

포톤 탐사법을 이용한 개선된 점진적 포톤 매핑

이상길^o 신병석

인하대학교 컴퓨터 · 정보 공학과

lsg@inha.edu bsshin@inha.ac.kr

Improved Progressive Photon Mapping Using Photon Probing

Sang-Gil Lee^o Byeong-Seok Shin

Dept. of Computer Science and Information Engineering, Inha University

요 약

포톤 매핑은 대표적인 전역 조명 방법으로써 광원에서 많은 수의 포톤을 방출하여 이를 이용해 사실적인 렌더링을 수행한다. 하지만 매우 많은 수의 포톤을 추적하기 때문에 실시간 렌더링이 힘들고 많은 양의 메모리를 사용하는 문제가 있다. 이러한 문제를 개선한 방법이 점진적 포톤 매핑이다. 기존의 점진적 포톤 매핑은 먼저 광선 추적법을 통해 각 광선과 물체와의 충돌 위치를 찾는다. 다음으로 포톤 추적 단계에서는 반복적으로 적은 수의 포톤을 방출하고, 충돌 위치를 중심으로 하며 고정된 반지름을 가지는 구 안에 들어오는 포톤으로 포톤의 밝기를 누적한다. 이 방법은 포톤 매핑보다 자원을 적게 소모하지만, 방출된 포톤이 임의의 방향으로 진행하기 때문에 충분한 포톤을 확보하고 부드러운 영상을 렌더링하기 위해 많은 시간이 필요하다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 포톤 탐사 단계를 추가하여 구 안에 들어오는 포톤들의 분포를 계산하고 그에 따라 구의 반지름을 조절하는 방법을 제안한다. 또한 라디언스 추정 과정에 콘 필터를 적용하여 영상을 선명히 렌더링한다.

Abstract

Photon mapping is a traditional global illumination method using many photons emitted from the light source for photo-realistic rendering. However, this method needs a lot of resources to perform tracing of millions of photons. Progressive photon mapping solves this problem. Typical progressive photon mapping performs ray tracing at first to find the hit points on diffuse surface of objects. Next, light source repeatedly emits a small number of photons in photon tracing pass, and power of photons in each sphere that has a fixed radius with the hit points in the center is accumulated. This method requires less resources than previous photon mapping, but it spends much time for gathering enough photons since each of photons progresses through a random direction and rendering high quality image. To improve the method, we propose photon probing that calculates variance of photons in the sphere and controls radius of sphere. In addition, we apply cone filter in radiance estimation step for reducing aliasing at the edges in result image.

키워드: 점진적 포톤 매핑, 포톤 매핑, 전역 조명.

Keywords: Progressive photon mapping, photon mapping, global illumination.

1. 서론

3차원 물체를 실사 수준의 영상으로 표현하는 사실적 렌더링 기술(photorealistic rendering)은 컴퓨터 그래픽스의 주요 분야이다. 사실적 렌더링을 위해서는 반사, 굴절 등의 다양한 조명 효과가 필수적이며, 지역 조명과 간접 조명 등 대부분의 조명 효과를 물리적으로 시뮬레이션하는 전역 조명 처리(global illumination)[1]기술이 필요하다.

대표적인 전역 조명 처리 알고리즘으로는 조도 계산법(radiosity)[2]과 광선 추적법(ray tracing)[3], 경로 추적법(path tracing)[4], 포톤 매핑(photon mapping)[5] 등이 있다. 그 중 포톤 매핑은 반사, 굴절, 커스틱(caustic)[6]과 같은 대부분의 전역 조명 효과가 가능하며 효율적인 렌더링 속도로 인해 널리 쓰이는 방법이다. 포톤 매핑은 모든 전역 조명 효과를 빛 입자인 포톤을 이용하여 수행하는데, 포톤을 방출(emission)하여 그 경로를 추적하고 포톤 맵(photon map)이라 불리는 자료구조에 저장하는 단계와 이를 이용해 렌더링을 수행하는 단계로 나누어진다.

그러나 포톤 매핑은 잡음(noise) 없이 전역 조명 효과를 내기 위해서 매우 많은 수의 포톤이 필요하며, 이를 저장하고 처리하기 위해 고속의 처리 장치와 대용량의 메모리가 필요하다. 이런 문제를 해결하기 위해 제안된 방법이 점진적 포톤 매핑(progressive photon mapping)이다 [7]. 이 방법은 각 픽셀마다 광선 추적법을 수행하여 광선과 밝기 값을 계산할 물체 표면과의 충돌 위치를 찾고, 포톤을 반복적으로 방출한 후 충돌 위치를 중심으로 하는 구 안에 들어오는 포톤으로 각 픽셀의 밝기를 계산하는 방법이다. 시점 독립적이고 모든 포톤의 정보를 포톤 맵에 저장하는 기존의 포톤 매핑과 달리, 점진적 포톤 매핑은 시점이 고정되어 있지만 한 번의 포톤 추적 단계에서 방출되는 포톤의 수 만큼만 메모리에 저장하기 때문에 저장 공간 문제가 발생하지 않는다.

하지만 기존의 점진적 포톤 매핑은 적은 수(약 10만개)의 포톤을 반복적으로 방출하기 때문에 픽셀의 밝기를 계산하는 단계에서 각 픽셀에 대응하는 구마다 그 안에 들어오는 포톤의 수가 일정하지 않으며, 충분한 포톤을 확보한 픽셀과 그렇지 못한 픽셀 사이의 밝기 차이 때문에 잡음이 발생할 수 있다. 이 때문에 기존의 포톤 매핑의 결과 영상 수준의 잡음 없는 부드러운 영상을 만들어 내려면 포톤 매핑의 수행 시간에 필적할 만큼의 시간 동안 포톤 추적을 수행해야 하는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 점진적 포톤 매핑의 수행 시작 부분에 포톤 탐사(photon probing) 단계를 추가하고 인접 포톤을 찾기 위해 사용되는 구의 반지름을 조절하여 각 구 안에 들어오는 포톤 수의 차이를 줄이고 인접 픽셀 간의 밝기를 균일하게 하는 방법을 제안한다. 먼저 광선 추적법으로 각 픽셀에서 가상의 광

선을 발사하여 픽셀의 색상을 결정할 물체 표면의 위치를 찾고, 그 위치를 중심으로 인접한 포톤들을 찾을 구의 초기 반지름을 설정한다. 다음으로 포톤 탐사 과정에서는 원래 방출해야 할 포톤의 수보다 적은 소량의 포톤을 방출하여 포톤 추적을 수행하고, 각 구 안에 들어오는 포톤들의 분포 정도를 계산한다. 이 과정은 처음 한번만 수행되며, 포톤의 분포는 각 포톤의 위치와 해당 포톤이 속한 구의 중심 위치와의 차이 벡터의 분산으로 계산한다. 이 값이 포톤의 분산과 구 반지름을 이용해 계산된 임계값보다 클 경우 포톤들이 고르게 분포하지 않는 것이므로 포톤의 수가 부족하다고 판단하여 반지름을 크게 한다. 포톤 추적과 렌더링 단계는 조정된 반지름을 이용해 반복 수행하며, 기존의 점진적 포톤 매핑과 유사하다. 또한 좀 더 선명한 영상을 렌더링 하기 위해서 래디언스 추정(radiance estimate) 과정에 콘 필터(cone filter)[8]를 적용한다. 콘 필터는 포톤과 구 중심 간의 거리 가중치와 포톤의 밝기를 곱해 구 중심에 가까운 포톤일수록 큰 밝기를 가지도록 하여 영상을 선명하게 하는 간단하고 빠른 필터링 방법이다. 콘 필터를 적용한 경우 필터링을 적용하지 않은 기존의 점진적 포톤 매핑과 같은 시간 동안 수행한 결과 기존보다 선명한 영상이 만들어짐을 확인하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 점진적 포톤 매핑과 같은 기존의 전역 조명 방법들을 소개하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 방법을 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 기술하고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

포톤 매핑[5]은 기존의 광선 추적법과 조도 계산법에서 구현이 어려웠던 완전한 전역 조명 효과를 확률적 방법인 몬테 카를로 적분 기법[9]에 기초하여 처리하는 렌더링 방법이다. 포톤 매핑은 다양한 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)[10] 반사 모델의 적용이 가능하며 커스틱이나 산란 등과 같은 대부분의 전역 조명 효과를 효율적으로 구현할 수 있다. 포톤 매핑은 포톤 추적 단계와 렌더링 단계로 구성되며 관측 조건에 독립적이다. 포톤 추적 단계에서는 광원에서 방출된 포톤들이 물체 표면과 충돌하며 진행되는 과정을 확률적 방법인 러시안 룰렛(russian roulette)[11]에 의해 시뮬레이션하여 포톤을 포톤 맵에 저장한다. 포톤 맵은 일반적으로 kd-트리[12]를 사용하며, 포톤 추적 단계에서 포톤이 난반사면을 만나는 경우 포톤의 위치와 입사 방향, 밝기 등의 정보를 저장한다. 렌더링 단계에서는 광선 추적법을 수행하여 광선과 물체가 가장 먼저 만나는 교차점을 찾고, 포톤 맵 안의 포톤 중 교차점과 인접하는 포톤들

을 찾아 렌더링 수식[13]을 이용해 렌더링한다. 렌더링 수식은 물체 표면 한 지점의 밝기를 계산하며, 물체의 표면에서 방출되는 래디언스와 외부에서 들어온 래디언스를 이용해 반사해서 나가는 래디언스를 재귀적으로 계산한다. 렌더링 공식은 대부분의 전역 조명 알고리즘에서 사용되며 일반적으로 근사적인 방법에 의해 쉰다.

포톤 매핑은 많은 수의 포톤을 한 번 방출하고 포톤 추적 을 통해 포톤 맵에 저장하기 때문에 포톤 추적 단계에서 오랜 수행 시간을 소비한다. 또한 모든 포톤의 충돌 정보를 포톤 맵에 저장하기 때문에 많은 메모리를 필요로 한다. 렌더링 단계에서 포톤 맵 안의 인접 포톤을 찾는 트리 순회 역시 많은 시간을 소모하는 단점이 있다.

점진적 포톤 매핑[7]은 기존 포톤 매핑과 달리, 광선 추적법을 수행하여 각 픽셀의 색상을 결정할 물체 표면의 위치를 찾은 후 적은 수의 포톤들을 반복적으로 방출하여 렌더링을 수행하는 방법이다. 점진적 포톤 매핑은 모든 포톤 정보를 저장하지 않기 때문에 메모리가 절약되고 사용 가능한 포톤 수의 제약이 없다는 장점이 있다.

점진적 포톤 매핑은 크게 광선 추적 단계와 포톤 추적 단계로 구분된다(그림 1). 광선 추적 단계에서는 각 픽셀에서 광선 추적법을 수행하여 광선과 만나는 물체의 표면을 찾으며, 광선이 완전 확산면(lambertian surface) 혹은 난반사면(diffuse surface)에 닿으면 진행을 중지하고 해당 충돌 지점의 위치를 저장한다. 포톤 추적 단계에서는 광원에서 일정한 수의 포톤을 방출하여 포톤 추적을 수행하고, 광선 추적 단계에서 저장한 충돌 지점을 중심으로 하는 구 안에 들어오는 포톤들을 이용하여 래디언스를 추정한다. 기존의 점진적 포톤 매핑에서는 매 포톤 추적 단계마다 약 10만개의 포톤을 방출하여 포톤 추적을 수행하였다.

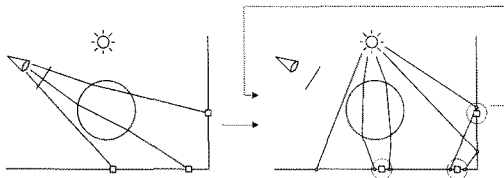


그림 1 : 점진적 포톤 매핑
(좌)광선 추적 단계와 (우)포톤 추적 단계

포톤 추적 단계는 반복 진행되며, 새로운 포톤들이 구 안에 들어오면 기존 포톤의 수와 새 포톤의 수를 이용하여 구 반지름을 줄이는 반지름 축소(radius reduction)를 수행하고 래디언스를 다시 추정한다. 위 과정을 반복하면 구 안에 들어오는 포톤의 수는 늘어나지만 구의 반지름이 줄어들기 때문에 수행 시간을 일정하게 유지할 수 있다(그림 2).

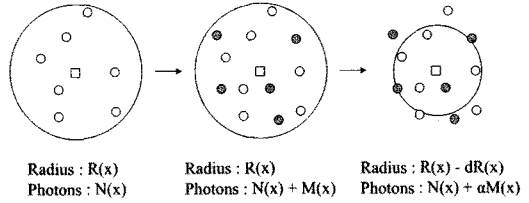


그림 2 : 반지름 축소 과정 : 기존의 포톤 수와 새로 들어온 포톤 수에 따라 반지름이 축소된다.

래디언스 추정 단계에서 밝기는 구의 반지름과 그 안에 들어오는 포톤의 수로 계산되며, 기본적으로 포톤의 밀도 $d'(x)$ 는 포톤 수 n' 와 반지름 r 을 이용해 아래와 같이 계산된다.

$$d'(x) = \frac{n'}{\pi r^2} \quad (1)$$

기존의 반지름을 $R(x)$, 기존 포톤 수를 $N(x)$, 새로 들어온 포톤 수를 $M(x)$ 라 하면 새로운 밀도값 $\hat{d}(x)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{d}(x) = \frac{N(x) + M(x)}{\pi R(x)^2} \quad (2)$$

포톤 추적 단계의 래디언스 추정 과정에서는 반지름 축소 과정을 함께 수행한다. 이전 단계의 포톤 수와 새로 들어온 포톤 수, 반지름의 감소 정도를 결정하는 파라미터 $\alpha = (0, 1)$ 을 사용하여 아래와 같이 다음 단계의 반지름 $\hat{R}(x)$ 를 계산한다.

$$\hat{R}(x) = R(x) - dR(x) = R(x) \sqrt{\frac{N(x) + \alpha M(x)}{N(x) + M(x)}} \quad (3)$$

래디언스 추정 과정에서는 아래와 같이 최종 밝기를 계산한다. $\tau_N(x, \vec{w})$ 는 기존의 포톤 $N(x)$ 개의 밝기 합이고, $\tau_M(x, \vec{w})$ 는 새로 들어온 포톤 $M(x)$ 개의 밝기 합이며 f_r 은 BRDF 함수이다.

$$\tau_N(x, \vec{w}) = \sum_{p=1}^{N(x)} f_r(x, \vec{w}, w_p) \Phi'_p(x_p, w_p), \quad (4)$$

$$\tau_M(x, \vec{w}) = \sum_{p=1}^{M(x)} f_r(x, \vec{w}, w_p) \Phi'_p(x_p, w_p), \quad (5)$$

최종 밝기 값은 $\tau_N(x, \vec{w})$ 와 $\tau_M(x, \vec{w})$ 의 합에 기존 반지름과 반지름 축소 과정 후 줄어든 반지름의 제곱을 곱하여 결정되며, 이 과정은 포톤 추적 단계에서 각 충돌 지점마다 독립적으로 반복 수행된다.

$$\begin{aligned}
\tau_{\hat{N}}(\vec{x}, \vec{w}) &= (\tau_N(\vec{x}, \vec{w}) + \tau_M(\vec{x}, \vec{w})) \frac{\pi \hat{R}(x)^2}{\pi R(x)^2} \\
&= \tau_{N+M}(\vec{x}, \vec{w}) \frac{\pi R(x) \sqrt{\frac{N(x) + \alpha M(x)}{N(x) + M(x)}}^2}{\pi R(x)^2} \\
&= \tau_{N+M}(\vec{x}, \vec{w}) \frac{N(x) + \alpha M(x)}{N(x) + M(x)}, \quad (6)
\end{aligned}$$

3. 개선된 점진적 포톤 매핑

기존의 점진적 포톤 매핑은 반복적으로 수행되는 포톤 추적을 통해 충분한 포톤이 확보되지 않으면 해당 픽셀의 밝기가 인근 픽셀의 밝기보다 낮아져 잡음이 생긴다. 특히, 포톤 추적 진행 중 포톤이 반사 또는 굴절된다면 구 안에 들어오는 포톤의 수가 적어 더 많은 포톤 추적 단계를 반복해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 광선 충돌 지점에 인접한 포톤들, 즉 충돌 지점을 중심으로 하는 구 안의 포톤들의 분산을 계산하고 그에 따라 구의 반지름을 확대 또는 축소하는 방법을 제안한다.

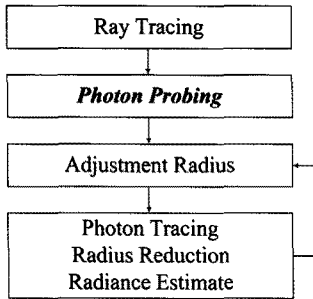


그림 3 : 본 연구에서 진행하는 점진적 포톤 매핑의 진행 순서

본 논문에서 제안하는 방법에서는 광선 추적 단계와 포톤 추적 단계 사이에 포톤 탐사 단계를 두어 포톤들의 분산을 계산하고 이를 이용하여 구의 초기 반지름을 변경한다. 포톤 탐사는 첫 단계인 광선 추적 단계 다음에 한 번만 수행한다(그림 3). 포톤 탐사 단계에서 계산되는 값은 광선 충돌 지점을 중심으로 하는 구 안에 들어온 포톤들과 구 중심과의 차이 벡터의 분산이며, 이는 래디언스 추정 단계에서 사용할 포톤들의 분포 정도를 나타내는 값(λ)이다. λ 는 아래 식과 같이 계산되며, g 를 중심으로 하는 구 안에 $N(x)$ 개의 포톤이 있을 경우 포톤들의 좌표 \vec{t}_p 와 \vec{g} 의 차이의 평균이다.

$$\lambda = \frac{\sum_{p=1}^{N(x)} (\vec{t}_p - \vec{g})^2}{N(x)} \quad (7)$$

λ 가 작으면 포톤들이 골고루 밀집되어 있기 때문에 충분한 포톤이 있다고 판단하며, λ 가 크면 포톤들이 성기게 분포되어 있음을 나타내어 이 경우 구의 반지름을 확대하고 구 안에 들어오는 포톤의 수를 늘린다.

기존 점진적 포톤 매핑에서는 초기 반지름을 결정하기 위해 아래와 같은 식(8)을 사용하였다. r 은 구의 초기 반지름이고 x, y, z 는 렌더링할 모든 물체에 하나의 AABB를 적용하였을 경우 각 축에서의 길이이며, s 는 렌더링할 영상의 한쪽 축 크기이다.

$$r = \left(\frac{x+y+z}{3s} \right) \times 2 \quad (8)$$

본 논문에서 제안하는 방법에서는 위 수식으로 계산된 초기 반지름 r 과 포톤 탐사 과정에서 계산된 분산 λ , 그리고 상수 $\beta = (0, r)$ 를 이용해 변경된 구의 반지름 r' 을 결정한다. β 가 너무 작거나 클 경우 포톤의 분포에 대한 정확한 판단이 힘들기 때문에 실험적으로 β 의 값을 결정하여 수행한다.

$$r' = \begin{cases} r & \text{if } (\lambda/r \leq \beta) \\ r(1 + \lambda/r) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

λ 는 최소 0에서 최대 r^2 까지의 값을 가진다. 이것을 반지름 r 로 나눈 값을 β 와 비교하여 β 보다 작을 경우 충분한 포톤이 존재한다고 판단하여 반지름을 바꾸지 않고 기존의 점진적 포톤 매핑과 같이 처리한다. 반면에 이 값이 β 보다 클 경우 포톤들이 한쪽으로 쏠리거나 성기게 분포하는 것으로 간주하여 반지름을 늘린다.

또한 본 논문에서는 점진적 필터링의 래디언스 추정 과정에 콘 필터를 적용하였다. 각 포톤과 구 중심과의 거리에 따른 가중치를 각 포톤의 밝기에 곱하여 구 중심에 가까운 포톤이 중심에서 먼 포톤보다 큰 비중을 가져 좀 더 부드러운 결과 영상을 만들 수 있도록 하였다. 기본적인 콘 필터는 아래와 같으며, k 는 상수, d_p 는 포톤과 구 중심과의 거리, r 은 구의 반지름이다.

$$w_{pc} = 1 - \frac{d_p}{kr}$$

where k : filter constant ($k \geq 1$) (10)

수식 (11)은 기존의 포톤 매핑에서 구 안에 들어온 N 개의 포톤을 이용한 래디언스 추정 수식에 콘 필터를 적용한 것이며 BRDF를 사용해 계산된 포톤들의 밝기는 포톤 중심에서 멀수록 낮아진다[8].

$$L_r(x, w) \approx \frac{\sum_{p=1}^N f_r(x, \vec{w}, w_p) \Phi_p(x, \vec{w}_p) w_{pc}}{\left(1 - \frac{2}{3k}\right) \pi r^2} \quad (11)$$

점진적 포톤 매핑의 경우 반복 수행마다 반지름의 크기가 작아지고 포톤의 밝기를 누적해야 하기 때문에 점진적 포톤 매핑에 맞게 수식 (4)와 (5)를 수식 (12), (13)과 같이 변형해야 한다.

$$\tau'_{N(x)}(x, \vec{w}) = \sum_{p=1}^{N(x)} f_r(x, \vec{w}, w_p) \Phi'_p(x, \vec{w}_p) \left(1 - \frac{d_p}{kr}\right) \quad (12)$$

$$\tau'_{M(x)}(x, \vec{w}) = \sum_{p=1}^{M(x)} f_r(x, \vec{w}, w_p) \Phi'_p(x, \vec{w}_p) \left(1 - \frac{d_p}{kr}\right) \quad (13)$$

$\tau'_{N(x)}(x, \vec{w})$ 은 콘 필터를 적용한 기존 포톤들의 밝기 합이며 $\tau'_{M(x)}(x, \vec{w})$ 은 콘 필터를 적용한 새로 들어온 포톤들의 밝기 합이다. 콘 필터를 위한 가중치가 적용되어 있는 점을 제외하면 기존의 점진적 포톤 매핑의 수식과 같으며, 렌더링할 픽셀의 밝기 $\tau'_{\hat{N}}(x, \vec{w})$ 는 $\tau'_{N(x)}(x, \vec{w})$ 와 $\tau'_{M(x)}(x, \vec{w})$ 를 합하여 아래 식(14)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \tau'_{\hat{N}}(x, \vec{w}) &= (\tau'_{N(x)}(x, \vec{w}) + \tau'_{M(x)}(x, \vec{w})) \frac{\left(1 - \frac{2}{3k}\right) \pi \hat{R}(x)^2}{\left(1 - \frac{2}{3k}\right) \pi R(x)^2} \\ &= \tau'_{N+M}(x, \vec{w}) \frac{\pi (R(x) \sqrt{\frac{N(x) + \alpha M(x)}{N(x) + M(x)}}})^2}{\pi R(x)^2} \\ &= \tau'_{N+M}(x, \vec{w}) \frac{N(x) + \alpha M(x)}{N(x) + M(x)}, \end{aligned} \quad (14)$$

이러한 방법으로 포톤의 분포에 따라 구의 반지름을 조절하고 콘 필터를 적용하면 각 픽셀의 밝기를 좀 더 정확히 계산하고 영상을 더욱 선명히 렌더링 할 수 있다.

4. 실험 결과

실험에 사용된 시스템은 INTEL Xeon 3GHz CPU에 4GB 주 메모리를 탑재하며 그래픽 가속기는 NVIDIA ENGTX 280을 사용하였다. 확률적인 점진적 포톤 매핑 (Stochastic Progressive Photon Mapping)[14] 프레임워크를 기반으로 구현하였으며, OpenGL 라이브러리와 GLSL를 사용하였다.

본 논문에서 제안한 구 반지름 조절과 콘 필터를 적용한 결과 영상은 아래와 같다(그림 4). 6면의 상자 안에 반사 재질과 난반사 재질, 굴절 재질을 가지는 3개의 구가 있는 장면으로 실험하였으며, 광선 추적법과 포톤 탐사 단계, 포톤 추적 단계와 렌더링 등의 과정 대부분이 그래픽 처리 장치에서 수행되었다.

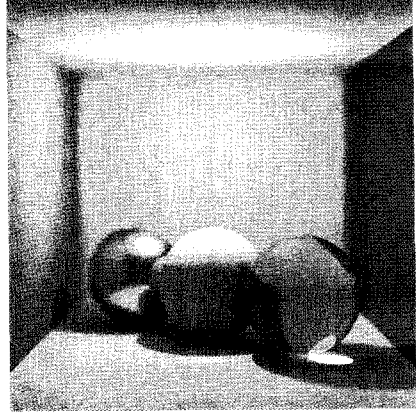


그림 4 : 제안한 방법을 적용하여 30초간 렌더링한 결과

포톤 탐사 단계에서는 100만 개의 포톤을 방출하여 포톤 추적을 진행하고 포톤의 분포를 계산하며, 이후 반복되는 포톤 추적 단계 역시 100만 개의 포톤을 반복적으로 방출하고 추적한다. 위 영상은 512×512의 해상도에 1초당 75프레임(frame)으로 30초간 렌더링한 결과이다. 매 프레임마다 포톤 방출, 추적, 렌더링이 수행되며, 30초 동안 누적된 포톤의 수는 22억 5천만 개이다. 하지만 이를 처리하기 위해서는 모든 포톤 정보를 저장하지 않고 100만 개의 포톤이 저장될 공간과 구의 반지름 등이 저장될 적은 공간의 메모리만이 필요하기 때문에 매우 효율적이다. 또한 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 방법에서 처음 1 프레임을 추가하여 포톤 탐사 단계를 수행하며, 100만 개의 포톤을 추가로 사용하기 때문에 전체 수행 시간과 전체 포톤의 수, 점유하는 메모리 양이 기존과 거의 동일하다.

수식 (9)에서 포톤의 분포 정도를 판단하기 위한 상수 β 는 최소 0에서 최대 구의 반지름 r 의 값을 가진다. β 가 r 에 가까울수록 기존의 방법과 유사한 결과가 나오며, β 가 0에 근접하면 모든 구의 반지름을 수식 (9)에 따라 확대한 결과가 나온다. 본 논문에서는 β 를 $r/5$, $r/4$, $r/3$, $r/2$ 로 하여 실험하였으며 β 가 $r/5$ 인 경우 결과 영상이 본 논문에서 제안한 방법에 가장 적합하였다. β 의 값이 그 이상인 경우 대부분의 픽셀이 충분한 포톤을 확보하였다고 판단하기 때문에 화질 개선의 효과가 없다.

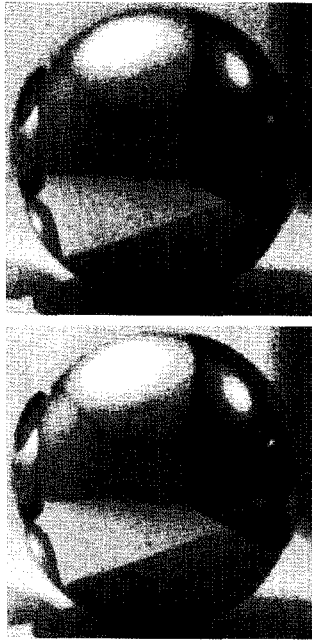


그림 5 : 기존의 점진적 렌더링 결과(상)와 본 논문에서 제안한 방법을 적용한 렌더링 결과(하)

그림 5는 기존의 점진적 포톤 매핑과 본 논문에서 제안한 방법을 각각 적용하여 1024×1024의 해상도에 동일한 10초의 수행 시간과 메모리 사용량을 기준으로 화질을 비교한 결과이다. 결과 영상의 구는 반사 재질로서 이웃한 구와 벽이 반사되어 보이고, 음영 효과 역시 나타난다. 기존의 방법을 적용한 결과 영상은 이웃 픽셀에 비해 포톤의 수가 부족한 어두운 픽셀들이 있으며 본 논문에서 제안한 방법을 적용한 결과 영상은 어두운 픽셀의 수가 적고 선명하다.

그림 6은 본 논문에서 제안한 방법을 수행 시간별로 나타낸 것이다. 2초와 5초 동안 수행한 경우 영상에 많은 수의 잡음이 발생하며, 40초 동안 수행한 경우 잡음이 적은 결과 영상이 나온다.

그림 7은 1024×1024 해상도로 10초 동안 7500만 개의 포톤을 누적하여 장면을 렌더링한 결과이며, 왼쪽 그림은 콘 필터를 적용하지 않은 경우이고 오른쪽 그림은 콘 필터를 적용한 그림이다. 기존의 방법은 필터링을 적용하지 않고 인접 포톤들의 밝기의 평균으로 픽셀의 색상을 결정하기 때문에 음영이나 물체의 경계 부분이 흐리게 나타나며, 아래 그림의 경우 구의 표면에서 앨리어싱(aliasing)이 발생함을 확인할 수 있다. 하지만, 콘 필터를 적용한 경우 그렇지 않은 경우보다 구의 표면이 매끄러워짐을 확인할 수 있다.

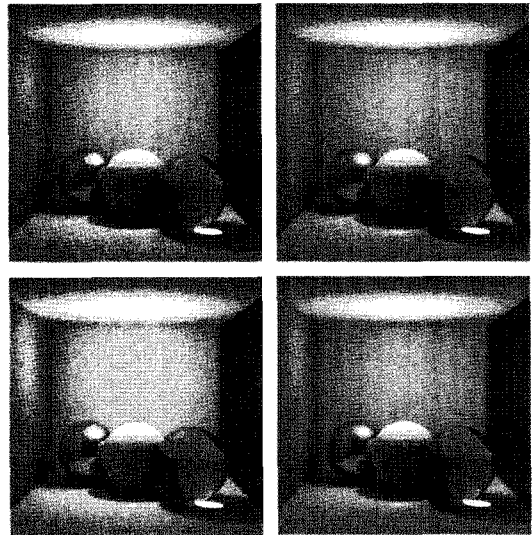


그림 6 : 본 논문에서 제안한 방법을 2초(좌상), 5초(우상), 15초(좌하), 40초(우하) 렌더링한 결과 영상

5. 결론

본 논문에서는 기존의 점진적 포톤 매핑보다 더 나은 품질의 영상을 만들어내는 방법을 제안하였다. 포톤 추적 단계 이전에 포톤 탐사 단계를 두어 인접 포톤들의 분산을 계산하고 포톤이 분포된 정도를 판단하여 구의 반지름을 조절하였다. 그 결과 기존의 방법과 같은 시간을 렌더링 하였을 경우 영상이 더욱 부드럽고 선명함을 보였다. 또한 라디언스 추정 과정에 콘 필터를 적용하여 렌더링한 영상의 물체 경계 부분이 흐릿해지는 단점을 보완하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-0019051)

참고 문헌

- [1] P.H.Christensen, "Invited Talk: Global Illumination for Professional 3D Animation, Visualization, Special Effects", *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, 321-326, 1997.
- [2] M.F.Cohen and D.P.Greenberg, "The Hemi-Cube : A radiosity solution for complex environments", *Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH '85)*, 19(3):31-40, 1985.

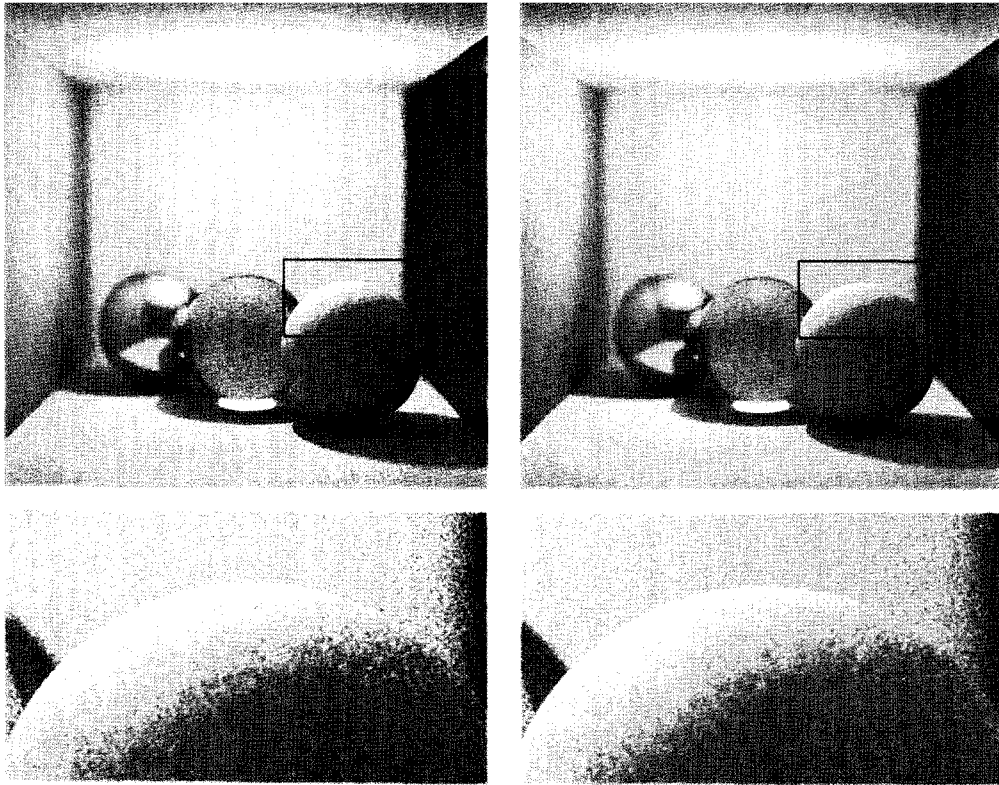


그림 7 : 필터링을 적용하지 않은 경우(좌)와 큰 필터를 작용한 경우(우) : 큰 필터를 적용한 경우 적용하지 않은 경우보다 영상의 잡음이 적으며 물체의 표면이 선명하다.

- [3] T.Whitted, "An improved illumination model for shaded display", *Communications of the ACM*, 23(6):343-349, 1980.
- [4] R.L.Cook and T.Porter and L.Carpenter, "Distributed ray tracing", *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '84)*, 18(3):137-145, 1984.
- [5] H.W.Jensen, "Global illumination using photon maps", *Proceedings of the eurographics workshop on Rendering techniques*, 21-30, 1996.
- [6] H.W.Jensen, "Rendering caustics on non-Lambertian surfaces", *Proceedings of the conference on Graphics interface*, 116-121, 1996.
- [7] T.Hachisuka and S.Ogaki and H.W.Jensen, "Progressive photon mapping", *ACM SIGGRAPH Asia*, 2008.
- [8] H.W.Jensen, "The photon map in global illumination", *Ph.D. dissertation. Technical University of Denmark*, 1996.
- [9] R.Y.Rubinstein, "Simulation and the Monte Carlo Method", *New York : John Wiley & Sons*, 1981.
- [10] F.E.Nicodemus and J.C.Richmond and J.J.Hsia and I.W.Ginsberg and T.Limperis, "Geometric considerations and nomenclature for reflectance", *Jones And Bartlett Publishers, Inc. Physics-Based Vision: Principles And Practice*, 94-145, 1992.
- [11] J.Arvo and D.B.Kirk, "Particle Transport and Image Synthesis", *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '90)*, 24(4):63-66, 1991.
- [12] J.L.Bentley, "Multidimensional binary search trees in database applications", *IEEE Trans. on Soft*, (4):333-340, 1979.
- [13] J.T.Kajiya, "The rendering equation", *Computera Graphics(Proc. SIGGRAPH '86)*, 20(4):143-150, 1986.
- [14] T.Hachisuka and H.W.Jensen, "Stochastic progressive photon mapping", *ACM SIGGRAPH Asia*, 2009.

〈저자 소개〉

이상길 (Sang-gil Lee)



- 2008년 2월 인하대학교 컴퓨터공학부 (학사)
- 2010년 8월 인하대학교 컴퓨터공학과 (석사)
- 관심분야 : 실시간 렌더링, 전역 조명, GPU 병렬 처리

신병석 (Byeong-Seok Shin)



- 1990년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)
- 1992년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)
- 1997년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(박사)
- 2000년~현재 인하대학교 컴퓨터공학부 부교수
- 관심분야 : 실시간 렌더링, 볼륨 그래픽스, 의료 영상