

물리기반 렌더링에서의 비스플라인 볼륨 BRDF 표현과 응용

이주행*, 박형준**

B-spline Volume BRDF Representation and Application in Physically-based Rendering

Joo-Haeng Lee* and Hyungiun Park**

ABSTRACT

Physically-based rendering is an image synthesis technique based on simulation of physical interactions between light and surface materials. Since generated images are highly photorealistic, physically-based rendering has become an indispensable tool in advanced design visualization for manufacturing and architecture as well as in film VFX and animations. Especially, BRDF (bidirectional reflectance distribution function) is critical in realistic visualization of materials since it models how an incoming light is reflected on the surface in terms of intensity and outgoing angles. In this paper, we introduce techniques to represent BRDF as B-spline volumes and to utilize them in physically-based rendering. We show that B-spline volume BRDF (BVB) representation is suitable for measured BRDFs due to its compact size without quality loss in rendering. Moreover, various CAGD techniques can be applied to B-spline volume BRDFs for further controls such as refinement and blending.

Key words : BRDF, B-spline volume, physically-based rendering, reflectance model, data reduction, approximate lofting

1. 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 근사화된 모델로 라포르춘(Lafortune), 블린-

퐁(Blinn-Phong), 쿡토랜스(Cook-Torrance) 모델과 같은 수학적 반사모델들이 개발되어 렌더링에 많이 사용되고 있다^[3].

최근에는 다양한 응용 분야에서 실제로 존재하는 복잡한 재질의 특성을 컴퓨터 그래픽스 영상으로 표현하는 것을 요구하고 있다. 그런데, 이들 재질감은 기존의 수학적 반사 모델만으로는 표현이 어려운 경우가 많아서, 최근에는 재질감 측정기술을 이용하여 재질 정보를 양방향 반사 분포함수 형식으로 획득하는 것이 가능해졌다^[1,3,12]. 예를 들어, 자동차의 가상 프로토타입에 대한 가시화를 위해서 외장용 페인트 및 내장재에 대해 측정 양방향 반사 분포함수(measured BRDF)를 사용하여 렌더링을 하거나^[11], 영화에서 옷감의 질감을 사실적으로 표현하기 위해서 측정된 양방향 반사 분포함수 데이터를 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 압축없이 저장할 경우

*중신회원, 한국전자통신연구원

**고신저자, 중신회원, 조선대학교 산업공학과
본 논문은 2008년 학술발표회 우수논문상 수상작임.

- 논문투고일: 2008. 04. 18

- 논문수정일: 2008. 11. 04

- 심사완료일: 2008. 11. 05

그 용량은 작게는 33 Mbyte에서 크게는 750 Mbyte에 이른다¹³⁾. 최근에는 고품질의 영상 렌더링을 위해 대용량의 렌더팜(render farm)을 이용하는 것이 일반적인데, 이를 위해 다수의 대용량 측정 BRDF 데이터를 네트워크로 전송하는 것은 전체 작업 프로세스에 큰 부담이 된다. 즉, 기존의 수 기가(Giga)에 이르는 기하모델과 텍스처 이미지와 더불어 재질감 정보까지 커지는 것을 감당할 수 없는 현장에서는 측정 양방향 반사 분포함수의 재질감 표현 우수성을 포기하고 대신 용량이 작은 간단한 수학 반사 모델을 사용하고 있다. 하지만, 수학 반사 모델을 이용하여 최대한으로 섬세한 재질감을 표현하려면 로브(lobe) 개수의 증가 등으로 인해 매우 복잡한 연산을 필요로 하게 되는데, 이는 전반적인 렌더링 시간의 증가로 이어지게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서, 본 논문에서는 기존의 곡선, 곡면에 대한 비스플라인(B-spline) 맞춤 기법을 볼륨으로 확장하여 측정 BRDF 데이터를 표현하고 이를 렌더링에 사용하는 방법을 제시한다. 특히, 근사적 로프팅(lofting) 기법이 BRDF 데이터의 잡음을 제거하고, 전체적인 반사 특성을 반영하면서 효과적인 데이터 감소를 실현하는데 상당한 도움이 되는 것을 보인다¹⁴⁾.

또한, 제시된 방법으로 생성한 비스플라인 볼륨 기반 양방향 반사 분포함수를 물리 기반 렌더링(physically-based rendering)에 적용한 예를 보인다. 특히, 비스플라인 맞춤을 위해 선택한 조정점의 개수와 맞춤 오류 및 렌더링 된 이미지의 품질의 관계를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 양방향 반사 분포함수의 기본 개념을 설명하고, 3절에서는 측정 BRDF 데이터를 비스플라인 볼륨으로 표현하는 방법을 설명하고, 4절에서는 생성된 비스플라인 볼륨 BRDF를 렌더링에 적용한 결과를 설명하고, 5절에서 결어를 제시한다.

2. 양방향 반사 분포함수

Fig. 1에서의 같이 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 정의된다¹⁵⁾:

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

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

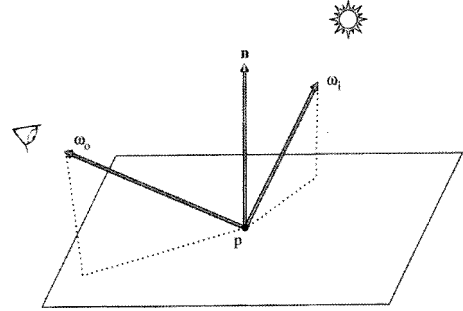


Fig. 1. BRDF 정의

반사 복사속(reflected flux 또는 exitant radiance)를 의미한다. 즉, 한 점에서의 BRDF는 ω_i 방향으로 들어온 빛에 의해 ω_o 방향으로 얼마나 많은 빛이 반사되는지를 나타낸다.

광선 추적법 기반의 렌더링에서 BRDF는 아래의 반사 방정식(reflection equation)을 정의하는 중요한 요소이다¹⁶⁾:

$$L_o(p, \omega_o) = \int_{H^2} f(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) |\cos \theta_i| d\omega_i$$

위 식에서 $L_o(p, \omega_o)$ 는 표면의 점 p 에서 ω_o 방향으로 반사되는 빛의 총량을 나타낸다. 이 값은 p 를 중심으로 하는 반구 H^2 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($\phi_i - \phi_o = \phi_r$)가 같을 때 BRDF의 값도 같다면 그러한 재질은 등방성(等方性, isotropic)이라고 하고, 경도 차이가 같더라도 ϕ_o 와 ϕ_i 의 실제 값에 따라 BRDF 값이 다르면 이방성(異方性, anisotropic) 재질이라고 한다. 보통의 재질들은 대부분 등방성이지만, 가공된 금속 표면과 심세한 직물과 같이 복잡한 재질에서는 이방성이 나타난다.

표면의 고정된 한 점에서 등방성 BRDF는 $f(\theta_o, \theta_i, \phi_r)$ 로 표현되는 3차원 함수이고, 이방성 BRDF는 $f(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i)$ 로 표현되는 4차원 함수이다. 본 논문에서는 등방성 BRDF를 비스플라인 볼륨으로 표현 분체를 다루게 된다.

등방성 BRDF 값을 측정하면 다음과 같은 표를 얻을 수 있다:

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

위 식에서 인덱스는 아래와 같이 정의된다.

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

$$\begin{aligned}
 a_i &= i \times \Delta\theta_p = i \times \pi / (2 \times i_{\max}), \\
 b_j &= j \times \Delta\theta_v = j \times \pi / (2 \times j_{\max}), \\
 c_k &= k \times \Delta\phi_d = k \times \pi / k_{\max}.
 \end{aligned}$$

반사광의 컬러를 나타내기 위해 식 (2)는 각 색상 요소 (적, 녹, 청)에 대해 벡터 형식으로 표현된다.

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

3. 비스플라인 볼륨 표현

이 절에서는 측정 BRDF 데이터에 대해 비스플라인 볼륨 맞춤을 수행하여 새로운 BRDF 표현(이하 BVB, B-spline Volume BRDF)을 얻는 방법을 설명한다.

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

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

여기서, $\mathbf{v}_{i,j,k} \in \mathbf{R}^3$ 는 조정점이고, 매개변수 정의 구역은 $u \in [u_{p-1}, u_{n_u+1}]$, $v \in [v_{q-1}, v_{n_v+1}]$, $w \in [w_{r-1}, w_{n_w+1}]$ 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.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U} &= \{u_0, u_1, \dots, u_{n_u+p}\} \\
 \mathbf{V} &= \{v_0, v_1, \dots, v_{n_v+q}\} \\
 \mathbf{W} &= \{w_0, w_1, \dots, w_{n_w+r}\}
 \end{aligned} \quad (5)$$

본 연구에서 다루고 있는 비스플라인 맞춤(fitting)의 분체는 $(i,j,k) \in [0, \dots, i_{\max}] \times [0, \dots, j_{\max}] \times [0, \dots, k_{\max}]$ 에서 측정된 BRDF 데이터 $\mathbf{F}_{i,j,k}$ 를 근사하는 비스플라인 볼륨 $\mathbf{V}(u,v,w)$ 을 구하는 것이다. 이 분체는 최소자승 비스플라인 볼륨 맞춤(fitting) 기법을 이용하여 해결할 수 있다. 각 BRDF 데이터 $\mathbf{F}_{i,j,k}$ 가 정의되는 매개변수 $\bar{u}_i, \bar{v}_j, \bar{w}_k$ 를 추정하고, 비스플라인 함수의 오더 p, q, r 를 정하고, 그리고 비스플라인 볼륨 $\mathbf{V}(u,v,w)$ 의 노트벡터 $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ 가 결정되면, 조정점 $\mathbf{v}_{i,j,k}$ 는 다음의 최소자승 오차를 최소화시킴으로써 구할 수 있다.

$$E(\mathbf{v}_{0,0,0}, \dots, \mathbf{v}_{n_u, n_v, n_w}) = \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{j=0}^{j_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} \|\mathbf{V}(\bar{u}_i, \bar{v}_j, \bar{w}_k) - \mathbf{F}_{i,j,k}\|^2 \quad (6)$$

목적함수가 이차함수 형태이므로, 해당 최소화 문제는 선형시스템을 푸는 문제로 귀착된다. 측정 BRDF 데이터의 경우, $i_{\max} > n_u, j_{\max} > n_v$, 그리고 $k_{\max} > n_k$

가 일반적이므로 해당 최소자승 최소화 기법은 좋은 해를 제공할 수 있다. 그러나, 식(6)에 대한 선형 시스템의 크기가 $N \times N$ 인데, $N=(n_u+1) \times (n_v+1) \times (n_w+1)$ 이므로 매우 큰 선형시스템이 된다. 예를 들어, $N=20 \times 20 \times 80$ 이고 부동소수점으로 계산하는 경우 선형 시스템의 크기는 약 4Gbyte에 이른다. 따라서, 이는 식 (6)에 의거한 비스플라인 볼륨 맞춤 기법이 계산 수행도 및 메모리 사용 측면에서 매우 비효율적임을 시사한다.

본 논문에서는 이러한 단점을 실질적인 측면에서 극복하기 위해 근사적 볼륨 로프팅(lofting) 개념을 제안한다. 근사적 볼륨 로프팅은 적합화된(compatible) 일련의 비스플라인 곡면들을 근사하여 비스플라인 볼륨을 생성하는 기법이라고 정의할 수 있다. 각 비스플라인 곡면은 입사방향의 θ_i 이 고정되었을 때의 측정 BRDF의 등가곡면(iso-surface)에 해당하는 사각 메쉬(rectangular mesh)를 근사한다⁶⁷⁾. 적합화된 비스플라인 곡면들을 얻기 위해 일련의 사각 메쉬들을 동일 노트벡터 \mathbf{U}, \mathbf{V} 상에서 정의된 비스플라인 곡면들로 근사한다⁶⁸⁾.

이 과정에서 마찬가지로 근사적 곡면 로프팅 기법을 이용하여 적합화된 일련의 비스플라인 곡면들을 근사하여 비스플라인 곡면을 생성한다⁶⁹⁾. 각 비스플라인 곡선은 θ_v 와 θ_i 이 고정되었을 때의 측정 BRDF의 등가곡선(iso-curve)에 해당하는 점일(polyline)을 근사한다⁶⁷⁾. 적합화된 비스플라인 곡선들을 얻기 위해 일련의 점일(polyline)들을 동일 노트벡터 \mathbf{U} 상에서 정의된 비스플라인 곡선들을 근사한다. 결국, 비스플라인 볼륨 근사 분체가 최소자승 비스플라인 곡선 맞춤 분체로 전환된다⁷⁰⁾. 제시된 접근 방식은 식 (6)에 의거한 비스플라인 볼륨 맞춤 방식에 비해 적은 계산과 메모리를 요구한다. 근사적 비스플라인 볼륨 로프팅을 위한 절차는 다음과 같이 요약된다.

Procedure: 근사적 비스플라인 볼륨 로프팅

Input: 양방향 반사 분포함수(BRDF) 측정 $\mathbf{F}_{i,j,k}$ ($i,j,k \in [0, \dots, i_{\max}] \times [0, \dots, j_{\max}] \times [0, \dots, k_{\max}]$)

Output: 비스플라인 $\mathbf{V}(u,v,w)$,

- (1) 비스플라인 함수의 오더(차수+1) p, q, r 를 지정하고, 원하는 조정점의 개수 (즉, n_u, n_v, n_w)를 선정한다.
- (2) 측정 BRDF 데이터가 정의되는 매개변수 $\bar{u}_i, \bar{v}_j, \bar{w}_k$ 를 추정 ($i \in [0, \dots, i_{\max}], j \in [0, \dots, j_{\max}], k \in [0, \dots, k_{\max}]$) 매개변수의 분포를 고려하여 노트벡터 $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ 를 결정한다.
- (3) 각 $i \in [0, \dots, i_{\max}]$ 에 대한 측정 BRDF 데이터의 등가곡면(iso-surface)에 해당하는 메쉬 \mathbf{M}^i

$\{M'_{j,k} = F_{j,k}(j,k) \in [0, \dots, j_{max}] \times [0, \dots, k_{max}]\}$ 을 얻는다. 그런 다음 노트벡터 \mathbf{V}, \mathbf{W} 상에서 메쉬 \mathbf{M} 를 근사하는 비스플라인 곡면 $S^i(v, w) = \sum_{j=0}^{n_v} \sum_{k=0}^{n_w} N_{j,q}(v)N_{k,r}(w)s'_{j,k}$ 을 다음과 같이 구한다.

[a] 메쉬 \mathbf{M} 의 각 행(row) $j \in [0, \dots, j_{max}]$ 에 대한 측정 BRDF 데이터의 등가곡선(iso-curve)에 해당하는 점열 $\mathbf{P}^j = \{M'_{j,k} | k \in [0, \dots, k_{max}]\}$ 을 얻고, 최소자승 비스플라인 곡선 맞춤^[7]을 적용하여 노트벡터 \mathbf{W} 상에서 점열 \mathbf{P}^j 를 근사하는 비스플라인 곡선 $C^j(w) = \sum_{k=0}^{n_w} N_{k,r}(w)c'_k$ 를 생성한다.

[b] 근사적 곡면 로프팅 기법^[7,8]을 적용하여 적합화된 비스플라인 곡선들 $C^j(w), j \in [0, \dots, j_{max}]$ 을 근사하는 비스플라인 곡면 $S^i(v, w)$ 을 다음과 같이 생성한다.

A. 비스플라인 곡선들 $C^j(w), j \in [0, \dots, j_{max}]$ 의 각 열(column) $k \in [0, \dots, n_w]$ 에 대한 점열 $\mathbf{Q}^k = \{c'_k | j \in [0, \dots, j_{max}]\}$ 을 얻고, 최소자승 비스플라인 곡선 맞춤^[7]을 적용하여 노트벡터 \mathbf{V} 상에서 점열 \mathbf{Q}^k 를 근사하는 비스플라인 곡선 $D^k(v) = \sum_{j=0}^{n_v} N_{j,q}(v)d^k_j$ 를 생성한다.

B. 노트벡터 \mathbf{V}, \mathbf{W} 상에서 정의되는 비스플라인 곡면 $S^i(v, w)$ 의 조정점들 $s'_{j,k}$ 를 다음과 같이 구한다. 모든 $(j, k) \in [0, \dots, n_v] \times [0, \dots, n_w]$ 에 대해 $s'_{j,k} = d^k_j$.

(4) 근사적 볼륨 로프팅 기법에 의거하여 적합화된 비스플라인 곡면들 $S^i(v, w), i \in [0, \dots, i_{max}]$ 을 근사하는 비스플라인 볼륨 $\mathbf{V}(u, v, w)$ 을 다음과 같이 구한다.

[a] 적합화된 비스플라인 곡면들 $S^i(v, w)$ 의 조정점들 $s'_{j,k}$ 으로부터 각 $(j, k) \in [0, \dots, n_v] \times [0, \dots, n_w]$ 에 대해 점열 $\mathbf{P}^{j,k} = \{s'_{j,k} | i \in [0, \dots, i_{max}]\}$ 을 얻고, 최소자승 비스플라인 곡선 맞춤을 적용하여 노트벡터 \mathbf{U} 상에서 점열 $\mathbf{P}^{j,k}$ 를 근사하는 비스플라인 곡선 $B^{j,k}(u) = \sum_{i=0}^{n_u} N_{i,p}(u)b^{j,k}_i$ 를 생성한다.

[b] 비스플라인 볼륨 $\mathbf{V}(u, v, w)$ 의 조정점 $v_{i,j,k}$ 를 다음과 같이 구한다. 모든 $(i, j, k) \in [0, \dots, n_u] \times [0, \dots, n_v] \times [0, \dots, n_w]$ 에 대해 $v_{i,j,k} = b^{j,k}_i$.

4. 적용 결과

Matusik 등은 100개의 서로 다른 재질에 대해서 이

미지 기반으로 등방성 BRDF를 측정하고 그 데이터를 공개하였다^[1]. 본 논문에서는 이들 측정 데이터에 대해서 3점의 비스플라인 볼륨 맞춤을 이용하여 측정 BRDF를 표현하고, 이를 물리기반 렌더링에 적용한 결과를 제시한다. 또한, 비스플라인의 조정점의 개수, 볼륨 맞춤의 오류 및 렌더링 이미지의 품질의 상관관계를 분석한다.

4.1 비스플라인 볼륨 맞춤

측정 BRDF 데이터는 식(3)의 형식을 따라 크기 $(i_{max}, j_{max}, k_{max}) = (90, 90, 360)$ 의 표에 저장된다. Fig. 2는 금색 페인트 재질의 측정 데이터에 대해서 비스플라인 볼륨 맞춤 적용한 예를 보여준다. 여기서, $p=q=r=4, (n_u, n_v, n_w) = (20, 20, 80)$ 으로 설정하였다. Fig. 2(a)-(c)는 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 에서 측정 BRDF의 등가메쉬를 구면 좌표계 (θ, ϕ) 상에서 보여준다. 이 때 벡터 크기는 색상 벡터의 크기를 나타낸다. Fig. 2(e)-(g)는 Fig. 2(a)-(c)의 θ 에 해당하는 비스플라인 볼륨의 등가곡면으로부터 얻은 값이다. Fig. 2(c)와 2(f)에서 측정 데이터에 비해 비스플라인 볼륨 맞춤의 경우가 노이즈가 적으면서도 전체적인 형상이 유지되는 것을 알 수 있다. 적용 결과의 분석은 4.3절에서 다루기로 한다.

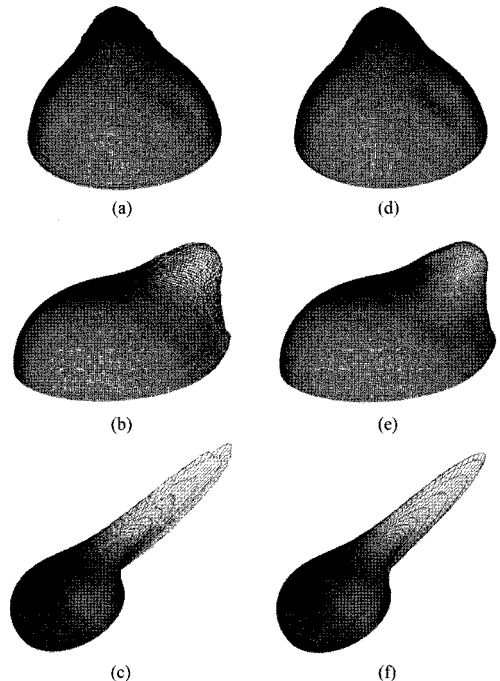


Fig. 2. 금색 페인트 재질의 BRDF에 대한 비스플라인 볼륨 맞춤: $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 에서 (a)-(c) 원시 데이터 및 (d)-(f) 비스플라인 볼륨으로부터의 등가메쉬

4.2 물리기반 렌더링에 적용

물리기반 렌더링에서는 조명과 재질의 물리적 성질을 이용하여 사진과 같은 이미지를 얻고자 한다. 이때 측정 BRDF는 재질감을 정확히 표현하기 위해 사용되는데, 일반적으로 렌더링에서는 측정 BRDF를 셰이더 형태로 구현하여 한다. Fig. 3에서 재질감 정보의 표현 형식 변환(예를 들어, 표 형식의 원시 데이터에 비스플라인 볼륨으로 변환)은 렌더링 과정과는 독립적으로 처리되어 셰이더를 생성하고, 필요에 따라 이를 렌더링에서 호출하게 된다.

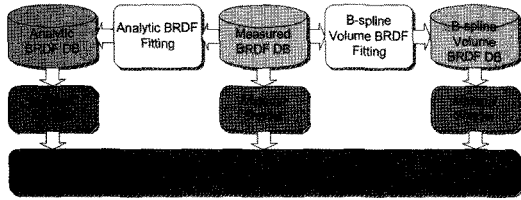


Fig. 3. BRDF 기반 재질감 셰이더의 렌더링과의 연동

대부분의 렌더러들은 사용자 셰이더를 제작할 수 있는 셰이더 언어나 API를 제공하고 있다. 예를 들어, 물리기반 렌더링인 PBRT¹⁹⁾에서는 재질감 추상 클래스의 규격에 맞게 측정 BRDF 클래스를 추가하면 된다. 측정 BRDF의 원시 데이터를 직접 이용하는 경우는 식(3)의 표를 읽으면 되고, 비스플라인 볼륨 BRDF를 이용하는 경우는 식(4)를 전개하여 값을 얻는다.

Fig. 4는 제시된 비스플라인 볼륨 맞춤 및 렌더링 기법을 적용하여 간단한 장면을 다양한 재질감으로 렌더링 한 예를 보여준다. 렌더링을 위해 사용된 알고리즘은 잘 알려진 분산 광선 추적법(distribution ray tracing)이다²⁾.

4.3 분석

이 절에서는 비스플라인 볼륨 맞춤 및 렌더링 이미지의 품질에 대한 다양한 분석을 제시한다.

먼저 100개의 재질감 중에서 대표적으로 금색 페인트(gold metallic paint), 테프론(Teflon), 크롬(chrome)에 대한 실험 결과를 제시한다. Fig. 5는 입사각이 45도인 경우 측정된 원시 데이터와 비스플라인 볼륨 맞춤으로 얻은 데이터 간의 최대 및 평균 에러를 보여 주고 있다. 여기서 최대 및 평균 에러는 다음과 같이 정의된다.

$$E_{max} = \max_{i,j,k} \|V(\vec{u}_i, \vec{v}_j, \vec{w}_k) - F_{i,j,k}\|$$

$$E_{avg} = \frac{1}{(1+i_{max})(1+j_{max})(1+k_{max})} \sum_{i,j,k} \|V(\vec{u}_i, \vec{v}_j, \vec{w}_k) - F_{i,j,k}\| \tag{7}$$

비스플라인 볼륨 맞춤에 이용되는 비스플라인 볼륨의 조정점 개수는 $n_u \times n_v \times n_w = n_u \times n_v \times (n_w \times 4) = 4n_w^3$ 로 주어진다. 조정점의 개수 n_w 를 증가시킴에 따라 평균 및 최대 에러가 감소하는데, 그 정도가 금색페인트와 테프론에서는 그 경향이 뚜렷하지만 크롬의 경우는 매우 수렴이 매우 느리다. 금색페인트나 테프론의 경우는 조정점의 개수가 15개 정도까지 에러가 급속히 감소하여 서서히 수렴하고 있다. 이와 같은 에러 감소 현상은 입사각에 상관없이 대부분 발견된다.

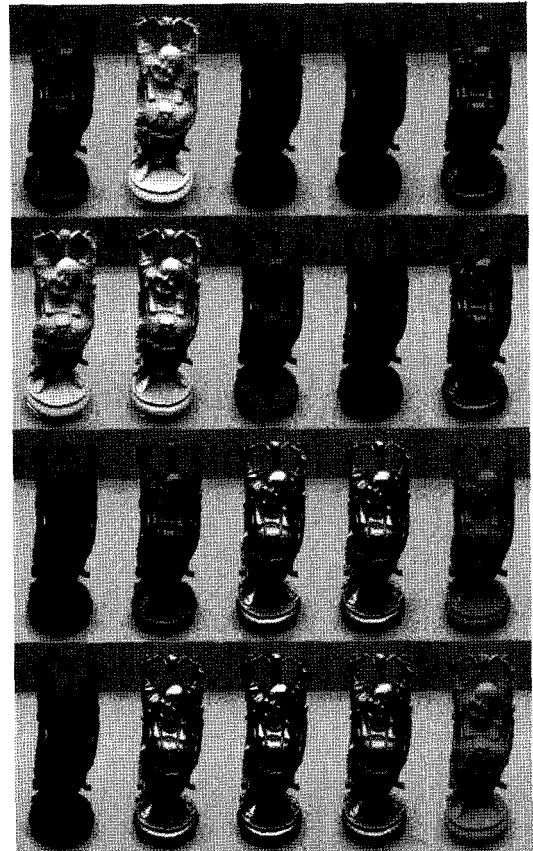


Fig. 4. 비스플라인 볼륨 BRDF를 물리기반 렌더링에 적용한 예

Fig. 6은 특정 입사각이 아니라 모든 입사각에서의 최대 및 평균 오차와 조정점의 개수와의 관계를 보여준다. 평균에러의 감소율은 Fig. 5의 특정 입사각의 경우와 유사하지만, 최대 에러 감소율은 완만해 졌다. 이는 입사각이 90도에 가까워 질수록 원시 데이터 자체에 측정 오류가 큰 것이 반영되기 때문이다²¹⁾.

Fig. 7은 한 재질에 대해서 조정점의 개수를 증가시키면서 비스플라인 볼륨 맞춤을 수행하고 이를 렌더

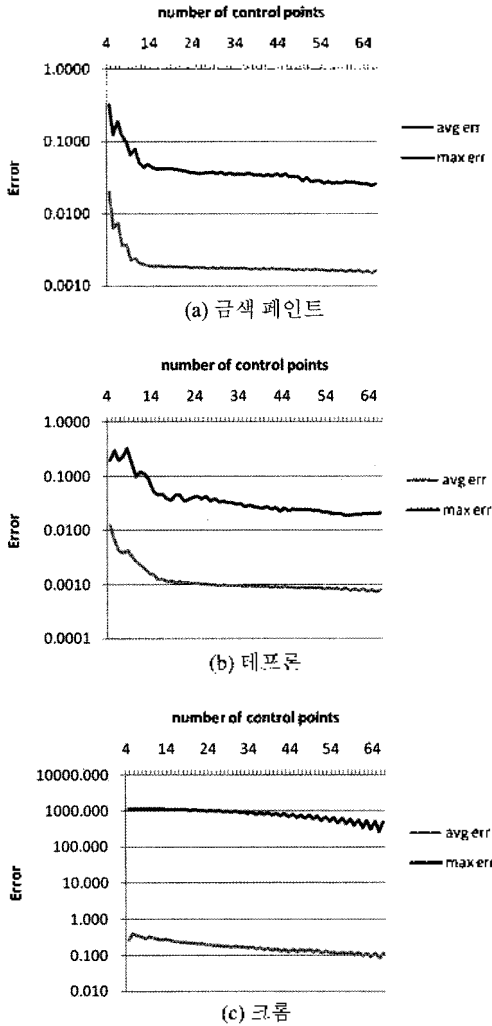


Fig. 5. 원시 데이터에 대한 비스플라인 볼륨 맞춤 에러 ($\theta=45^\circ$ 로그 축척)

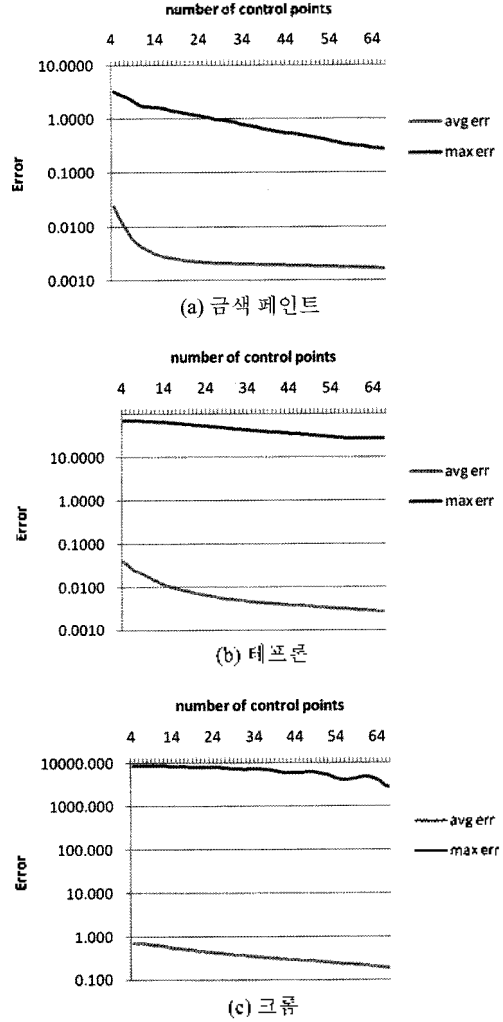


Fig. 6. 원시 데이터에 대한 비스플라인 볼륨 맞춤 에러(모든 입사각 $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, 로그 축척)

림에 적용하여 얻은 이미지들의 품질 변화를 보여준다(이미지 품질은 원시 데이터를 사용하여 렌더링한 이미지와의 BVB로 렌더링한 이미지의 에러(MAE, PAE)로 정의된다^{[10])}. 금색페인트의 경우는 조정점이 약 15개 정도일 때까지 급격히 이미지 에러가 감소하여 수렴하는 것을 알 수 있다. 다른 재질감에서도 비슷한 양상을 보이는데, 이는 비스플라인 볼륨 맞춤의 오류 양상과도 일치하는 것으로, BRDF와 물리기반 렌더링의 직접적인 관계에 기인한다(2절 참조).

Fig. 5, 6, 7에서 조정점의 개수가 증가함에 따라 오차가 전반적으로 감소하지만 요동(fluctuation)이 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상은 비스플라인 볼륨 로프팅을 위한 노트벡터 선정 방법에 기인한다. 현재

Piegl^[7]에 제시된 방법에 의해 노트벡터를 선정하고 있는데, 이 방법은 조정점 갯수와 점의 개수가 비슷해지는 경우, 선형시스템이 다소 불안정하게 되는 경향이 있다^[8,15]. 이를 해결하기 위해 추후 연구에서는 형상 특징점들을 이용한 적응적 노트벡터 선정 방법^[15]의 도입이 고려되고 있다.

Fig. 9는 [3]의 100개의 재질감에 대해서(Fig. 2의 경우와 같은 조건으로) 비스플라인 볼륨 맞춤을 수행하여 그 평균/최대 에러와 각 재질감의 최대 색상값, 렌더링 이미지의 최대 오차를 보여 주고 있다. 이 데이터는 특정 입사각이 아닌 전체 입사각에 대한 평균값이다. 그래프에서 모든 데이터 값들은 각 항목(평균/최대 에러, 최대 색상값, 이미지 최대오차)에 대한 최

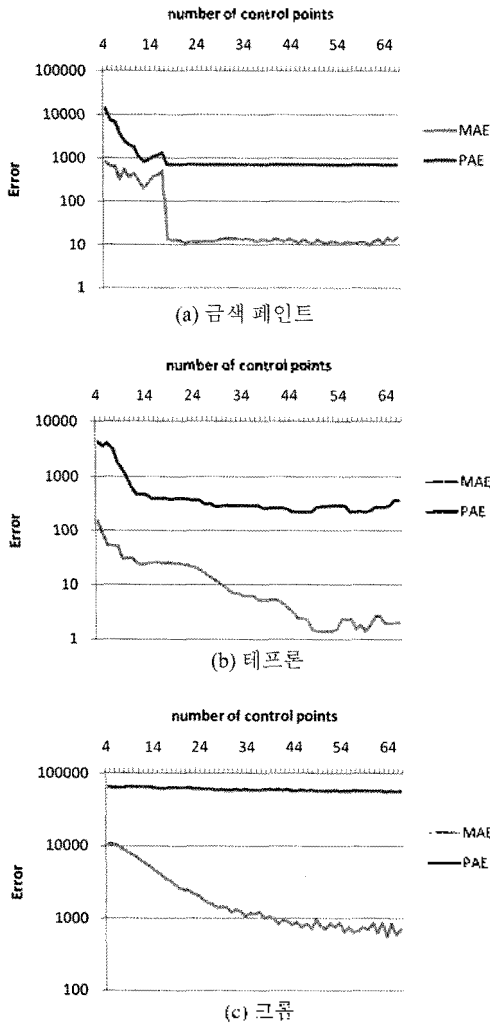


Fig. 7. 원시 데이터를 사용한 이미지와 비스플라인 볼륨 BRDF(BVB)로 렌더링한 이미지 에러(로그 축척)

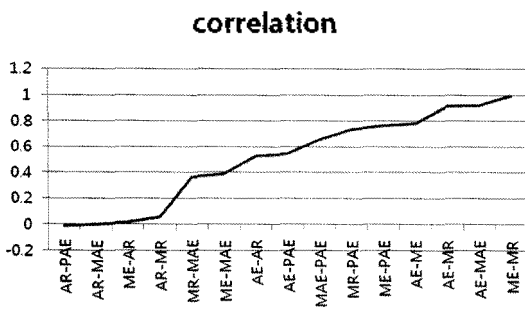


Fig. 8. 측정 BRDF에 대한 비스플라인 볼륨 맞춤 및 렌더링 결과의 상관도: ME(최대 맞춤 오차), AE(평균 맞춤 오차), MR(최대 색상값), AR(평균 색상값), PAE(최대 영상 오차), MAE(평균 영상 오차)

대 값으로 나타내진 정규화된 값을 나타내며, 모든 데이터는 평균 맞춤 오차에 대해 정렬이 되어 있다. 먼저, 평균/최대 맞춤 오차가 최대 색상값(양방향 반사 분포함수의 RGB 값의 크기)과 매우 유사한 추세

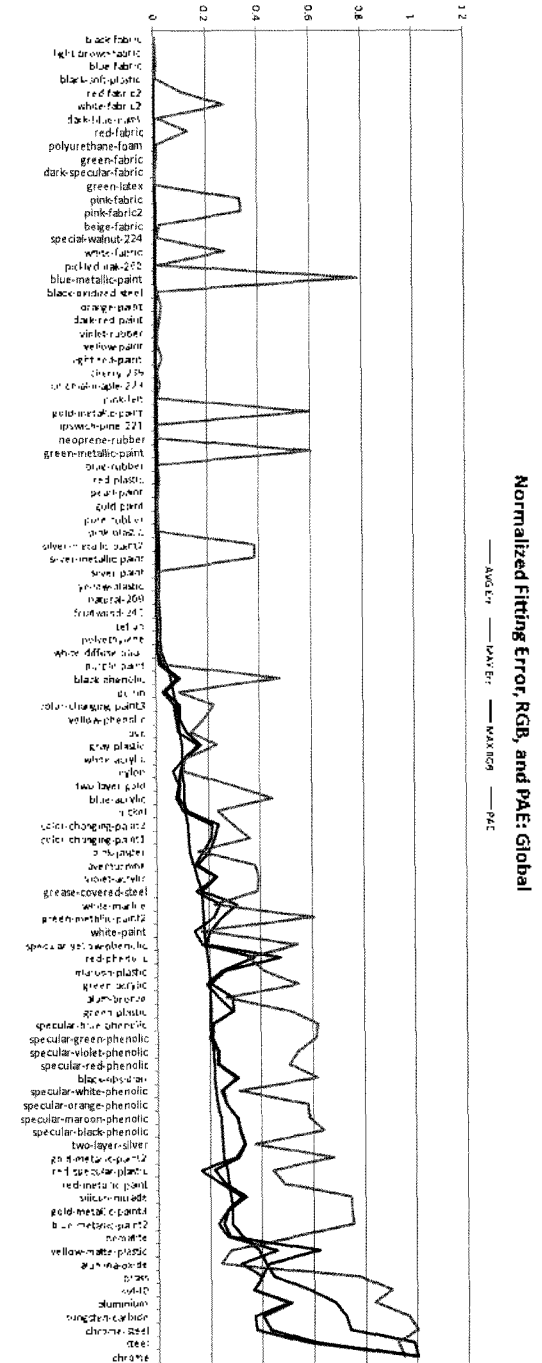


Fig. 9. 100개의 재질값에 대한 비스플라인 볼륨 맞춤의 평균/최대 에러, 최대 색상값 및 최대 이미지 에러

로 움직이고 있는 것을 알 수 있다. 더욱 흥미로운 것은 렌더링 이미지의 최대 오차(PAE)가 최대 맞춤 오차(ME)와 유사한 추세를 갖는다는 것이다(이미지의 최대 오차는 눈에 잘 드러나기 때문에 평균 오차(MAE)보다 중요하다.).

이 경향은 Fig. 8의 상관도(correlation) 분석에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 즉, 좋은 품질의 렌더링 이미지를 얻기 위해 양방향 반사 분포함수의 오류를 줄이는 것이 무엇보다 중요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서 맞춤 오차가 큰 재질감은 최대 색상값이 큰 재질들로 특히 거울 반사와 같이 반사도가 높은 성질에 해당한다(대표적인 재질이 크롬). 이 재질감들에 대해서는 본 논문에서 제시한 근사적 로프팅 방법을 개선하여 비스플라인 볼륨 맞춤의 오차를 줄일 필요가 있다.

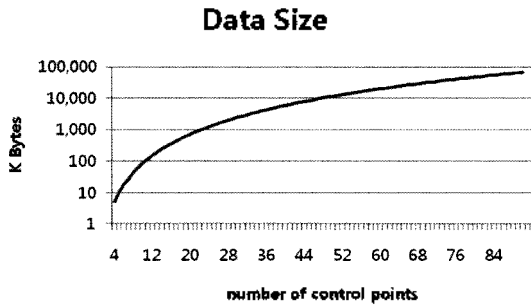


Fig. 10. 조정점의 개수 n_c 대비 비스플라인 볼륨 BRDF 파일의 크기

Fig. 10은 조정점 개수에 따른 비스플라인 볼륨 BRDF 파일의 크기를 보여 주고 있다. 현재는 최적의 데이터 크기를 찾기 위해서 특별한 알고리즘을 사용하고 있지 않지만, Fig. 6, 7, 9의 추세를 이용한다면 오차 범위 내에서 적당한 수의 조정점을 갖는 비스플라인 볼륨 맞춤을 수행할 수 있다. 크롬처럼 거울 반사에 의해 오차가 크게 발생하지 않다면 보통 수백 Kbytes 내에서 맞춤이 가능하며, 적게는 수십 Kbytes 미만으로도 가능하다.

6. 결 어

본 논문에서는 양방향 반사 분포함수(BRDF)에 대한 측정 데이터를 비스플라인 볼륨으로 표현하기 위한 맞춤 기법과 이를 렌더링에 적용하는 방법을 소개하였다. 더불어, 다양한 분석 결과를 통해 제시된 비스플라인 볼륨 방법이 양방향 반사 분포함수를 표현하고 렌더링 하는데 매우 적합한 방법임을 설명하였다.

비스플라인 볼륨 맞춤은 측정 데이터에 발생한 노이즈를 제거하는데 큰 효과가 있음을 알 수 있다(Fig. 2(c)와 (f) 비교). 이것은 몬테카를로(Monte Carlo) 적분에서 발생하는 노이즈를 제거하는데도 효과적이다. 하지만 너무 적은 조정점을 쓰게 되면 재질감이 갖는 비교한 특성까지 사라지는 경우가 있어서 유의해야 한다. 따라서, 재질감의 근본적인 특성과 노이즈를 구별하는 지능적인 맞춤 기법이 필요하다.

5절의 분석 결과에 따르면, 제시된 비스플라인 볼륨 맞춤 기법을 거울 반사의 특성을 갖는 재질감들에 적용하면 아직 오차가 큰 편이어서, 이를 개선하기 위한 연구가 필요하다. 더불어, 최적 용량의 비스플라인 볼륨 데이터를 자동으로 생성해주는 기법으로 발전해야 할 것이다.

몬테카를로 적분기반의 분산 광선추적기법에서 가장 문제가 되는 것은 렌더링 된 이미지에서 발생하는 노이즈를 줄이면서도 전반적인 렌더링 속도를 높이는 데 있다. 이를 위해서 다중 중요도 샘플링(multiple importance sampling)기법이 개발되었는데^[5], 이 기법을 적용하기 위해서는 양방향 반사 분포함수의 확률 밀도 함수(PDF, probability density function)를 알아야 한다. 원시 측정 데이터의 경우 확률 밀도 함수 데이터로 인해 필요한 데이터가 더욱 증가하게 되고, 수학 모델의 경우 이를 유도하기가 어렵거나 렌더링 과정에서 또 다른 계산의 부담이 발생할 수 있다. 하지만, 비스플라인 볼륨기반의 표현에서는 확률 밀도 함수도 또 다른 비스플라인 볼륨으로 표현할 수 있기 때문에, 용량과 계산의 부담을 줄이면서 분산광선추적법의 결과를 향상시킬 수 있을 것이다. 이와 더불어 이방성 재질감 지원 및 기존의 반사 모델(예를 들어, Lafortune 등)과의 성능 비교는 추후 연구 주제가 될 것이다. 이방성 재질감 지원을 위해서는 제안된 방법을 확장하여 이방성 BRDF 데이터를 매개변수 4개의 B-spline 4차원 볼륨^[13,14]으로 표현함으로써 가능하리라 사료된다.

감사의 글

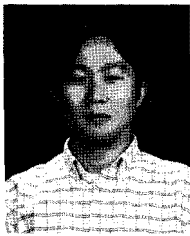
본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장동력핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였습 니다[2006-S-045-02, 기능확장형 초고속 렌더러].

참고문헌

1. G. Borshukov, Measured BRDF in film production:

realistic cloth appearance for "The Matrix Reloaded", in SIGGRAPH Sketches & Applications, pp. 1-1, 2003.

2. J. Lawrence, S. Rusinkiewicz, and R. Ramamoorthi, Efficient BRDF importance sampling using a factored representation, in Proc. of SIGGRAPH, pp. 496-505, 2004.
3. W. Matusik, H. Pfister, M. Brand, and L. McMillan, A Data-Driven Reflectance Model, *ACM Transactions on Graphics*, 22, pp. 759-769, 2003.
4. A. Ngan, F. Durand and W. Matusik, Experimental Analysis of BRDF Models, in Proc. of Eurographics Symp. on Rendering, pp. 117-226, 2005.
5. M. Pharr and G. Humphreys, Physically Based Rendering: From Theory to Implementation, Morgan Kaufman Publishers, 2004.
6. J. Hoschek and D. Lasser, Fundamentals of computer aided geometric design, AK Peters, London, 1993.
7. L. Piegl and W. Tiller, The NURBS book, Springer, New York, 1995.
8. H. Park, K. Kim and S. C. Lee, A method for approximate NURBS curve compatibility based on multiple curve refitting, *Computer-Aided Design*, 32, pp. 237-252, 2000.
9. H. Park, An approximate lofting approach for B-spline surface fitting to functional surfaces, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18, pp. 474-482, 2001.
10. ImageMagick, <http://www.imagemagick.org/Usage/compare/>
11. Opus Realizer, <http://www.opticore.se/>
12. OGM, http://www.dressingsim.com/DFL_en/product/OGM/index.html
13. S. K. Park, Volumetric NURBS Representation of Multidimensional and Heterogeneous Objects: Concept and Formation, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 10, pp. 303-313, 2005.
14. S.K. Park, Volumetric NURBS Representation of Multidimensional and Heterogeneous Objects: Modeling and Applications, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 10, pp. 314-327, 2005.
15. H. Park and J. H. Lee, B-spline curve fitting based on adaptive curve refinement using dominant points, *Computer-Aided Design*, 39, pp. 439-451, 2007.



이 주 행

1994 포항공과대학교 전자계산학과 학사
 1996 포항공과대학교 전자계산학과 석사
 1999 포항공과대학교 전자계산학과 박사
 1999 현재 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠 연구부단 선임연구원
 관심분야: Geometric modeling and processing for computer graphics, CAD, and robotics; Biology-inspired computing for aesthetic, scientific and engineering applications; Image synthesis and rendering for digital contents.



박 형 준

1991년 포항공과대학교 산업공학과 학사
 1993년 포항공과대학교 산업공학과 석사
 1996년 포항공과대학교 산업공학과 박사
 1996년~2001년 삼성전사 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