

샘플 쓰레드 기반 실시간 BRDF 렌더링

김순현^o 경민호 이주행

아주대학교^o

한국전자통신연구원

{kkubs, kyung}@ajou.ac.kr

joohaeng@etri.re.kr

Sample thread based real-time BRDF rendering

Soonhyun Kim^o Min-Ho Kyung Joo-Haeng Lee

Ajou University^o

ETRI

요약

본 논문에서는 BRDF를 이용한 재질 렌더링에서 적은 수의 샘플을 사용하면서 화소(pixel) 노이즈가 없는 렌더링 방법을 제안한다. BRDF를 이용한 재질 렌더링에서 이미지 품질을 결정하는데 가장 중요한 요소 중 한가지는 모든 방향으로 부터 들어오는 빛의 양을 어떻게 적분할 것인가이다. 일반적으로 이러한 적분에는 빛의 양을 샘플값들의 합으로 근사시키는 Monte Carlo 기법이 널리 사용된다. 이 방법은 샘플링 수를 늘릴수록 실제 물체의 재질에 가깝게 렌더링이 가능하지만 많은 렌더링 연산이 필요하고, 반대로 샘플링 수를 줄이면 심각한 화소 노이즈가 발생한다. 적은 수의 샘플을 사용하면서도 화소 노이즈가 없는 렌더링을 하기 위해서, 본 논문에서는 BRDF데이터에서 렌더링 결과에 미치는 영향을 고려하여 중요한 부분을 더욱 많이 샘플링 하는 중요 샘플링 기법을 응용하며, 시점 방향에 따른 샘플들을 위치 변화를 최소화한 후, 이 인접한 시점 방향의 샘플들을 엮어서 만든 샘플 쓰레드를 제안한다. 이 샘플 쓰레드는 반사광에 따라 변화하는 샘플들의 자취를 연결한 데이터로, 이는 시점 방향에 따라 연속적으로 변하는 샘플 집합을 갖는다. 따라서 샘플 기반의 렌더링이 기본적으로 가지고 있는 화소 노이즈 현상이 발생하지 않는다. 따라서 적은 수의 샘플 쓰레드라도 노이즈가 없는 만족할만한 렌더링 결과를 얻을 수 있으며, 샘플 쓰레드를 BRDF에 따라 미리 계산해 놓을 수 있어 그래픽 하드웨어를 통한 실시간 BRDF 렌더링이 가능하다.

Abstract

In this paper, we propose a novel noiseless method of BRDF rendering on a GPU in real-time. Illumination at a surface point is formulated as an integral of BRDF producted with incident radiance over the hemi-sphere domain. The most popular method to compute the integral is the Monte Carlo method, which needs a large number of samples to achieve good image quality. But, it leads to increase of rendering time. Otherwise, a small number of sample points cause serious image noise. The main contribution of our work is a new importance sampling scheme producing a set of incoming ray samples varying continuously with respect to the eye ray. An incoming ray is importance-based sampled at different latitude angles of the eye ray, and then the ray samples are linearly connected to form a curve, called a thread. These threads give continuously moving incident rays for eye ray change, so they do not make image noise. Since even a small number of threads can achieve a plausible quality and also can be precomputed before rendering, they enable real-time BRDF rendering on the GPU.

키워드: 양방향 반사분포함수 렌더링, 중요 샘플링, 샘플 쓰레드, 확률분포함수 ...

Keywords: BRDF rendering, importance sampling, sample thread, probability density function

*투고일: 2010. 04. 29 / 심사일: 2차 2010. 06. 15 / 게재확정일: 2010. 06. 23

1. 소개

컴퓨터 그래픽스 렌더링(rendering) 분야에서 사실적인 이미지를 생성하기 위하여 객체 표면의 재질을 수학적으로 표현하는 방법 중 하나인 양방향 반사분포함수(BRDF: bidirectional reflectance distribution functions)는 물체의 표면에 입사된 한 방향의 빛에 대해 특정 방향으로의 반사되는 빛의 양을 저장하고 있다. 특정 BRDF들은 누적분포함수(CDF: cumulative distribution function)의 역함수를 통해 중요 샘플을 손쉽게 만들어 렌더링을 가속화함으로써 빠르게 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 방법은 다양한 BRDF를 렌더링 하기에는 부적절한 방법이다. 본 연구에서는 일반적인 BRDF를 정확하고 빠르게 렌더링 하는 방법으로 중요 샘플링 기법을 적용한 적은 수의 샘플로 그래픽 하드웨어를 사용하여 빠르게 렌더링 하는 방법을 제안한다.

BRDF를 이용한 렌더링은 모든 방향에서 입사 및 반사되는 빛들을 계산을 하며, 이는 많은 양의 계산을 요구한다. 따라서 렌더링 품질을 낮추지 않고 입사 및 반사되는 빛을 샘플링 하는 것이 중요하다. 일반적으로 렌더링 분야에서는 몬테카를로 샘플링을 많이 사용하는데, 이 기법은 규칙적 샘플링(regular sampling)에서 발생하는 특정한 방향으로의 결점(artifact)를 없애주고 비교적 쉽게 구현할 수 있다. 반면, 적은 수의 샘플을 사용했을 때 화소 노이즈가 심각하게 발생한다. 렌더링 되는 지점에 미치는 영향에 따라 샘플링 수를 달리하는 중요 샘플링 기법(importance sampling)을 사용하여 몬테카를로의 화소 노이즈를 완화할 수 있다. 그러나 샘플이 매우 적을때 여전히 화소 노이즈가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 시점방향의 변화에 따라 중요 샘플링 기법을 통하여 샘플링 된 점들을 연결하여, 시점방향의 변화에 따라 연속적으로 변하는 샘플집합인 샘플 쓰레드를 생성함으로써, 화소 노이즈를 제거한다. 또한 BRDF데이터에 따라 미리 연산을 할 수 있어, 실행시간의 연산을 감소하여 하드웨어를 통한 빠른 렌더링이 가능하다.

2. 관련 연구

객체 표면의 재질을 표현하는 수학적 표현인 BRDF는 반사 현상을 수학적인 함수 형태를 이용하여 표현된 BRDF 재질이 사용되다가[1, 2, 3, 4, 5], Ward[6]에 의해 실제 재질을 측정하여 BRDF를 만든 측정 BRDF 재질도 함께 사용되기 시작하였다.

이러한 다양한 BRDF 재질 렌더링에는 일반적으로 샘플링을 이용한 렌더링 기법이 많이 사용된다. 이를 살펴보면, Veach[7]의 연구에서는 몬테카를로 샘플링 기법을 이용한 기본적인 렌더링에 대해 기술하였다. 이후 Pharr과 Humphreys[8], Lawrence[9]의 연구에서는 BRDF를 중요 샘플링을 이용하여 렌더링을 하는 방법이 연구되는가 하면, Shirley[10], Agarwal[11]의 연구에서는 광원을 중요 샘플링을 통해 렌더링 하는 방법도 연구되었다. 최근에는 웨이블릿을

이용하여 BRDF와 환경 조명을 중요 샘플링을 하여 렌더링을 하기도 한다[12]. 그리고 누적분포함수의 역함수를 구하기 어려운 상황에서는 중요 샘플링을 다시 샘플링 하여 렌더링 하는 방법도 연구되었다[13, 14]. 그러나 아직까지 이런 중요 샘플링 기법들은 반구 공간상에서 직접 샘플링을 하지는 않는다.

점점 하드웨어가 발전함에 따라, 물리기반 재질을 실시간에 렌더링 하려는 시도가 증가하였다. Kautz[15]는 4차원 데이터인 BRDF를 분해하여 2차원 텍스처로 만든 후 이를 통해 렌더링을 하여 실시간에 렌더링이 가능하였다. 이를 더 발전시켜 McCool[16]에서는 수치적 기법인 준동형 인수분해(homomorphic factorization)을 통해 BRDF를 단순화하여 렌더링을 가능하게 하였다. 이처럼 BRDF데이터를 단순화 하여 렌더링을 하는가 하면 Colbert[17]는 중요 샘플링 기법을 mip-map(mip-map)을 통한 여과된(filtered) 환경 조명을 가지고 렌더링 함으로써 샘플링을 줄이는 중요 샘플링 기법을 그래픽 하드웨어상에서 구현하였다.

3. 스레드(thread) 기반 샘플링

전역조명 렌더링에서 객체 표면의 재질을 표현하는 BRDF를 이용한 렌더링은 식 (1)과 같다.

$$L_o(\omega_o) = L_e(\omega_o) + \int_h f(\omega_i, \omega_o) L_i(\omega_i) (n \cdot \omega_i) d\omega_i. \quad (1)$$

여기서 n 은 현재 점에서의 법선 방향이며, $L_o(\omega_o)$, $L_e(\omega_o)$, $L_i(\omega_i)$ 는 각각 ω_o 방향으로 나가는 빛의 총량, ω_o 방향으로 스스로 방출하는 빛의 총량, ω_i 방향에서 들어오는 빛의 총량이며, $f(\omega_i, \omega_o)$ 는 BRDF로 ω_i 방향으로 들어온 빛에 대해 ω_o 방향으로 방출되는 양이다. h 는 현 지점을 둘러싸고 있는 반구(hemisphere) 영역이다. 즉 ω_o 방향으로 나가는 빛의 총량은, 반구 내의 모든 방향으로 들어오는 빛에 의해 ω_o 방향으로 반사되는 빛의 양에 스스로 방출하는 빛의 총량을 합한 식이다. 식 (1)은 빛의 물리적 현상을 정확하게 계산할 수 있는 식인 반면, 적분을 수행해야 함으로 계산량이 증가한다.

컴퓨터 그래픽스 분야에서 일반적으로 이러한 적분 형태의 렌더링 문제를 샘플링(sampling)을 이용하여 적분을 근사함으로써 풀고 있다. 일반적으로 몬테카를로(Monte-Carlo)방식은 난수(random number)를 사용하여 샘플링을 하게 되는데 이 방법은 빛의 복사휘도분야(radiance field)를 정의하는 미적분 방정식들을 푸는데 쉽게 사용할 수 있으며 샘플 수 증가에 따라 더 정확한 결과를 도출한다. 식 (1)을 m 개의 몬테카를로 샘플링을 이용한 식으로 바꾸면 식 (2)와 같다.

$$L_o(\omega_o) = L_e(\omega_o) + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{f(s_k, \omega_o) L_i(s_k) (n \cdot s_k)}{p(s_k)}. \quad (2)$$

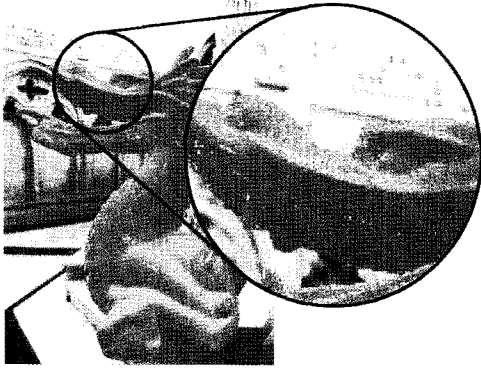


그림 1: 몬테카를로를 이용하여 중요 샘플링을 통해 렌더링 한 결과. (샘플 수 : 100)

여기서 s_k 는 BRDF에서 시점 방향이 ω_o 일 때의 k 번째 입사 방향 샘플, $p(s_k)$ 는 샘플 s_k 가 가지는 확률분포함수(probability distribution function)의 값이다. 또한 BRDF가 등방성 BRDF(isotropic BRDF)일 때는 시점 방향 ω_o 를 구면 좌표계(θ, ϕ)의 θ 값만으로 표현할 수 있다. 이 시점 방향의 θ 값을 o 라 할 때 식 (3)와 같다.

$$L_o(o) = L_c(o) + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{f(s_k, o) L_i(s_k)(n \cdot s_k)}{p(s_k)}. \quad (3)$$

몬테카를로를 이용한 전역조명 렌더링은 충분히 많은 수의 샘플을 계산하지 않으면, 그림 1과 같이 렌더링 이미지상에 많은 화소 노이즈를 포함한다. 화소 노이즈를 줄이기 위해 많은 수의 샘플을 계산하면 최종렌더링 속도가 느려진다.

몬테카를로 샘플링을 이용한 적분계산에서 화소 노이즈가 생기는 가장 큰 이유는 샘플링되는 위치들이 임의의 위치이므로, 인접한 화소들의 샘플 위치가 연관성이 없기 때문이다. 따라서 샘플 수가 적은 경우는 전체 화소들의 오차값의 합은 적을 수 있으나 인접한 화소간의 차이는 커지기 때문에 화소 노이즈가 발생한다. 전체적인 오차를 줄이는 것이 아니라 국지적인 차이인 화소 노이즈를 없애기 위해, 각 샘플들을 시점 방향 o 의 변화에 따라 연결한 샘플 쓰레드를 이용한다. 여기서 샘플은 적은 수의 샘플에서 전체적인 오차를 줄이기 위하여 쓰레드로 묶은 각 샘플은 확률 분포 함수를 이용한 중요 샘플링 기법으로 구한다. 샘플쓰레드는 유사한 시점방향, 즉 인접한 화소들간에 연결성을 가지게 되어 샘플링을 통한 렌더링의 국지적인 화소 노이즈 현상을 없애준다. 또한 샘플 쓰레드는 BRDF 재질에 따라 미리 연산하여 놓고 사용함으로써 실행 시간 동안의 연산을 크게 줄여줄 수 있고, 그래픽 하드웨어 환경에서 사용하기에 적합하여 렌더링 속도를 비약적으로 개선할 수 있다.

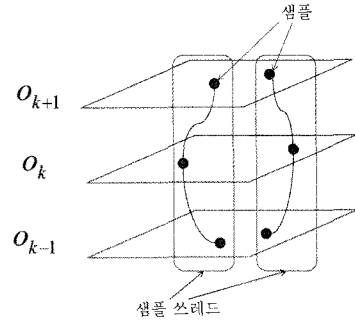


그림 2: 시점 방향에 따른 샘플 쓰레드 구조.

3.1 샘플 쓰레드

샘플 쓰레드는 그림 2와 같이 각 샘플들의 시점 방향에 따른 변화를 추적하여 연결한 것이다. 따라서 등방성의 BRDF 재질에서는 한 샘플이 시점 방향에 따라 이동하는 경로인 선 형태로 나타난다.

그러나 샘플들의 연결만으로는 긴밀한 연속성을 획득하지 못한다. 샘플들을 연결하기 전, 생성 시에 서로 인접한 시점 방향 o_k, o_{k+1} 사이에서 샘플 이동을 최소화 하는 것이 중요하다. 그리고 샘플 쓰레드의 수가 매우 많다면 몬테카를로를 이용한 전역조명 렌더링과 속도 면에서 큰 차이가 없기 때문에, 각 시점 방향에 따른 샘플들은 적은 수의 샘플로 전체 영역을 표현 할 수 있도록 중요 샘플링 기법을 사용한다. 중요 샘플링 기법으로 생성된 샘플들을 연결하여 샘플 쓰레드로 나타냄으로써 시점 방향 o 에 따른 샘플들은 긴밀한 연속성을 가진다. 그 결과, 렌더링 시에 연속된 시점 방향을 가지는 인접한 화소들 사이에서 양자화된 샘플링 집합들이 연속성을 갖기 때문에 화소 노이즈가 생기지 않은 결과 이미지를 획득할 수 있다.

3.2 샘플 쓰레드 구현

샘플 쓰레드의 생성은 전처리 단계에서 수행하며 각 BRDF마다 별도로 생성한다. 이는 Blinn-Phong BRDF, Lafortune BRDF, Ashikhmin BRDF 등의 현상학(phenomenological)적인 BRDF 재질이나, Cook-Torrance BRDF, He BRDF 등의 물리적(physical)인 BRDF 재질인 경우, 누적분포함수의 역함수를 이용하여 중요 샘플링을 실시간에 계산 할 수 있으나, MERL[18], CURET[19]등과 같은 측정(measured) BRDF 재질인 경우 실제 샘플분포를 추정하여 다시 샘플링을 수행 하는 과정이 많은 연산 시간을 요구하기 때문이다. 전처리 단계를 통해 미리 계산된 샘플 쓰레드는 BRDF 재질 데이터가 변화하지 않는 한 렌더링 단계에서 다시 계산할 필요가 없다.

인접한 시점 방향에 따른 연관성을 갖는 샘플 쓰레드의 생성을 위해, 중요 샘플링 기법으로 생성된 샘플들이 각 시점 방향에 따라 최소한의 이동이 이루어 지도록 만들어야 한다. 이전

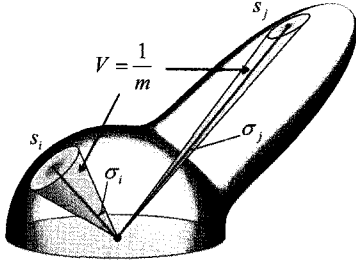


그림 3: 코사인 강조(cosine weighted)BRDF 로브에서의 샘플 원뿔과 각거리.

시점 방향의 샘플들의 위치에서 간단한 힘 모델(force model)의 시뮬레이션을 통해 현재 시점 방향에서의 각 샘플들의 위치를 구할 수 있다. 시점 방향의 변화에 따라 BRDF 재질 데이터가 연속적으로 변화한다고 가정한다면, 이러한 시뮬레이션을 통해 최소한의 움직임만을 갖는 샘플 점의 위치를 빠르게 구할 수 있다.

3.2.1 중요 샘플링 기법 시뮬레이션

양자화된 \$j\$번째 시점 방향 \$o_j\$에 대한 \$k\$번째 입사 샘플 \$s_k\$의 확률분포함수 \$p(s_k)\$는 BRDF의 데이터 값으로 식 (4)를 통해 구할 수 있다.

$$p(s_k) = \frac{f(s_k, o_j)(n \cdot s_k)}{\int_h f(\omega_i, o_j)(n \cdot \omega_i) d\omega_i} \quad (4)$$

일반적인 중요 샘플링 기법인 경우 확률분포함수 \$p(s_k)\$를 구한 뒤, 확률분포에 따른 입의 샘플링을 수행하기 때문에, 일정 수 이상의 샘플을 생성해야만 높은 품질의 렌더링 결과를 얻을 수 있다. 적은 수의 샘플로 품질을 만족시키기 위해 각 샘플들의 분포가 확률분포함수와 일치하게 위치시켜야 한다. 이를 위해 각 샘플마다 샘플 방향을 중심으로 확률분포함수 값에 따라 원뿔 형태의 영역을 만들고, 각 샘플들의 영역이 최대한 겹치지 않도록 샘플들을 위치시키면 확률분포함수에 근접한 샘플링 결과를 얻을 수 있다.

시점 방향 \$o\$를 가지는 반구(hemisphere) 위에 \$m\$ 개의 입사 방향 샘플이 있을 때 \$k\$번째 샘플의 영역은 그림 3의 형태로 나타나며, 식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$\int_{\mu(s_k, \sigma_k)} p(\omega_i) d\omega_i = \frac{1}{m} \quad (5)$$

식 (5)는 \$k\$번째 샘플 \$s_k\$의 각거리(angular distance) \$\sigma_k\$ 이내의 원뿔의 영역을 \$\mu(s_k, \sigma_k)\$이라 할 때, 이 영역 안의 입사 방향 \$\omega_i\$들의 시점 방향 \$o\$로의 확률분포를 모두 더한 값이 \$\frac{1}{m}\$가 되도록 하는 것이다. 이 적분 식을 샘플링을 통한 식으로 변환하면, 식 (6)과 같다.

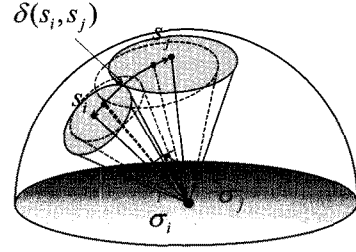


그림 4: 구면체상에서 힘 시뮬레이션.

$$\frac{1}{t} \sum_{l=1}^t p(s_l) = \frac{1}{m}, \quad s_l \in \mu(s_k, \sigma_k). \quad (6)$$

샘플 \$s_i\$는 구면체 상의 영역인 \$\mu(s_k, \sigma_k)\$이내를 \$t\$개의 균등 샘플링(uniform sampling)을 한 것으로, \$\xi_1, \xi_2\$가 각각 0부터 1까지의 폰테카를로 기법의 균등 샘플링일 때 식 (7)을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned} \theta_l &= \cos^{-1} \xi_1, \quad (\theta_l < \sigma) \\ \phi_l &= 2\pi \xi_2. \end{aligned} \quad (7)$$

반구 내에서 각 샘플 원뿔들이 겹치지 않게 하기 위해, 서로 밀어내는 힘을 디자인하여 시뮬레이션을 통해 샘플 위치를 구한다. 이때 한 샘플 \$s_i\$에 대해서 다른 샘플 \$s_j\$들이 있을 때 \$s_i\$에 작용하는 힘 \$F(s_i)\$를 다음 식 (8)과 같이 정의한다.

$$F(s_i) = \sum_{s_j} f\left(\frac{\delta(s_i, s_j)}{\sigma_i + \sigma_j}\right) \times \tau(s_i, s_j), \quad \text{단, } (s_i \neq s_j). \quad (8)$$

$$f(x) = \begin{cases} 9.0 & \text{if } x \leq 0.1 \\ \frac{1}{x} - 1.0 & \text{if } 0.1 < x \leq 1 \\ 0 & \text{if } x > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\tau(x, y) = \frac{x \times (x \times y)}{\|x \times (x \times y)\|} \quad (10)$$

샘플 \$s_i\$와 \$s_j\$사이의 각거리 \$\delta(s_i, s_j)\$가, \$s_i\$와 \$s_j\$의 샘플 원뿔 각 \$\sigma_i, \sigma_j\$의 합보다 작을 때, 그림 4와 같이 구면체 상에서 밀어주는 힘을 생성하도록 한다. 샘플들간의 각거리가, 두 샘플 원뿔 각의 합보다 작을수록 서로 밀어내는 힘을 증가시키기 위해 반비례를 이용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이동 방향은 \$s_i\$의 접평면 공간(tangent space)에서 \$s_j\$위치의 반대 방향으로, 식 (10)을 통해 계산할 수 있다. 각 샘플 위치에서 작용하는 힘

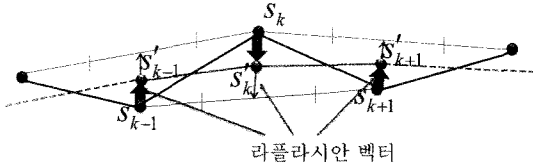


그림 5: 라플라시안 평활법.

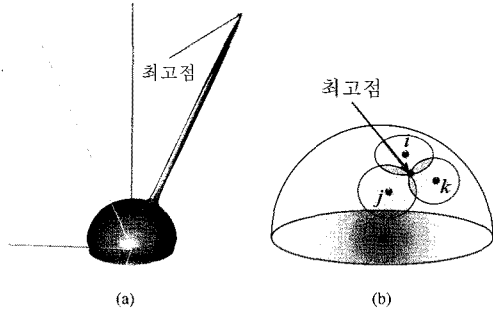


그림 6: alumina-oxide재질의 로브(lobe)형태와 최고점과 최고점이 포함되지 않는 경우.

$F(s_i)$ 를 이용하여 현재 샘플 s_i 의 위치를 움직이는 시뮬레이션 하면, 각 시점 방향마다 중요 샘플링이 된 샘플의 위치를 얻을 수 있다.

3.2.2 쓰레드 평활

힘 모델을 이용한 시뮬레이션의 경우, 진동 현상이나 오차로 인한 샘플 쓰레드의 꺾임현상이 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위해 그림 5와 같이 라플라시안 평활법(laplacian smoothing)을 사용하여 샘플 s_{k-1}, s_k, s_{k+1} 을 s'_{k-1}, s'_k, s'_{k+1} 로 라플라시안 벡터 방향으로 라플라시안 벡터 길이의 0.5 만큼 이동하여 샘플 쓰레드를 평활 시킨다.

3.2.3 BRDF 최고점(peak point)

BRDF 재질에 따라, 그림 6(a)와 같이 시점 방향에 따른 입사 방향의 BRDF값이 주변에 비해 큰 최고점이 발생할 수 있다. 이러한 재질에 힘 모델을 이용한 시뮬레이션을 적은 수의 샘플로 수행할 때, 그림 6(b)와 같이 서로 다른 샘플 i, j, k 가 최고점 주변에서 평형상태를 이루는 경우, 최고점의 값이 렌더링 결과에 반영되지 않을 수 있다. 이 최고점은 BRDF를 이용한 렌더링에서 다른 위치의 샘플보다 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에, 최고점들에 샘플을 우선적으로 배치한 후 시뮬레이션을 수행한다.

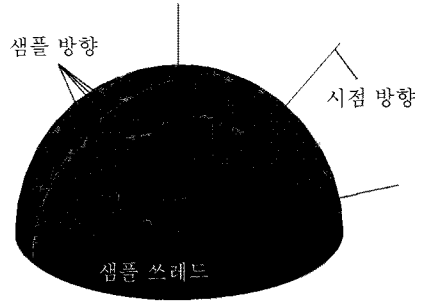


그림 7: 반구 공간상에서의 시점 방향에 따른 샘플 쓰레드.

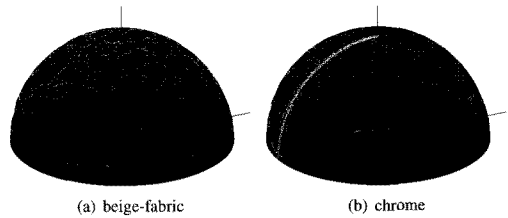


그림 8: 각 BRDF별로 생성된 쓰레드 이미지.

3.3 쓰레드 결과

그림 7은 시점 방향의 변화에 따른 샘플 방향의 경로를 이어준 결과가 샘플 쓰레드로 나타난 것을 보여준다. 그림 8은 MERL의 측정 BRDF 재질들 중 몇몇의 재질에 대해 각각 100개씩의 샘플 쓰레드를 생성한 결과이다. 샘플 쓰레드의 생성은 각 측정 BRDF 재질마다 약 105초 가량 소요되었다. 난반사(diffuse reflection) 경향이 강한 BRDF의 경우, 그림 8(a)와 같이 쓰레드들이 넓게 퍼진 상태로 나타나며, 정반사(specular reflection) 경향이 강한 BRDF는 그림 8(b)와 같이 시점 방향의 정반사 방향으로 쓰레드가 몰려서 생성되는 경향이 나타난다. 이와 같은 샘플 쓰레드는 구면좌표계상의 위치 θ, ϕ , 그리고 그 위치에서의 확률분포함수 값을 텍스처의 형태로 저장하여 렌더링에 사용한다. 이 때 시점방향을 90개로 나눈 100개의 샘플 쓰레드를 단정도 부동소수점 형태로 저장하면 텍스처 용량은 108KB가 된다. 이는 Matusik이 제안한 측정 BRDF 데이터를 단정도 부동소수점 형태로 사용할 때 17.496KB의 GPU 메모리가 요구되는 것에 비해, 매우 적은 것을 알 수 있다.

4. 실시간 BRDF 재질 렌더링

본 연구에서는 3장에서 생성된 샘플 쓰레드를 사용한 렌더링이 GPU 환경에서 실시간으로 동작하도록 OpenGL과 GLSL(OpenGL shading language)라이브러리를 사용하여 구현하였다. 전체 구조는 그림 9와 같이 기하정보 캐싱과 BRDF 렌더링의 2부분으로 나뉜다.

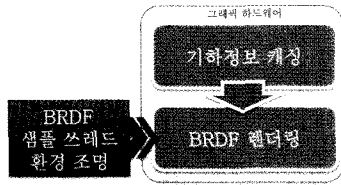


그림 9: 실시간 렌더링 시스템 구조.

기하정보 캐싱 부분은, 현재 시점 방향에서의 기하 모델의 위치정보와 법선(normal) 방향 정보를 이미지 형태로 저장한다. 이미지 형태로 저장된 데이터를 사용하여, 화소별로 위치 정보와 법선 방향 정보를 얻기 위해 변환행렬 계산과 오브젝트 구조 계산을 할 필요가 없기 때문에 속도를 향상시킬 수 있다. 캐싱 시, 기하 정보는 최종 결과보다 더 큰 해상도를 사용하여, 부화소(sub-pixel)단위로 렌더링 할 수 있도록 한다.

BRDF 렌더링 부분은, 캐싱된 기하 정보, 샘플 쓰레드, BRDF 정보, 환경 조명(environment light) 정보를 모두 텍스처 형태로 입력 받아 식 (2)를 계산하여 최종 렌더링 결과를 얻는 부분으로, OpenGL의 단편 셰이더(fragment shader)에서 계산한다. 이때 부화소의 개수만큼 샘플 쓰레드를 분할하여 각각 따로 계산을 하여 최종 화소 렌더링에 합산하여 구한다. 즉, 100개의 샘플 쓰레드가 있고 부화소 개수가 4개일 때 각 부화소 별로 25개의 샘플 쓰레드에서 샘플을 추출하여 식 (2) 연산을 수행하게 된다. 이때, Colbert의 연구[17]와 같이 환경 조명에 mip-map(mip-map)을 사용하고 확률분포함수에 따라 필터링하여 환경 조명 값을 얻는다면, 넓은 입체각(solid angle)을 갖는 작은 확률분포함수 값의 샘플에서 넓은 환경조명에 대한 정보를 받아들일 수 있기 때문에, 난반사 성향의 재질을 적은 수의 샘플로 표현할 수 있다.

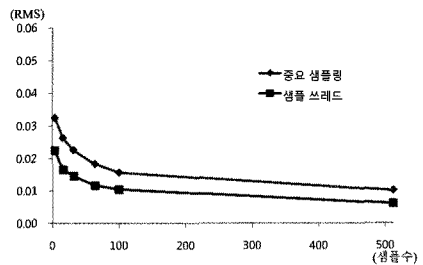
렌더링 결과를 화면에 보여주기 위한 영상 후처리(image postprocessing)과정으로 톤 매핑(tone mapping)을 수행한다. 이는 환경맵이나 BRDF가 HDR(high dynamic range)로 이루어져 있으므로 이를 화면상에 바로 보여주기는 한계가 있기 때문에, 감마(gamma)나 노출(exposure)을 조정하여 출력하는 방법을 말한다. 보통의 HDR영상에서 감마를 2.2로 노출을 1.0으로 맞추는 것으로, 일반적인 LDR(low dynamic range) 이미지의 색상을 표현할 수 있다.

5. 결과

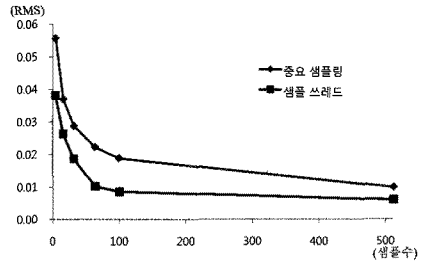
본 연구에서 제안하는 샘플 쓰레드를 이용한 그래픽 하드웨어 가속 렌더링 시스템의 결과로 MERL에서 제안한 측정 BRDF 재질을 렌더링 하였다. 이 렌더링 시스템의 실험은 인텔 Core2Duo E8500, 4GB 메모리, NVIDIA GeForce GTX 280 GPU로 구성된 시스템에서 수행하였으며, OpenGL의 GLSL을

표 1: 640×480 크기로 dragon을 렌더링 하였을때의 샘플 쓰레드 개수별 렌더링 시간.

쓰레드 수	렌더링 시간(fps)
1	50
4	50
16	50
32	35.7
64	16.6
100	10.2
512	1.9



(a) alumina-oxide



(b) aluminium

그림 12: 샘플 쓰레드를 통한 렌더링과, 몬테카를로 중요 샘플링을 통한 렌더링의 RMS오차 비교.

이용하여 구현하였다. MERL의 측정 BRDF 중 몇몇 재질들의 렌더링 결과는 그림 13과 같다.

표 1은 100,000개의 면을 갖는 드래곤 모델에 대해 그림 13를 640×480 크기로 렌더링 할 때, 각 쓰레드 개수 별로 렌더링 시간을 측정된 결과를 나타낸다. 20여 개 까지는 쓰레드 개수의 증가에 따른 부하가 크지 않지만, 그 이상일 때 하드웨어의 텍스처(texture)의 접근과 렌더링 연산이 많아지기 때문에 쓰레드 개수에 비례하여 렌더링 시간이 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 10은 alumina-oxide 재질을 Matusik[18]이 제안한 2차원 누적분포함수를 통한 중요 샘플링 기법으로 렌더링한 샘플 개수별 결과를 나타내며, 그림 11은 같은 재질을 본 논문에서 제안한 쓰레드 기반 렌더링 기법으로 렌더링한 쓰레드 개수별 렌더링 결과를 나타낸다. 쓰레드 기반 렌더링은 그림 11에서

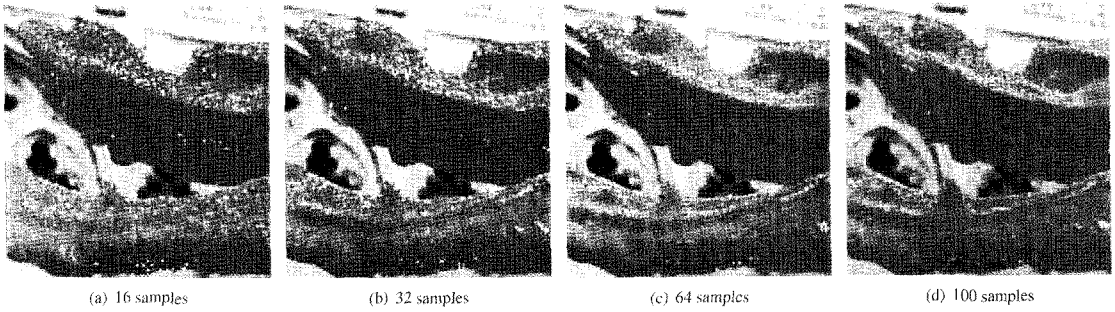


그림 10: alumina-oxide 재질의 Matusik방법을 이용한 중요 샘플 개수별 렌더링 결과.

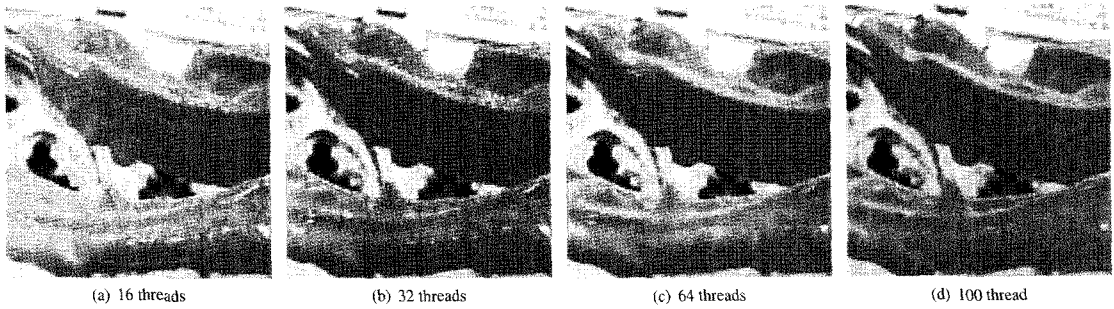


그림 11: alumina-oxide 재질의 샘플 쓰레드 개수별 렌더링 결과.

표 2: 샘플 수에 따른 RMS 오차 측정 결과.

(RMS)	alumina-oxide		aluminium	
샘플 수	중요 샘플링	쓰레드	중요 샘플링	쓰레드
4	0.03237	0.02246	0.05572	0.03811
16	0.02623	0.01646	0.03696	0.02626
32	0.02254	0.01451	0.02875	0.01862
64	0.01831	0.01164	0.02230	0.01018
100	0.01565	0.01045	0.01886	0.00856
512	0.01008	0.00603	0.00979	0.00596

표 3: 샘플 수에 따른 SSIM 측정 결과.

(SSIM)	alumina-oxide		aluminium	
샘플 수	중요 샘플링	쓰레드	중요 샘플링	쓰레드
4	0.7995	0.9200	0.7506	0.8727
16	0.8697	0.9642	0.8605	0.9316
32	0.8992	0.9700	0.9082	0.9672
64	0.9260	0.9754	0.9431	0.9896
100	0.9411	0.9764	0.9600	0.9931
512	0.9717	0.9891	0.9892	0.9968

화소 노이즈 현상이 없는 것을 확인할 수 있다. 표 2와 그림 12는 Matusik의 기법과, 본 논문에서 제안한 샘플 쓰레드 기법의 RMS(root mean square)오차 측정 결과이다. 이때 비교한 실제 값은 중요 샘플링 기법으로 최소 4000여 개의 샘플을 사용하여 렌더링 한 결과를 사용하였다. 중요 샘플링 기법을 이용한 렌더링에 비해 샘플 쓰레드를 이용하여 렌더링 한 결과는 국지적인 화소 노이즈가 없어진 것 뿐만 아니라 전체 이미지의 오차도 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한 표 3은 SSIM(structural similarity)[20] 측정 결과이며, SSIM은 휘도 유사성(luminance similarity), 대비 유사성(contrast similarity), 구조상의 유사성(structural similarity)을 측정함으로써 같은 수치적인 오차를 가진 이미지라도 사람이 보기에 얼마나 유사한지를 측정할 수 있는 측정 방법이다. SSIM의 결과는 Matusik의 기법에 비해 쓰레드 기반 렌더링이 더 높은 시각적 유사성을 보이며, 샘플 수를 줄인 쓰레드 기반 렌더링 결과의 RMS 오차가 더 큰 경우에도 SSIM 결과가 높아 시각적으로 더 유사하게 보인다는 것을 알 수 있다.

상호작용 가능한 속도를 고려했을 때 100개의 쓰레드를 이용하여 40여 종의 측정 BRDF 렌더링 결과에 대한 RMS 오차와 SSIM을 측정한 결과의 평균은 표 4와 같다. 이를 통해 100개 정도의 적은 샘플 쓰레드만을 사용하여 프리뷰(preview)에서 충분히 수용 가능한 고품질의 렌더링을 결과를 얻을 수 있음

표 4: 40여 종의 측정 BRDF를 100개의 샘플을 사용하여 렌더링 한 결과의 RMS오차, SSIM 평균.

RMS오차		SSIM	
중요 샘플링	쓰레드	중요 샘플링	쓰레드
0.0162	0.0131	0.9601	0.9889



그림 14: beige-fabric BRDF에 코팅층으로 Torrance-Sparrow BRDF를 얹은 2-레이어 BRDF 렌더링.

을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 샘플쓰레드를 통한 실시간 BRDF 프리뷰 렌더러를 제안하였다. 중요 샘플링 기법의 요소를 포함하는 샘플쓰레드를 이용하여 인접한 화소들의 연결성을 확립하고, 확률분포함수에 따른 환경맵 필터를 사용하여, 적은 수의 샘플로도 화소 노이즈가 없는 적합한 품질의 렌더링이 가능하였다. 또한, 그래픽 하드웨어를 통한 렌더링에 적합하게 구현하여 실시간에 렌더링이 가능하도록 했다. 특히 BRDF의 형태나 특성에 관계 없이 샘플쓰레드 생성이 가능하기 때문에, 현상학적인 BRDF나 물리적인 BRDF로 근사하여 렌더링을 할 필요가 없어, 기존의 측정 BRDF의 렌더링 기법들과 달리 직접 렌더링이 가능하다.

샘플쓰레드를 이용한 렌더링은 BRDF 데이터를 변환하는 대신 샘플링 쓰레드 데이터를 따로 가지고 연산을 하기 때문에, BRDF와 관련된 여러 성질의 렌더링에 쉽게 적용할 수 있다. 그림 14는 다층 BRDF 렌더링에 샘플쓰레드를 활용한 2-레이어 렌더링 결과 이미지이다.

본 연구에서 샘플쓰레드를 이용한 렌더링은 등방성(isotropic) BRDF에 대해서만 언급하였으나 기술적으로 비등방성(anisotropic) BRDF를 지원하기 위해서는 1차원의 쓰레드를 확장하여 2차원의 쓰레드로 만드는 것으로 지원 가능하다. 2차원으로 확장된 쓰레드를 이용한 렌더링은, 2차원 쓰레드를 위한 추가적인 저장공간이 요구되지만, 경도에 따른 선형보간 연산만이 한번 더 수행되는 것이기 때문에 렌더링 속도에는 큰 영향을 주지 않을 것이다.

향후 연구로는 BRDF에 대한 샘플쓰레드를 전처리 단계에서 수행하는 것이 아니라, GPU의 병렬 계산 성능을 통해 실시간으로 샘플쓰레드를 생성하여 BRDF의 변화나 조정이 가능하도록 확장하는 것이다. 이를 위해서 샘플쓰레드의 위치 생성에 사용되는 힘에 기반한 시뮬레이션 기법을 더욱 간단하고 빠르게 연산할 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] B. T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," *Commun. ACM*, vol. 18, no. 6, pp. 311–317, 1975.
- [2] J. F. Blinn, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 11, no. 2, pp. 192–198, 1977.
- [3] R. L. Cook and K. E. Torrance, "A reflectance model for computer graphics," *ACM Trans. Graph.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–24, 1982.
- [4] X. D. He, K. E. Torrance, F. X. Sillion, and D. P. Greenberg, "A comprehensive physical model for light reflection," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 25, no. 4, pp. 175–186, 1991.
- [5] E. P. F. Lafortune, S.-C. Foo, K. E. Torrance, and D. P. Greenberg, "Non-linear approximation of reflectance functions," in *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997, pp. 117–126.
- [6] G. J. Ward, "Measuring and modeling anisotropic reflection," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 26, no. 2, pp. 265–272, 1992.
- [7] E. Veach, "Robust monte carlo methods for light transport simulation," Ph.D. dissertation, Stanford, CA, USA, 1998, adviser-Guibas, Leonidas J.
- [8] M. Pharr and G. Humphreys, *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004.
- [9] J. Lawrence, R. Ramamoorthi, and S. Rusinkiewicz, "Efficient brdf importance sampling using a factored representation," in *ACM SIGGRAPH*, 2004, pp. 496–505. [Online]. Available: <http://graphics.cs.berkeley.edu/papers/Lawrence-EBI-2004-07/>
- [10] P. Shirley, C. Wang, and K. Zimmerman, "Monte carlo techniques for direct lighting calculations," *ACM Trans. Graph.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–36, 1996.

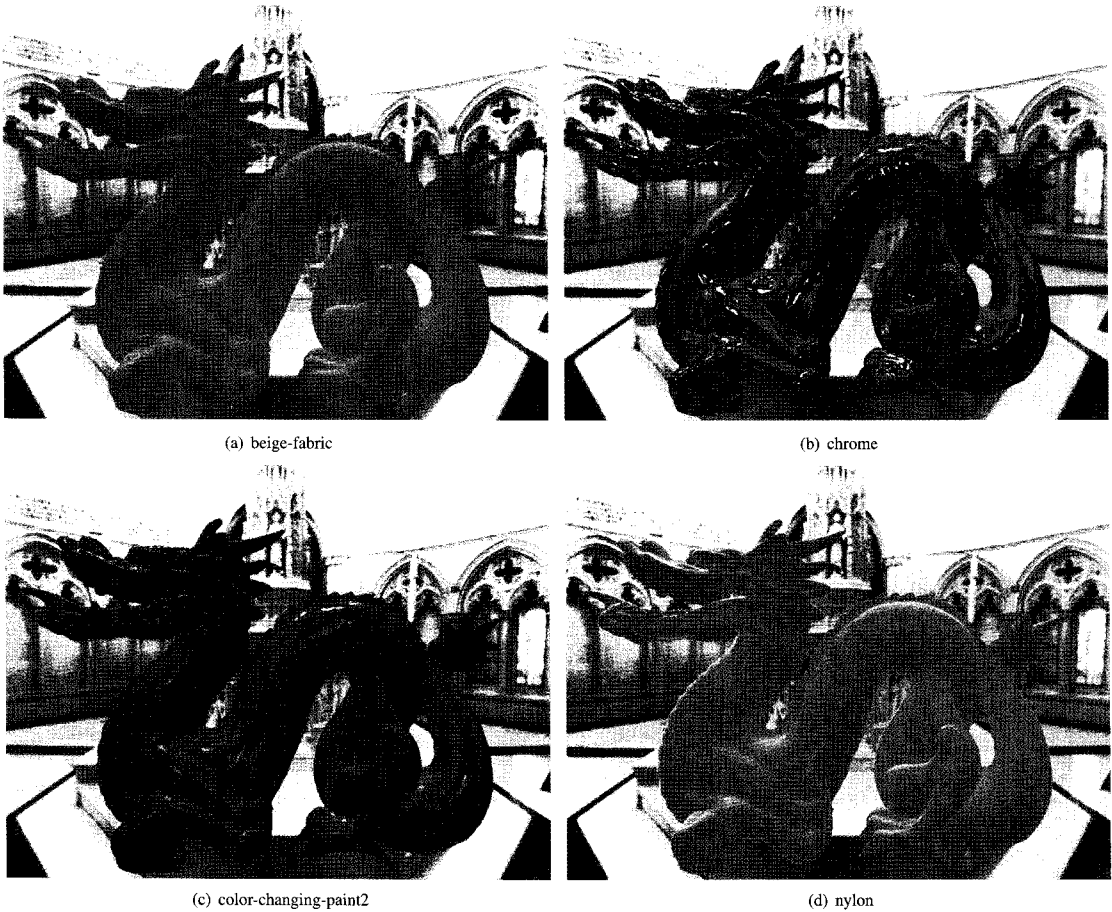


그림 13: 샘플 쓰레드가 100개일때 각 재질별 렌더링 결과.

- [11] S. Agarwal, R. Ramamoorthi, S. Belongie, and H. W. Jensen, "Structured importance sampling of environment maps," *ACM Trans. Graph.*, vol. 22, no. 3, pp. 605–612, 2003.
- [12] P. Clarberg, W. Jarosz, T. Akenine-Möller, and H. W. Jensen, "Wavelet importance sampling: Efficiently evaluating products of complex functions," in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005*, 2005.
- [13] D. Burke, A. Ghosh, and W. Heidrich, "Bidirectional importance sampling for direct illumination," in *Rendering Techniques 2005: 16th Eurographics Workshop on Rendering*, June 2005, pp. 147–156.
- [14] J. F. Talbot, D. Cline, and P. K. Egbert, "Importance resampling for global illumination," in *Rendering Techniques 2005 Eurographics Symposium on Rendering*, K. Bala and P. Dutré, Eds. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2005, pp. 139–146.
- [15] J. Kautz and M. D. McCool, "Interactive rendering with arbitrary brdfs using separable approximations," in *IN EUROGRAPHICS RENDERING WORKSHOP*, 1999, pp. 281–292.
- [16] M. D. McCool, J. Ang, and A. Ahmad, "Homomorphic factorization of brdfs for high-performance rendering," in *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 2001, pp. 171–178.
- [17] M. Colbert and J. Křivánek, "Real-time shading with filtered importance sampling," in *SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 sketches*. New York, NY, USA: ACM, 2007, p. 71.

- [18] W. Matusik, H. Pfister, M. Brand, and L. McMillan, "A data-driven reflectance model," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 3, pp. 759–769, July 2003.
- [19] K. Dana, B. Van-Ginneken, S. Nayar, and J. Koenderink, "Reflectance and Texture of Real World Surfaces," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 18, no. 1, pp. 1–34, Jan 1999.
- [20] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, S. Member, E. P. Simoncelli, and S. Member, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, pp. 600–612, 2004.

〈저자 소개〉

김순현

- 2005년 아주대학교 미디어학과 학사
- 2007년 아주대학교 미디어학과 석사
- 2007년~현재 아주대학교 정보통신공학과 박사과정
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스



경민호

- 1993년 포항공과대학교 전자계산학과 학사
- 1995년 포항공과대학교 전자계산학과 석사
- 2001년 퍼듀대학교 전자계산학과 박사
- 2002년~현재 아주대학교 미디어학과 부교수
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, CAD/CAM



이주행

- 1994년 포항공과대학교 전자계산학과 학사
- 1996년 포항공과대학교 전자계산학과 석사
- 1999년 퍼듀대학교 전자계산학과 박사
- 1999년~현재 한국전자통신연구원 융합기술연구본부 책임연구원
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, CAD/CAM

