 에서 측정된 BRDF 데이터 $\mathbf{F}_{i,j,k}$ 를 근사하는 비스플라인 볼륨 $\mathbf{V}(u, v, w)$ 을 구하는 것이다. Lee와 Park^[9]에서는 근사적 볼륨 로프팅(lofting) 기법으로 볼륨을 구하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서도 동일한 기법을 사용하여 측정 BRDF를 비스플라인 볼륨으로 표현한다.

Lee와 Park^[6]에서 얻어진 BVB 모델들은 거울 반사 성분이 없는 대부분의 측정 BRDF를 충실하게 표현할 수 있음을 보였다.

3. 실험 절차

3.1 재질 선택

실험을 위한 측정 BRDF 데이터는 Matusik 등의 연구^[5]에서 제공하는 100개의 재질을 기준으로 한다. CKT와 LFT 모델에 대한 맞춤 인수(fitting parameters)를 발표한 Ngan 등의 연구^[8]도 Matusik 등의 연구^[5]에서 공개된 측정 BRDF를 사용하고 있으나, 두 연구는 86개의 재질을 공통으로 사용하고 있기 때문에, 본 연구에서도 86개의 측정 BRDF를 대상으로 비교를 수행한다.

BVB 모델과의 비교를 위해 수학적 BRDF 모델들 중 CKT와 LFT 모델을 선택한 이유는 Ngan 등의 연구^[8]에서 CKT모델의 품질이 측정 BRDF 표현에서 최상위권이었고, LFT 은 중상위권으로 평가되었기 때문이다.

3.2 데이터 맞춤 수행

비교 대상인 세가지 BRDF 모델에 대해서는 2절에서 언급하였다. CKT와 LFT모델의 인수는 Ngan 등의 연구^[8]에서 수행한 비선형 맞춤 결과를 동일하게 활용한다. 86개의 재질에 대해서 BVB는 동일하게 $21 \times 21 \times 81 = 35,721$ 개의 제어점으로 정의되며, 각 차원에 대해서 3차이다. 이 경우 하나의 BVB파일의 크기는 약 839 Kbyte이다.

한가지 주목할 것은, Ngan 등의 연구^[8]에서는 스치각(80도에서 90도 사이)에 대해서는 무시하고 맞춤을 수행하였다. 하지만, Lee와 Park의 연구^[6]와 BVB 맞춤에서는 전체 각도(0도에서 90도)를 모두 고려하였다.

3.3 렌더링

렌더링 실험을 위해서는 PBRT 렌더러^[1]를 사용하였다. 이 렌더러는 고급 렌더링 기법이 잘 구현된 오픈 소스 기반 렌더러이며, 특히 기능 확장성이 매우 뛰어나다. 렌더링 방식은 직접 조명에 대해서 분산 광선 추적 기법을 깊이 4로 사용하였고, 픽셀 빛 조명은 각각 32와 64개의 샘플링을 사용하였다. BRDF의 샘플링을 위해서, TFB와 BVB는 코사인 반구(cosine-weighted hemisphere) 샘플링 기법을 사용하고, CKT와 LFT는 수학적으로 정의된 샘플링 함수를 사용하

였다^[12].

참조가 되는 TFB를 포함하여 네 종류의 BRDF 모델은 PBRT와 연동되는 웨이더로 구현되었고(C++ 기반 DLL), 3.2 절에서 준비된 재질별 맞춤 인수(fitting parameters)를 입력하여 구체적인 재질감을 표현하게 된다.

4. 비교 결과

이 절에서는 3.1절의 86개 측정 BRDF 데이터에 대해서 BVB, CKT, LFT 모델을 이용하여 3.2절의 데이터 맞춤과 3.3절의 렌더링을 수행한 결과를 비교 분석한다.

4.1 데이터 맞춤 성능

데이터 맞춤의 성능은 TFB를 기준으로 각 모델과의 에러를 구하여 측정한다. 에러의 종류로는 RMS(root mean square), 상대(relative) RMS, 최대(max), 상대 최대(relative max) 에러를 구한다. 상대 에러는 최대값을 기준으로 정규화 된 에러이다.

에러는 가능한 모든 각도($91 \times 91 \times 360 = 2,981,160$)에 대해서 계산하는 것이 맞으나, CKT의 에러가 스치각에서 폭증하여, 0도에서 80도까지만 계산을 하였다.(Ngan 등의 연구^[8]의 데이터 맞춤도 스치각을 제외하고 수행되었다.)

Fig. 1에서 4는 86개의 재질에 대해서 네 가지 종류의 에러(RMS, 상대 RMS, 최대, 상대 최대 에러)를 구한 그래프를 보여준다. 가로축은 각 재질을 의미하며, 세로축은 에러값의 로그 값을 나타낸다. 네 그래프는 모두 BVB의 RMS에러를 기준으로 정렬되어 있다.

Fig. 1에서 약 절반의 재질에 대해서 BVB가 매우 적은 에러를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 다른 절반의 재질은 매우 큰 거울 반사(specular reflection)성분이 있는 재질로서 수학적인 BRDF 모델로는 정확히 표

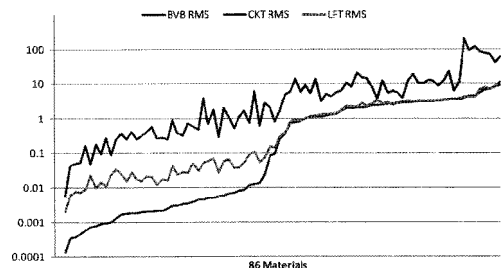


Fig. 1. RMS error of model fitting to measured BRDF data.

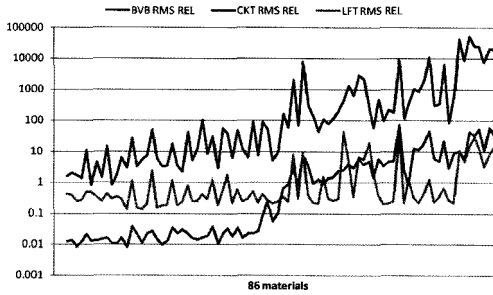


Fig. 2. Relative RMS error of model fitting to measured BRDF data.

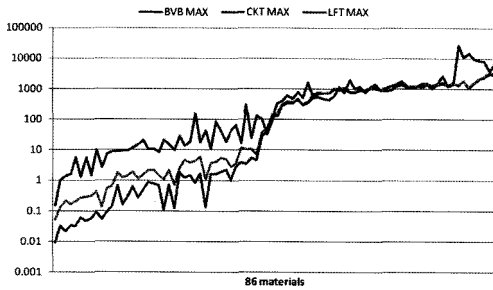


Fig. 3. Max error of model fitting to measured BRDF data.

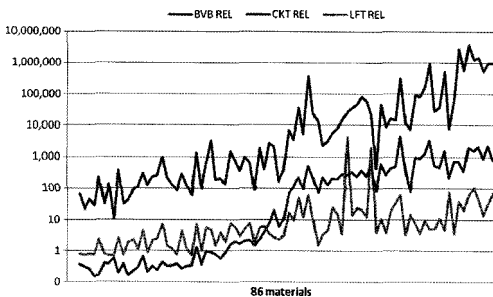


Fig. 4. Relative max error of model fitting to measured BRDF data.

현이 어려운 재질이다. 이 재질들에 대해서는 LFT와 BVB가 유사한 에러 양상을 보이지만, 다른 세 종류의 에러에 대해서는 BVB와 LFT 에러가 연동되는 양상이 발생하지는 않는다. 예를 들어, BVB의 RMS로 정렬된 Fig. 2의 상대 RMS 에러에서 BVB와 LFT의 에러가 유사한 양상이 아님을 알 수 있다. Fig. 2와 4의 상대 에러에서 LFT의 에러가 BVB보다 적게 나타나는 재질이 있지만, 이는 위에서 언급한 것처럼 80이상의 스킵각을 고려하지 않았기 때문이다.

다음에서는 “나일론” 재질에 대해서 측정 BRDF에 대한 맞춤 결과를 통해 각 모델들의 측정 BRDF 표현 능력을 설명한다.

나일론 재질은 거울 반사가 없지만 스킵각에서 퍼

짐이 존재하는 특이한 재질로 BVB 맞춤이 쉬운 편은 아니다. Fig. 1에서 나일론은 RMS 에러 순위 43위로, BVB 관점에서는 에러가 매우 크고, 따라서 표현이 어려운 재질에 해당한다. 하지만, Fig. 5에서, 다른 모델들은 나일론을 표현하는데 더 많은 어려움을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 5(a)의 LFT는 거울 방향으로의 반사와 퍼짐을 전혀 표현하지 못하고 있고, Fig. 5(b)의 CKT는 빛의 퍼짐을 표현하지 못하고 있다.

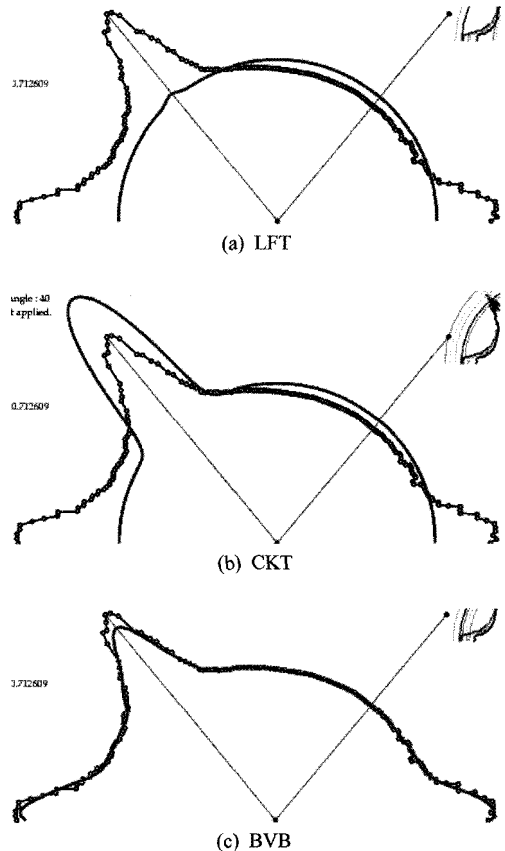


Fig. 5. Comparison of sectional views of iso-meshes of fitted BRDF models for nylon material ($\theta = 47^\circ$, cubic root applied). Black lines denote measured BRDF data, and red lines denote fitted model data.

Fig. 5에서 도식된 로브(lobe)는 Ngan 등의 연구^[8]에서와 같이 cubic root를 적용한 것으로, CKT와 LFT의 에러가 축소되어 보이는 효과가 있다. 하지만, Fig. 6에서와 같이 cubic root를 제거하고 로브를 나타내면 절대 에러의 크기가 매우 심각하고, 따라서 맞춤의 품질도 매우 낮음을 알 수 있다.

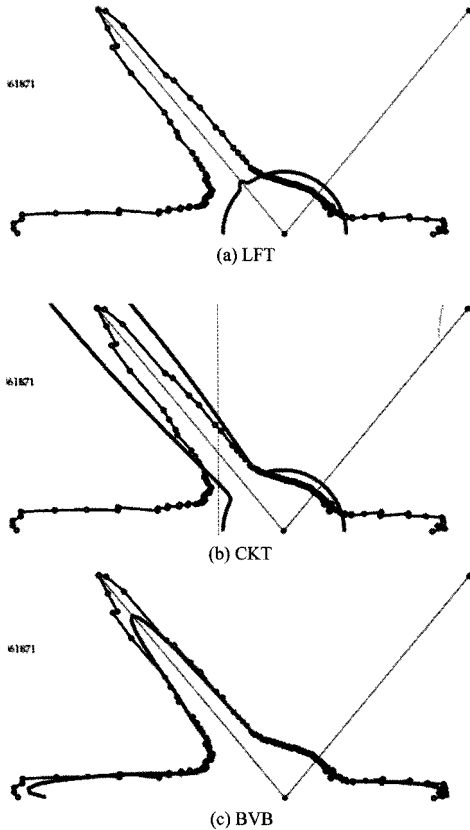


Fig. 6 Comparison of sectional views of iso-meshes of fitted BRDF models for nylon material ($\theta_i=47^\circ$, cubic root not applied).

4.2 측정 재질감 표현 능력

재질감 표현 능력은 렌더링된 이미지의 픽셀단위 RMS 에러를 구하여 측정하였다^[16]. TFB로 렌더링된 이미지를 기준으로 하고, 세 종류의 BRDF 모델로 렌더링된 이미지를 비교 대상으로 삼았다.

Fig. 7의 그래프는 86개의 재질에 대해서 RMS 에러를 보여준다. 세로축이 재질이며, 가로축이 로그 축적을 적용한 에러이다. 렌더링된 이미지의 예는 Fig. 8과 같다.

이 그래프에서 BVB는 절반의 재질에 대해서 RMS 에러가 매우 적음을 알 수 있다. RMS 에러가 큰 다른 절반의 재질들은 거울 반사 성분이 있는 재질들이다. 따라서, BVB의 경우는 렌더링된 이미지의 RMS 에러가 Fig. 1 및 2의 데이터 RMS 에러와 유사한 양상을 갖는 것을 알 수 있다.

하지만, CKT와 LFT의 경우 데이터 에러와 이미지 에러의 양상이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 4에서 CKT와 LFT는 상당수의 재질에 대해

BVB 보다 큰 에러를 갖는다. 예를 들어, 데이터 RMS 에러가 매우 적은 (Fig. 1에서 순위 2위.) 푸른 옷감(blue fabric) 재질의 경우, 이미지 RMS 에러는 매우 큰 것을 알 수 있다.

위 사실을 통해 Ngan 등의 연구^[18]에서 CKT와 LFT에 대한 맞춤형의 품질이 렌더링 관점에서는 매우 부족하다는 것을 알 수 있다. 이러한 불완전한 맞춤형은 두 가지 이유에 기인한다고 볼 수 있다.

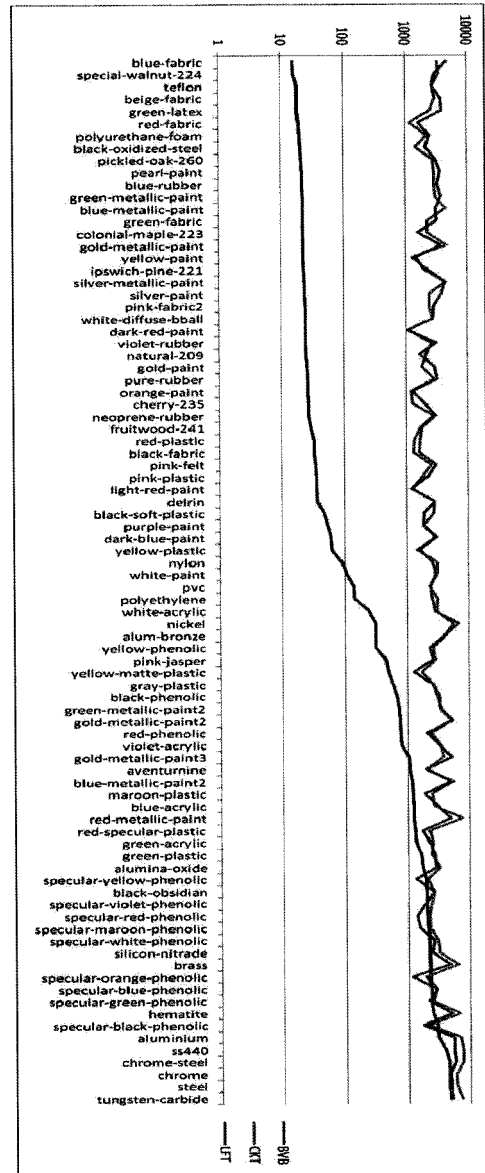


Fig. 7. RMS errors of images obtained by physically-based rendering using three BRDF models CKT, LFT, BVB.

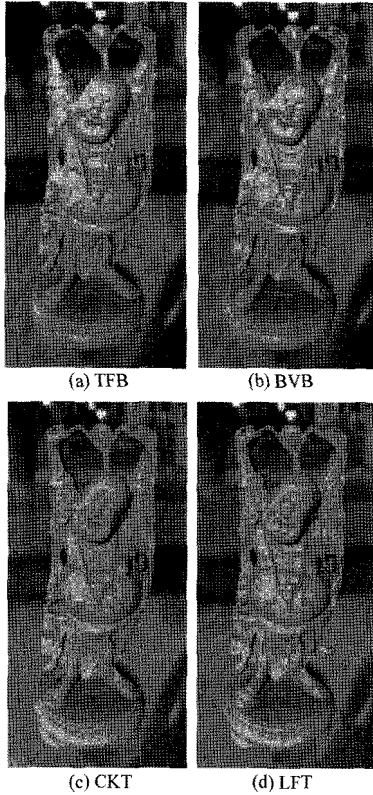


Fig. 8. Comparison of the rendered images obtained by physically-based rendering using four BRDF models of nylon material.

첫째, CKT와 LFT 모델 자체의 표현능력의 한계에 있다. 실험을 통해 측정 BRDF 데이터는 CKT와 LFT 모델의 수학모델로 표현하기에는 매우 복잡한 특징을 갖고 있음을 알게 되었다. 예를 들어, Fig. 8의 나일론과 같은 재질의 복잡한 특징은 수학 모델에서는 고려되지 않은 것이다.

두번째, 비선형 맞춤 기법의 불완전함에 있다. CKT와 LFT의 모델 자체의 한계에도 불구하고 Ngan 등의 연구¹⁸⁾의 모델맞춤은 최적이라고 볼 수 없다. 특히, 스짐각을 무시하고 RMS에러가 줄어드는 방향으로 맞춤을 수행했지만, 이로 인해 발생한 BRDF의 에러는 렌더링된 이미지에 매우 심각한 영향을 주고 있다. 즉, 남초 측정 BRDF를 사용하는 위치와 상반되게, 원래 재질과는 매우 다른 느낌의 재질감이 표현되었다.

Fig. 8에서 나타난 네 개의 이미지는 모두 같은 장면이지만 나일론 재질을 표현하는 다른 BRDF 모델로 렌더링 되었다. 기준이 되는 (a)의 이미지의 (b)의

BVB를 사용한 경우는 매우 유사하다(실제로 이미지 차이를 구해도, 그 값은 거의 0에 가깝다). 특히, 형태의 윤곽선 부근에서 스짐각에 의한 빛의 효과가 그 대로 잘 표현되고 있다. 하지만, 다른 수학 모델들은 이런 특징들을 전혀 살리지 못할 뿐만 아니라, 기본적인 색상 조차도 재현하지 못하고 있다.

4.3 렌더링 성능

4.2절의 렌더링 이미지 비교를 위해서, 2Gbyte의 메모리를 갖는 일반적인 컴퓨터에서 단일 스레드 방식으로 렌더링을 수행하였다. 3.3절의 렌더링 조건을 사용하였고, 장면은 Fig. 8과 동일하고, 이미지 크기는 512×1024이다.

Fig. 9는 각 BRDF 모델 방식에 대해서 상대적인 렌더링 시간을 보여주고 있다. 가장 속도가 빠른 것은 LFT이다(31분 38초). 이는 한 개의 코사인 로브만을 계산하기 때문이다. 그 다음으로 빠른 것은 CKT인데(34분 2초), LFT에 비해 수식이 복잡하여 조금 더 시간이 걸린다.

TFB의 경우 BRDF 데이터를 모두 메모리에 올리고 값을 읽어 오는 방식이므로 대부분의 시간이 메모리 입출력과 주소계산에 사용된다. 매우 어려운 계산이 없음에도 불구하고 렌더링 속도는 두 수학모델 보다 느리다(36분 46초).

렌더링 속도가 가장 느린 것은 BVB이다(55분 31초). 이는 비스플라인 기저 함수를 전개하는데 걸리는 시간에 기인한다고 볼 수 있다. 현재, BVB 계산을 위해서 어떠한 최적화 기법도 적용되지 않았는데, 최근의 CPU에서 제공하는 SIMD 병렬 연산을 이용한다면, 계산시간 면에서는 많은 개선이 있을 것으로 기대된다.

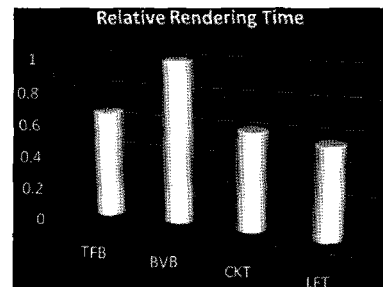


Fig. 9. Comparison of relative rendering time (1 for BVB model).

4.4 데이터 저장 용량

Matusik 등의 연구¹⁵⁾에서 측정된 BRDF의 원시 데

이터 용량은 각 재질당 33 MB이다. 이를 Lee와 Park^[6]의 방법을 사용하여 BVB로 표현하면 제어점의 개수에 따라 용량이 달라진다. 본 논문에서는 21×21×81개의 제어점을 사용하였으며, 이는 각 재질당 849 KB로, 원시 데이터 대비 2.5%이다. 하지만, 최근 연구 개발 중인 적응적 맞춤(adaptive fitting) 기법을 사용할 경우, 동일한 맞춤 에러에 대해 제어점 개수를 9×9×33으로 줄일 수 있는데, 이는 파일 크기 64 KB로, 원시 데이터 대비 0.2%에 해당한다.

본 논문에서 비교를 위해 사용한 LFT와 CKT의 경우 Ngan 등^[8]이 제시한 맞춤 인수를 사용하였으므로 데이터 용량은 무시할 정도의 수준이다. 즉, LFT와 CKT는 재질에 상관없이 각각 9개와 8개의 부동 소수점 인수를 필요로 한다.

LFT와 CKT와 같은 수학적 BRDF 모델은 데이터 크기 자체에는 문제가 없지만, 4.1절과 4.2절의 실험 결과가 보여주듯이, 측정 BRDF에 대한 모델 맞춤 및 렌더링에 대한 품질이 BVB의 경우에 비해 매우 좋지 않다.

5. 결 어

이상에서 비스플라인 볼륨, Cook-Torrance, Lafortune BRDF 모델의 측정 BRDF 데이터에 대한 맞춤과 렌더링 품질을 비교하여 보았다. 86개의 재질 중에 절반 정도는 거울 반사 성분이 없다. 이 재질들에 대해서는 BVB가 두 모델들 보다 데이터 맞춤 면에서 월등함을 보여 주고 있다. 이 재질들을 사용하는 경우, 렌더링 이미지의 품질 측면에서도 BVB가 매우 우수하다.

하지만, 거울 반사 성분이 있는 경우, 세 모델들이 모두 맞춤에서 문제가 발생하고 있음을 알 수 있다. BVB는 이 점을 개선할 수 있는지에 대해서 좀 더 연구를 해 볼 필요가 있다. 또한, 모든 재질에 대해서 동일한 제어점과 차수를 이용했지만, 재질에 최적화된 맞춤을 수행하는 것도 중요하다.

다른 수학 모델들에 대해서는 최적의 비선형 맞춤을 수행하고 다시 BVB와 비교하는 것이 필요하다. 또한, 수학 모델이 다중 로브를 갖는 경우에 대한 추가적인 비교도 필요하다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장동력핵심기술개발사업의 일환으로 수행되었음(2006-S-045-02, 기능확장형 초고속 렌더러).

참고문헌

1. Borshukov, G., Measured BRDF in Film Production: Realistic Cloth Appearance for "The Matrix Reloaded", in *SIGGRAPH Sketches & Applications* pp. 1-1, 2003.
2. Lawrence, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R., Efficient BRDF Importance Sampling using a Factored Representation, in *Proc. of SIGGRAPH*, pp. 496-505, 2004.
3. Pharr, M. and Humphreys, G., Physically Based Rendering: From Theory to Implementation, Morgan Kaufman Publishers, 2004.
4. Dorsey, J., Rushmeier, H. and Sillion, F., Digital Modeling of Material Appearances, Morgan Kaufmann, 2008.
5. Matusik, W., Pfister, H., Brand, M. and McMillan, L., "A Data-Driven Reflectance Model", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 22, pp. 759-769, 2003.
6. Digital Fashion OGM. http://www.dressingsim.com/DFL_en/product/OGM/index.html
7. Opus Realizer. <http://www.opticore.sc/>
8. Ngan, A., Durand, F. and Matusik, W., Experimental Analysis of BRDF Models, in *Proc. of Eurographics Symp. on Rendering*, pp.117-226, 2005.
9. Lee, J.-H. and Park, H., "B-spline Volume BRDF Representation and Application in Physically-based Rendering", *Transactions on SCCE*, Vol. 13, No. 6, pp. 469-477, 2008.
10. Cook, R. I. and Torrance, K. E., "A Reflectance Model for Computer Graphics", *ACM Transactions on Graphics*, pp. 7-24, 1982.
11. Lafortune, E. P. F., Foo, S.-C., Torrance, K. E. and Greenberg, D. P., Non-linear Approximation of Reflectance Functions. In *Proc. of SIGGRAPH, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 117-126, 1997.
12. Hoschek, J. and Lasser, D., *Fundamentals of Computer Aided Geometric Design*, AK Peters, London 1993.
13. Piegl, L. and Tiller, W., *The NURBS Book*, Springer, New York, 1995.
14. Park, H., Kim, K. and Lee, S. C., "A Method for Approximate NURBS Curve Compatibility based on Multiple Curve Refitting", *Computer-Aided Design*, Vol. 32, pp. 237-252, 2000.
15. Park, H., "An Approximate Lofting Approach for B-spline Surface Fitting to Functional Surfaces", *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, pp. 474-482, 2001.
16. ImageMagick. <http://www.imagemagick.org/Usage/compare/>
17. 최상수, 조현재, 노상도, "실감형 가상 시차품을 이용한 협업 디자인 플랫폼", *한국CAD/CAM 학회학술지*, Vol. 14, No. 3, pp. 150-158, 2009.



이 주 행

1994년 포항공과대학교 전자계산학과 학사
 1996년 포항공과대학교 전자계산학과 석사
 1999년 포항공과대학교 전자계산학과 박사
 1999년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 콘텐츠연구본부 선임연구원
 2008년~현재 과학기술연합대학원대학교(UST) 부교수
 관심분야: Geometric modeling and processing for computer graphics, CAD, and robotics; Bio-inspired computing for aesthetics, scientific and engineering applications; Image synthesis and visualization



김 성 수

1997년 경상대학교 신신통계학과 학사
 1999년 부산대학교 전자계산학과 석사
 1999년~2000년 KAIST 정보시스템연구소 연구원
 2000년~현재 한국전자통신연구원 콘텐츠연구본부 선임연구원
 관심분야: Computational geometry, computer graphics, realistic image synthesis, scientific visualization, parallel computing, spatial databases



박 형 준

1991년 포항공과대학교 산업공학과 학사
 1993년 포항공과대학교 산업공학과 석사
 1996년 포항공과대학교 산업공학과 박사
 1996년~2001년 삼성전자 중앙연구소 책임연구원
 2001년~현재 조선대학교 산업공학과 부교수
 관심분야: Geometric Modeling and Processing, 3D Shape Construction and Understanding, Virtual Prototyping of Engineered Products, BRDF Representation for Rendering, Dental Engineering, CAD/CAM/CG Applications