

빛의 내부산란의 효과적인 표현을 위한 밀도 추정기법

민승기[°]임인성[†][°]엔씨소프트 [†]서강대학교 컴퓨터공학과

addmssk@hanmail.net ihm@sogang.ac.kr

Density Estimation Technique for Effective Representation of Light In-scattering

Seungki Min[°]Insung Ihm[†][°]NCSsoft [†]Dept. of Comp. Sci. & Eng., Sogang University

요약

3차원 공간에 존재하는 반투명 물질을 물리 기반으로 렌더링하기 위해서 빛의 진행 경로를 작은 구간으로 나누는 후, 각 구간에 대하여 빛의 직접적인 영향, 산란으로 인한 영향, 반투명 물질 안에서의 소멸 및 물질의 발광으로 인한 영향 등을 고려한 빛의 에너지를 계산하여 누적하는 방식을 사용한다. 이중 빛의 산란은 연속 공간에서 매우 복잡한 방식으로 작용하기 때문에 이의 시뮬레이션을 위해서 상당한 노력이 필요하다. 빛의 산란을 효과적으로 계산하기 위해 여러 근사 방법들이 고안되었는데, 그중 볼륨 포톤매핑 기법은 빛이 간섭매체 내부에서 산란되는 효과를 단순화된 시뮬레이션으로 미리 계산하여 두고 이를 검색해 효율적으로 렌더링 하는 방법을 사용한다. 이 방법은 주변에서 검색한 시뮬레이션 정보를 이용하기 위해서 밀도추정 방법을 적용하는데, 시뮬레이션 자료의 분포에 따라서 검색에 따른 편차가 있을 수 있게 된다. 또한 시뮬레이션된 자료만을 이용하여 산란효과를 반영하기 때문에 고밀도이지만 시뮬레이션이 충분하지 못한 위치에 대해서 방향성 있는 위상 함수에 대한 특징을 잘 표현하지 못한다는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하고자 하는 노력의 일환으로, 본 논문에서는 입자 형태로 시뮬레이션된 볼륨 데이터에 대해 밀도추정 방법의 하나인 커널 스무딩을 이용하여 표현한 산란효과를 반투명 물질 자료구조에 저장하고 이를 복원하는 방법을 제안하고, 실험 결과 분석을 통하여 장단점을 분석한다.

Abstract

In order to visualize participating media in 3D space, they usually calculate the incoming radiance by subdividing the ray path into small subintervals, and accumulating their respective light energy due to direct illumination, scattering, absorption, and emission. Among these light phenomena, scattering behaves in very complicated manner in 3D space, often requiring a great deal of simulation efforts. To effectively simulate the light scattering effect, several approximation techniques have been proposed. Volume photon mapping takes a simple approach where the light scattering phenomenon is represented in volume photon map through a stochastic simulation, and the stored information is explored in the rendering stage. While effective, this method has a problem that the number of necessary photons increases very fast when a higher variance reduction is needed. In an attempt to resolve such problem, we propose a different approach for rendering particle-based volume data where kernel smoothing, one of several density estimation methods, is explored to represent and reconstruct the light in-scattering effect. The effectiveness of the presented technique is demonstrated with several examples of volume data.

키워드: 반투명 물질, 볼륨 입자, 볼륨 포톤매핑, 볼륨 렌더링 방정식, 빛의 산란, 커널 스무딩, 광구 추정법.

Keywords: Participating media, volume particle, volume photon mapping, volume rendering equation, light scattering, kernel smoothing, photosphere estimation.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

공간에 대한 빛의 조명 효과를 계산하는데 있어서 빛의 진행에 영향을 주는 반투명 물질(participating media)을 고려할 경우 반투명 물질에 의한 빛 에너지의 흡수, 발광, 다중산란 등 방향공간 및 빛의 진행구간에 대한 적분으로 표현된 적분 방정식을 계산해야 하기 때문에 많은 시간을 소비하게 된다. 특히 불투명도가 낮고 매체에 의한 에너지 흡수율이 낮은 경우 다중산란(multiple scattering)에 의한 전역조명 효과(global illumination)를 충분히 고려해야 하는데, 이 경우 매 렌더링 계산마다 다중산란 효과를 얻기 위해서 방향공간을 샘플링하고 샘플 방향에서의 빛의 기여도를 계산해야 한다.

그런데 다중산란 효과를 렌더링 시간마다 샘플링을 통해 계산하는 것은 일반적으로 매우 비용이 많이 들기 때문에 반투명 물질에서의 다중산란 효과를 미리 계산하여 기록해놓고, 렌더링 시 이를 활용하는 방안들이 제시되었다. 다중산란 효과를 미리 계산하기 위해선 광원의 발광을 충분한 개수의 포톤이라는 입자로 묘사하고 이러한 입자를 빛과 물질의 성질에 따라 시뮬레이션 한다. 이를 포톤추적(photon tracing)이라 하는데 이러한 시뮬레이션 역시 연속된 방향공간 및 진행구간을 이산적으로 샘플링 하여 이루어진다. 만약 시뮬레이션에 의한 포톤의 산란이 계속 되는 경우 매 산란시 여러 방향에 대한 포톤의 시뮬레이션이 추가로 요구되며, 이는 많은 계산시간과 저장공간을 필요로 하게 된다.

포톤매핑(photon mapping)에서는 이러한 문제를 러시아 룰렛(Russian roulette) 방식을 이용하여 해결하였는데, 하나의 포톤이 광원에서 발생되었을 때 반투명 물질의 성질에 따라 포톤이 소멸할 때까지 시뮬레이션하며 반투명 물질과 상호작용시 방향공간에 대한 추가적인 샘플링 없이 하나의 방향이 나머지를 대표하도록 하였다 [1]. 다중산란 값을 얻기 위해선 정해진 범위와 개수에 따라 포톤을 검색하고 위상함수에 의한 시점방향의 기여도를 곱한 뒤 포톤이 검색된 범위의 부피로 나누어 밀도추정을 한다. 이때 각 포톤은 반투명 물질의 일정영역에 대해서 영향력을 가지게 되는데, 렌더링 비용에 따라 주어진 범위와 개수에 의해 포톤을 검색하여 사용하는 경우 포톤정보 반영에 한계가 있게 된다. 즉 검색범위나 개수에 속하지 못했지만 바로 외곽에 위치하였거나 범위내 속했지만 수가 많은 경우 이 정보는 반영될 수 없게 된다. 또한 러시아 룰렛에 기초한 포톤추적 방법은 시간에 따라 변화하는 반투명 물질에 대해서 매 포톤추적 결과가 편차를 가지게 되고 이를 보정하기 위해선 더 많은 포톤을 사용하거나 렌더링 시간에 보정하기 위해 파이널 게더링(final gathering)과 같은 추가적인 방법이 필요하게 된다.

한편 반투명 물질은 위상함수, 밀도, 불투명도 등 다양한 변수로 묘사 되는데, 밀도의 경우 시간과 공간에 따른 함수형태로 표현되게 된다. 이러한 밀도함수는 균질하게 혹은 확률적으로 묘

사될 수 있고 미리 시뮬레이션된 결과를 시간에 따라 자료구조에 기록해두고 검색하여 결과 값을 돌려주도록 구현될 수도 있다. 반투명 물질을 시뮬레이션 하는 경우 방법에 따라 자료구조의 형태가 질량을 가지는 입자들의 집합 또는 공간 나는 격자, 혹은 두가지 방법을 혼합한 형식으로 표현된다. 그런데 시뮬레이션으로 만들어진 반투명 물질이 자료구조에 저장되어 있을 때, 특히 입자들의 집합인 경우 포톤 매핑기법을 사용하여 렌더링하게 되면 포톤과 반투명 물질의 입자들이 유사한 자료구조에 저장되게 된다. 또한 포톤추적에서 러시아 룰렛을 사용할 경우 시간에 따른 편차를 해소하기 위해 보다 많은 포톤을 사용하게 되면 포톤 맵의 크기가 커져 저장 공간과 검색시간이 늘어나게 된다.

본 논문에서는 포톤매핑기법을 기반으로 앞서 언급한 시뮬레이션된 포톤정보의 일부가 렌더링에서의 비용적 제약으로 일부 반영되지 못하는 것을 해결하고 반투명 물질의 밀도정보가 미리 시뮬레이션 되어 자료구조에 저장되어 있을 때 이러한 자료구조에 포톤추적과정에서 포톤정보를 포함시켜 저장 공간과 렌더링 시 검색시간을 줄이고자 한다.

1.2 본 논문의 기여도 및 구성

본 논문에서는 입자 형태로 주어진 볼륨 데이터의 반투명 물질의 자료구조에 전역조명 효과인 다중산란에 대한 정보를 저장하고 복원하는 방법인 광구 추정법(photosphere estimation)을 제안하였다. 광구 추정법은 시뮬레이션되어 저장된 반투명 물질의 밀도정보에 포톤추적과정에서 얻어진 포톤정보를 커널에 기반한 통계적인 방법으로 저장하였다. 렌더링 과정에서 비모수적 밀도추정법인 커널 스무딩 방법을 사용해 포톤정보를 복원하였으며 포톤매핑에서 시뮬레이션되었지만 구조적한계로 반영되지 못한 정보까지 활용해 보다 사실적인 다중산란 효과를 얻도록 하였다. 또한 포톤매핑기법에서 사용된 포톤의 수에 따라 포톤맵의 저장공간이 비례하여 늘고 검색시간이 증가하는 것을 광구추정법에서는 포톤 수에 상관없이 반투명 물질의 자료크기에 비례하는 저장공간만을 사용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련된 연구에 대해서 간략하게 소개하고 3장에서는 본 알고리즘 설명에 앞서 볼륨 렌더링 공식과 볼륨 포톤매핑기법 및 밀도추정기법 중 하나인 커널 스무딩에 대해서 설명한다. 4장에서는 광구 추정법에 대해서 설명하고, 5장에서 실험결과를, 그리고 6장에서는 결론 및 이후 과제에 대해서 논의한다.

2. 관련 연구

2.1 반투명 물질 표현

점의 위치와 점간의 연결성에 의해 형태가 결정되는 다면체 모델과 달리 반투명 물질은 시간과 위치에 따라 변하는 밀도에 의

하여 형태가 결정된다. 반투명 물질의 밀도는 시간과 공간에 대한 함수로 표현되며 이러한 함수를 표현하는 방법은 크게 세 가지가 있다. 첫 번째는 수학적 함수와 임의의 수를 이용하여 요청시 계산하는 것이다[2]. 다른 두 가지는 미리 유체 시뮬레이션을 이용해 계산된 결과값을 자료구조에 저장하여두고 이를 검색하여 밀도를 얻는 것이다. 공간을 격자로 나눠 격자에 밀도값을 기록하는 방법과 입자에 밀도를 잘게 나누어두고 입자의 분포를 이용해 밀도값을 얻는 방법으로 구분되는데 이는 어떤 유체 시뮬레이션을 선택하였는지에 따라 구분된다[3].

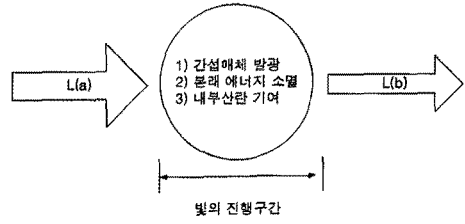


그림 1: 반투명 물질과의 상호작용을 통한 광량의 변화

2.2 전역조명효과 계산에 밀도추정 활용

전역조명효과를 계산하기 위해서 많은 기법들이 제안되어 왔다 [4, 5, 6]. Jensen 등은 볼륨 포톤매핑 기법을 제안하였는데, 전역조명효과를 얻기 위해 러시안 룰렛을 기반으로 포톤추적을 진행하고 장면의 물체들과 분리된 포톤 맵이란 자료구조에 시뮬레이션된 포톤을 저장하였다. 렌더링 과정에서 정해진 범위와 개수를 이용 포톤을 검색하고 검색된 포톤을 이용해 전역조명효과를 계산했다 [1].

Chiu 등은 light volume을 제안했는데 물체표면에 대한 전역광원효과를 계산하기 위해 포톤추적 과정에서 전체공간을 일정하게 분할한 격자에 방향공간에 대한 히스토그램을 만들고 포톤이 격자를 지나갈때 해당영역의 크기에 비례해서 광도(radiance)를 계산하여 히스토그램에 저장하였다 [7]. 렌더링 과정에서는 렌더링위치 주변의 격자들에 저장된 광도를 적절히 가중평균내어 전역조명효과를 계산했다. 한편 Boudet 등은 photon splatting이라는 방법을 제안하였는데, 개별 포톤을 대상으로 커널을 이용해 가상의 영향력을 만들고 변형된 렌더링공식을 적용해 텍스처 공간에 그 영향력을 누적시킨 후, 렌더링 시간에 텍스처를 이용해 다중산란 효과를 더해주었다 [8].

이러한 기법들은 전역조명 효과를 시뮬레이션하기 위해 포톤이라는 입자를 사용하여 빛의 경로를 추적하였고 개별 포톤이 시점방향에 기여하는 정도를 계산하여 내부산란 값으로 반영하였다. 그런데 포톤의 에너지를 시점에 따라 분배한 값을 커널을 이용해 결과물 혹은 물질에 분배하여 노이즈를 줄이려는 시도는 있었으나 포톤의 에너지를 시점에 따라 분배하기 전, 그 분배 정도를 결정하게 되는 포톤의 방향을 좀더 활용하려는 시도는 착지 못했다 [8, 9].

3. 반투명 물질에 대한 렌더링과 밀도추정

3.1 반투명 물질에 대한 렌더링 공식

그림 1과 같이 빛의 진행에 반투명 물질이 영향을 미치는 요인은 크게 세 가지로 분류된다. 첫째는 반투명 물질이 스스로 발광하여 빛의 강도를 증가시키는 것이다. 둘째는 빛의 에너지가 물질에 흡수되어 사라지는 것이며, 셋째는 빛의 에너지가 물질

에 흡수되지 않고 산란되어 주변물질로 퍼져나가는 것이다. 세 번째의 경우 현재 빛의 에너지가 산란되어 퍼지는 것을 외부산란(out-scattering)이라 하며, 주변에서 외부산란된 에너지가 현재 빛의 진행에 더해지는 것을 내부산란(in-scattering)이라 한다.

이러한 반투명 물질에서의 빛의 진행성질은 빛의 진행구간에 따른 적분방정식으로 표현된다 [10]. 식 (1)은 광원의 위치 x_0 에서 특정방향 $\vec{\omega}_0$ 로 빛이 진행하는 경우 빛이 x 에 도달할 때까지 빛의 최초 에너지 $L(x_0, \vec{\omega}_0)$ 가 반투명 물질과 상호작용하여 변화한 결과 $L(x, \vec{\omega}_0)$ 를 표현한 것이다.

$$L(x, \vec{\omega}_0) = e^{-\tau(x_0, x)} L(x_0, \vec{\omega}_0) + \int_{x_0}^x e^{-\tau(u, x)} L_e(u, \vec{\omega}_0) du + \int_{x_0}^x e^{-\tau(u, x)} \sigma_s(u) L_{is}(u, \vec{\omega}_0) du \quad (1)$$

식 (1)에서 오른쪽 첫 번째 항은 본래 빛의 에너지가 반투명 물질을 통과한 정도를 나타내고, 두 번째 항은 물질이 스스로 발산한 에너지가 물질에 흡수되지 않고 빛의 총량에 기여한 정도를 나타내며 마지막 항은 내부산란된 에너지가 빛의 총량에 기여하는 정도를 나타낸다. 여기서 $L_{is}(u, \vec{\omega}_0)$ 는 주어진 위치에 내부산란으로 얻어지는 빛의 에너지를 나타낸다(식 (2)).

$$L_{is}(u, \vec{\omega}_0) = \int_{S^2} \rho(\vec{\omega}_0, \vec{\omega}_i) L(u, \vec{\omega}_i) d\vec{\omega}_i \quad (2)$$

이것은 내부산란으로 계산위치에 투영되는 에너지가 $\vec{\omega}_i$ 와 $\vec{\omega}_0$ 로 결정되는 위상함수(phase function)에 의해 빛의 진행방향에 기여하는 정도를 전체구방향(이하 S^2 로 표시)에 대해서 적분한 것이다.

물질내부에서의 흡수, 산란은 각각 $\sigma_a(x)$, $\sigma_s(x)$ 로 표현되며 두 가지를 통합하여 $\sigma_t(x) = \sigma_a(x) + \sigma_s(x)$ 로 정의하고 $\sigma_t(x)$ 를 소멸계수(extinction coefficient)라 부른다. 식 (1)의 $\tau(u, x)$ 는 $\tau(u, x) = \int_u^x \sigma_t(a) da$ 와 같이 소멸계수가 단위구간동안 누적된 결과이며 이를 전 구간에 반영한 결과는 적분과정을 거쳐 $e^{-\tau(x_0, x)}$ 로 표현된다.

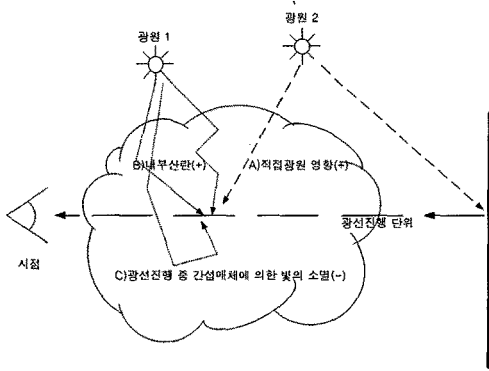


그림 2: 광선 진행

3.2 볼륨 포토매핑

3.2.1 광선 진행

아래의 식 (3)(a)-(c)는 식 (1)을 컴퓨터에서 이산적으로 계산하기 위해 빛의 진행 구간과 빛의 산란 방향을 일정 단위로 샘플링하여 재귀적으로 표현한 것이다. 식 (1)과 달리 K 개 광원의 빛이 현재 단위구간에 미치는 영향을 추가하였으며(항 (3a), 그림 2의 A), 물질의 발광은 없고 내부산란(항 (3b), 그림 2의 B)에 의한 변화를 S^2 방향에서 샘플링된 s 개의 내부산란 값으로 대표하여 계산하고 있다. 항 (3c)는 반투명 물질에 의해 단위구간에서 소멸되는 빛의 에너지를 표현하고 있다(그림 2의 C).

3.2.2 볼륨 포토매핑

$$L_{n+1}(x, \vec{\omega}) = \sum_{k=1}^K L_k(x, \vec{\omega}_k) \rho(\vec{\omega}_k, \vec{\omega}) \sigma_s(x) \Delta x \quad (3a)$$

$$+ \left\{ \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S L_s(x, \vec{\omega}_s) \rho(\vec{\omega}_s, \vec{\omega}) \right\} \sigma_s(x) \Delta x \quad (3b)$$

$$+ e^{-\sigma_t(x)\Delta x} L_n(x + \Delta x \cdot \vec{\omega}, \vec{\omega}) \quad (3c)$$

항 (3b)에서 내부산란의 값을 계산하기 위해 S^2 방향에 대한 내부산란 값의 샘플을 필요로 한다. 이러한 샘플을 얻기 위해서 몬테 카를로(Monte Carlo) 광선추적법(ray tracing)과 경로추적(path tracing) 등의 기법이 제안되었으나, 계산시간이 많이 소요되고 샘플 수가 부족할 경우 결과물에 노이즈가 생기는 문제가 있다. 볼륨 포토매핑에서는 이를 러시안 룰렛 방식에 기초를 두고 광원의 에너지를 나누어가진 포톤이란 입자를 통해 빛과 물질과의 상호작용을 시뮬레이션한 뒤 포톤이 물질과 상호작용한 위치에 포톤을 저장하여 해결하였다. 이렇게 얻어진 다중산란 샘플에서 계산되고 있는 단위구간의 일정범위에 위치한 포톤만 사용하여 다음과 같이 변형된 공식을 통해 다중산란 값을

구한다.

$$L_{n+1}(x, \vec{\omega}) = \sum_{k=1}^K L_k(x, \vec{\omega}_k) \rho(\vec{\omega}_k, \vec{\omega}) \sigma_s(x) \Delta x + \left\{ \sum_{p=1}^n \rho(\vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \frac{\Delta \Phi_p(x, \vec{\omega}_p)}{\frac{4}{3}\pi r^3} \right\} \sigma_s(x) \Delta x + e^{-\sigma_t(x)\Delta x} L_n(x + \Delta x \cdot \vec{\omega}, \vec{\omega}) \quad (4)$$

3.3 밀도추정

밀도추정은 관측된 실험결과를 토대로 확률밀도 함수(probability density function, 이하 pdf)를 구성하는 것을 말한다[11, 12]. 모수적 추정(parametric estimation)과 비모수적 추정(nonparametric estimation)이라는 두 가지 접근방법이 있는데, 전자는 pdf가 몇 가지 변수로 정의될 수 있는 함수로 구성된다고 가정하고 실험결과를 이용 변수를 정의하는 것이다. 예를 들어 임의의 실험결과가 기대값 E 와 분산 V 를 가지는 정규분포 형태의 pdf를 가질 것이라 판단된다면, 기대값과 분산을 실험결과를 이용하여 구하고 pdf를 정의할 수 있다. 이에 반해 후자는 실험결과가 임의의 pdf를 그리도록 하는 것이다. 예를 들어 히스토그램과 같은 경우 각 실험결과가 특정 구역의 크기를 키우게 되며 모든 실험결과가 얻어진 뒤 실험결과들의 총계를 이용하여 정규화 해주어 pdf를 추정할 수 있다. 따라서 모수적 추정방법은 얻어질 pdf가 취할 형태에 대한 정보가 필요하며 잘못된 정보를 바탕으로 pdf를 추정했을 경우 실제와 크게 다른 pdf를 얻게 될 수 있다.

이에 반해 비모수적 추정방법은 실험결과가 확률밀도함수를 결정하게 하므로 실험결과 외에 추가정보를 필요로 하지 않는다. 비모수적 추정방법은 기본적인 히스토그램 방법부터 커널이라는 밀도함수를 이용한 커널 스무딩(kernel smoothing) 방법 등 여러 종류가 있다.

3.4 커널 스무딩

커널 스무딩은 히스토그램에서 각각의 샘플들이 히스토그램의 구역 하나에 영향을 주었던 것에서 h 로 정의된 커널이라 불리는 밀도함수 $k(t)$ 를 통해 h 범위까지 영향을 주도록 한 것이다[13]. 여기서 h 는 커널이 실험공간에서 영향을 미치는 범위를 정의한 것이다. 커널은 밀도함수이기 때문에 $\int K(t)dt = 1$ 를 만족한다. 따라서 h 로 인해 커널의 영향범위가 달라지는 경우 밀도함수의 성질을 만족하게 해주기 위해 $K_h(x - X_i) = \frac{K(\frac{x-X_i}{h})}{h}$ 로 정의한다. 실험공간이 한개의 원소로 정의되는 경우 n 개의 샘플에 의해서 다음과 같은 공식을 통해 특정위치 x 의 확률 밀도

값이 얻어진다.

$$f(x; h) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left\{\frac{x - X_i}{h}\right\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - X_i) \quad (5)$$

여기서 X_i 는 n 개 샘플 각각의 위치를 나타내며, 알고자 하는 실험공간상 위치 x 에 모든 샘플들의 커널에 의한 영향력을 누적시킨 다음 밀도함수의 성질을 만족시키기 위해 샘플수로 나누어 주게 된다.

4. 제안 기법

4.1 포톤추적

본 논문에서 제안하는 광구 추정법 (photosphere estimation)은 포톤매핑 기법을 기반으로 하고 있다. 포톤매핑 기법은 두 단계로 나누는데, 첫 번째 단계는 전역조명 효과 중 다중산란을 시뮬레이션 하기 위한 포톤추적 과정이고, 두 번째 단계는 얻어진 정보를 바탕으로 다중산란 효과를 계산하여 직접조명 및 반투명 물질에 의한 소멸 효과와 함께 광도를 얻는 렌더링 과정이다.

포톤추적을 통해 시뮬레이션되는 전역광원 효과는 다중산란에 대한 것으로 주변의 물체들이 반사시키는 광원의 빛이 특정 위치에 영향을 주는 정도를 알기 위한 것이다. 이를 위해 광원이 가지고 있는 에너지를 균등하게 나누어 가진 포톤이라 불리는 입자를 이용하여 빛의 진행을 시뮬레이션 한다. 포톤매핑 기법에서는 이러한 포톤정보를 저장하기 위해 포톤 맵이라는 물체 정보와 분리된 이진탐색기반의 자료구조를 사용하는데 포톤과 상호작용한 물체의 복잡한 기하정보에서 포톤정보를 분리, 저장하여 포톤의 검색과 활용을 편리하게 하기 위해서이다.

그런데 반투명 물질의 자료구조는 포톤 맵의 자료구조와 유사하다. 포톤 맵의 경우 주어진 위치에 저장된 포톤의 에너지, 방향을 얻어오는 것이고 반투명 물질의 자료구조는 위치가 주어졌을 때 해당위치에 기록된 밀도, 색, 반투명도 등을 얻어오는 것이다. 그러므로 반투명 물질에 있어서 본래 포톤 맵이 가지는 물체정보와 포톤정보의 분리를 통한 검색과 활용의 편리함이 두드러지지 않게 된다. 오히려 유사한 자료구조를 중복 검색하기 때문에 검색시간이 늘어나게 되며 보다 정밀한 결과를 얻기 위해 포톤 수를 늘릴 경우 포톤 수가 증가함에 따라 포톤 맵의 저장 공간이 비례해서 늘어나게 된다.

따라서 본 논문에서 제시하는 광구 추정법에서는 커널과 히스토그램을 이용해서 반투명 물질의 입자에 포톤 정보가 누적되도록 하여 분리된 자료구조를 통합하였다. 포톤이 가지는 정보는 에너지와 방향에 대한 것인데 에너지의 경우 표현된 채널수에 따라 누적할 수 있지만 방향정보는 S^2 방향의 연속적인 범위를 가지기 때문에 본래 정보를 입자에 누적시키는 경우 포톤 맵과 마찬가지로 포톤수 증가에 따라 저장 공간이 늘어나게 된다. 그러므로 방향정보를 S^2 방향에 균일하게 분할한 히스토그

램을 통해 저장하여 포톤수의 증가에 상관없이 일정한 저장 공간이 소요되게 하였다.

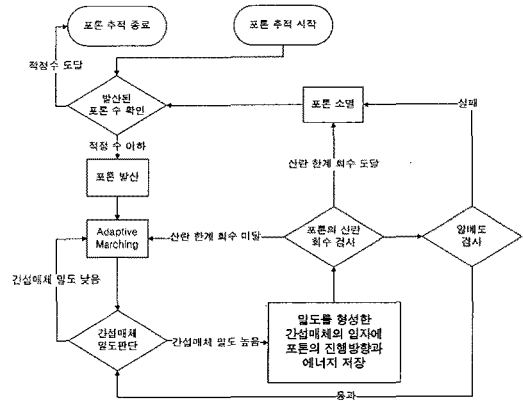


그림 3: 포톤추적 순서도

그림 3은 포톤추적과정을 도시하고 있다. 포톤 맵이 반투명 물질과 통합되었기 때문에 본래 포톤매핑에서의 포톤추적에서 포톤정보를 저장하는 단계가 변형되었다. 입자에 할당된 포톤 정보를 위한 자료구조는 다음과 같다.

```
struct{ COLOR energy; float *histogram; }
```

4.1.1 포톤 에너지의 분배

본 기법에서는 포톤추적 중 포톤의 영향범위에 위치한 반투명 물질의 입자는 해당 포톤의 에너지를 자료구조의 energy에 저장한다. 렌더링시 검색 반경 및 개수가 제한되어도 그 외곽에 위치한 포톤의 영향이 유지되도록 각 포톤들은 일정 범위를 가지고 반투명 물질에 기록되게 된다. 이때 두 가지 전력이 있을 수 있다. 첫째는 포톤의 에너지를 변형 없이 반투명 물질에 누적시키고 렌더링 단계에서 물질과 계산위치의 거리에 따른 가중함수를 이용해 복원하는 방법이며, 둘째는 포톤추적 단계에서 거리에 대한 가중함수를 사용하여 물질과 포톤의 거리에 따라 에너지를 물질에 차등분배하고 렌더링시 에너지를 모두 합하여 사용하는 것이다.

4.1.2 포톤 방향의 기록

포톤의 방향을 저장하기 위해서 S^2 방향공간을 균등하게 구분하여 히스토그램을 생성하였다. 그림 4에 도시한 바와 같이 S^2 방향을 균일하게 분할하기 위해서 삼각형의 분할방식을 사용하였다. 먼저 구의 표면을 8개로 나눈다. 각각의 분할된 표면적은 θ 와 ϕ 공간의 삼각형으로 대응되게 되며, 여기서 삼각형의 분할방식을 활용해 히스토그램의 구분된 각 영역이 균등한 표면적을 가지도록 하였다. 즉 삼각형 분할공식에 따라서 균등하게 나누어진 θ 의 각 영역에 대해 수평으로 몇 개씩 분할할 것인가를 구하는 것이다. 보다 세밀한 히스토그램을 적용하기 위해서

는 그림 4처럼 재귀적으로 삼각형 분할공식을 적용한다. 이렇게 준비된 히스토그램은 반투명 물질을 구성하는 각각의 입자에 할당하게 된다.

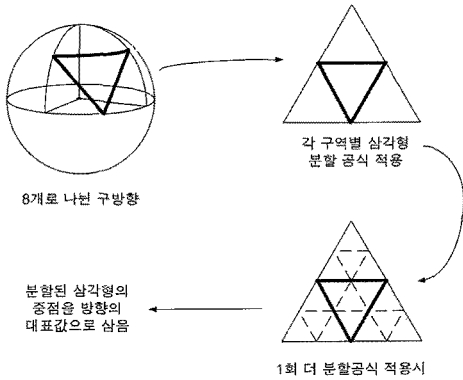


그림 4: 구 방향의 분할

이때 포톤의 방향정보를 히스토그램에 넣는 것은 세 가지 전략이 있을 수 있다. 첫 번째는 포톤의 방향과 가장 가까운 히스토그램의 영역을 찾아 기여도를 증가시키는 것이고, 두 번째는 포톤의 방향을 포함하는 히스토그램의 인접한 3개 영역을 찾아 무게중심좌표를 얻고 이를 히스토그램에 기록하는 것이다. 세 번째는 포톤의 방향을 중심으로 일정 범위에 속하는 히스토그램의 영역을 찾고 커널을 적용해 해당하는 영역에 그 값을 기록하는 것이다. 히스토그램의 크기가 충분히 큰 경우 두 번째와 세 번째 방법을 사용하여 포톤추적과정에서 밀도추정을 하도록 할 수 있으나 이 경우 저장 공간이 많이 필요하게 되며 시점과 그에 따른 위상함수를 반영하기 어렵게 된다. 따라서 첫 번째 전략을 통해 히스토그램에 저장하는 것이 저장 공간과 포톤추적과정의 시간을 절약하고 렌더링 과정에서 시점 및 위상함수를 반영한 결과물을 얻도록 하는데 가장 유용하다 할 수 있다. 이 경우 포톤의 방향정보를 저장하기 위해 해당 히스토그램 영역의 기여도를 증가시키는 것뿐만 아니라 영역이 대표하는 방향 벡터를 변형하게 되는데 이것은 영역에 누적된 벡터들의 합을 렌더링과정에서 밀도추정에 반영하는 것이 보다 오차를 줄일 수 있기 때문이다.

4.1.3 포톤매핑과의 비교

다음은 포톤 맵을 사용할 경우 각각의 포톤이 유지하는 정보이다.

```
struct{ COLOR energy; POSITION pos;
        DIRECTION dir; unsigned char index; }
```

포톤정보를 3차원 자료구조인 kd-tree를 사용하여 독립적으로 저장할 경우 상기한 자료구조가 포톤의 수만큼 필요하다. 입자에 할당되는 히스토그램의 정밀함에 따라 다르지만 그림 4처럼 한 번 삼각형 분할을 취한 히스토그램의 경우 히스토그램으로 각각의 입자에 할당되는 메모리는 128 바이트인데, 각 포톤

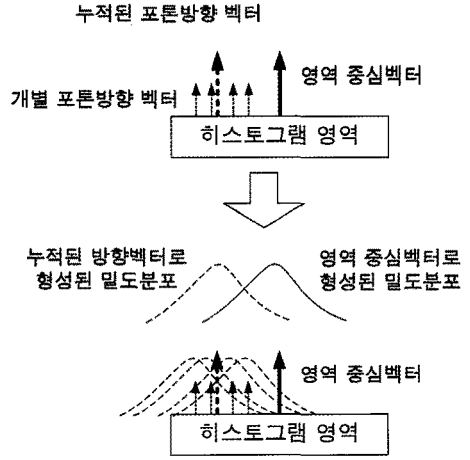


그림 5: 히스토그램 대표벡터 변형에 따른 효과

이 위치 (12 바이트)와 방향 (12 바이트), 인덱스 (1 바이트)를 저장하는데 필요한 메모리 요구량은 25 바이트이다. 입자에 할당되는 히스토그램의 저장 공간이 더 커서 오히려 저장 공간이 낭비되는 것처럼 보이지만 사실적인 결과물을 얻기 위해 포톤추적을 하는 경우 적게는 만 단위 많게는 수백만 개의 포톤을 사용하게 되므로 오히려 저장 공간이 절약됨을 알 수 있다. 예를 들어 10만개의 입자로 구성된 반투명 물질에서는 제안된 방법의 경우 포톤 수에 상관없이 $100,000 \times 128 = 12,800,000$ 바이트 (약 12.2 MBytes)의 추가 메모리가 필요하게 되는데, 포톤 맵을 이용할 때 포톤이 60만개가 저장되는 경우 15,000,000 바이트(약 14.3 MBytes), 100만개의 포톤이 저장되는 경우 25,000,000 바이트(약 23.8 MBytes)의 메모리를 사용하게 된다.

편 kd-tree의 경우 검색 시 소요되는 시간은 자료구조에 저장된 물체의 수 n 과 찾고자하는 물체의 수 α 에 대해 $O(\log n + \alpha)$ 의 시간복잡도를 가진다. 때문에 적게는 수만 개에서 많게는 수백만 개의 포톤으로 구성된 자료구조를 검색하는 시간을 제거함으로써 렌더링 속도향상이 가능하게 되었다.

4.2 렌더링

렌더링은 포톤추적을 통해 얻어진 다중산란 정보와 광원에 의한 직접조명 효과 및 반투명 물질로 인한 빛의 발광을 반투명 물질에 정의된 위상함수를 통해 시점 방향으로 어느 정도 적용할 것인지를 결정하는 과정이다. 그림 6은 렌더링과정을 도시하고 있다. 3.2.1절에서 설명한 광선전행법을 이용하여 단위구 간마다 본래 광량의 소멸과 광원으로부터의 직접적인 영향 및

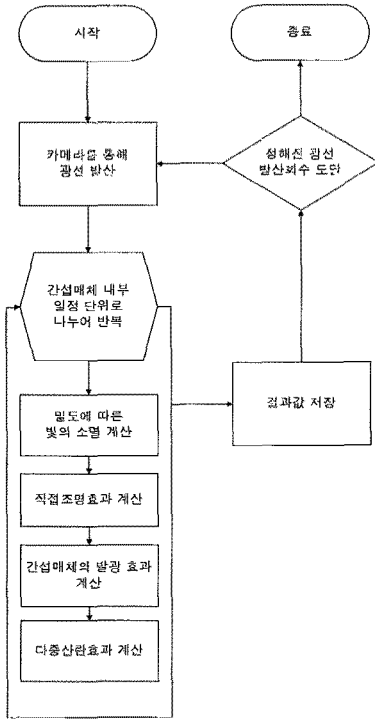


그림 6: 렌더링 순서도

반투명 물질의 발광과 다중산란 효과를 계산하게 된다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_i^{N_{found}} \rho(\vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) \cdot \frac{\Delta \Phi_i(x, \vec{\omega}_i)}{\Delta V} \\
 & = \sum_i^{N_{found}} \rho(\vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) \cdot \frac{\Phi_i}{\frac{3}{4} \pi r^3}
 \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)은 포톤 맵에서 검색한 포톤 정보를 이용해 다중산란 값을 계산하는 방법이다. 식 (4)에서 다중산란에 계산을 위한 항을 분리한 것이며 각 포톤들이 동일한 에너지 Φ_i 를 가지고 있다는 전제 하에 단순화한 것이다. 포톤 맵에서는 다중산란의 값을 계산하기 위해 계산 위치에서 반경 r 에 속하는 포톤을 N_{found} 개 검색하고 각각의 포톤이 위상함수에 의해서 시점방향에 기여하는 정도를 구하여 이를 검색영역의 부피에 대해서 평균을 낸다. 즉 찾아진 포톤의 수와 포톤의 방향정보의 분포에 따라서 결과 값이 달라진다. 그림 7은 시점방향에 대해서 포톤의 방향이 반대일 경우 가장 큰 영향을 가지는 위상함수를 표현하고 있다. 만약 포톤 맵에서 검색된 포톤들이 위상함수의 영향이 적은 곳에 몰려있으며 위상함수 값이 큰 곳의 포톤은 검색되지 못하였을 경우에는 그로 인해 결과 값이 왜곡되게 된다.

그런데 포톤 맵에 의한 포톤정보의 활용은 검색반경과 개수라는 한계를 가지고 있다. 그림 8에서 도시한 것처럼 포톤이 검색반경 바로 외곽에 위치했거나 최대 검색개수의 제한에 걸렸을

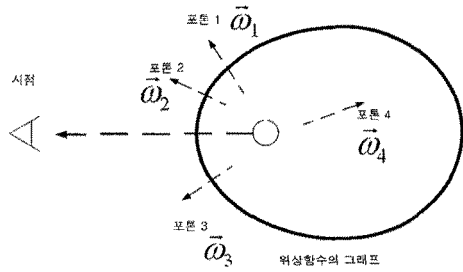


그림 7: 방향성을 가지는 위상함수와 주어진 포톤 정보

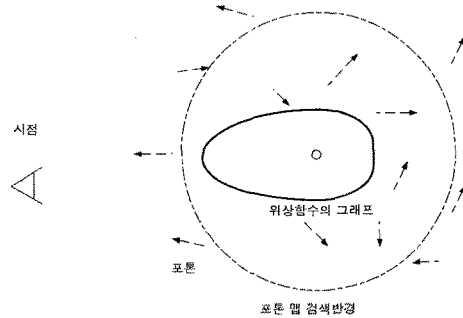


그림 8: 포톤 맵 검색반경과 반영되지 못한 포톤

때, 해당 부피에 포톤의 영향력이 미치지 못 그것을 반영하지 못한다.

앞서 포톤추적과정에서 포톤 맵과 반투명 물질의 자료구조를 통합하였는데 각각의 포톤은 일정 범위의 영향력을 가지고 반투명 물질의 자료구조에 자신의 정보를 저장하였다. 이런 자료구조의 통합을 통해 저장 공간과 검색시간을 절약했을 뿐만 아니라, 포톤의 정보를 일정영역에 분산하여 저장했기 때문에 포톤 맵이 가지는 검색반경과 개수에 따른 포톤 정보 활용의 제약을 극복할 수 있다. 비록 위상함수가 방향성을 가지는 경우 중요한 요소인 포톤의 방향을 몇 개의 구분된 영역에 대해 히스토그램을 통해 샘플링 하여 저장하지만 이는 커널 스무딩(3.4절)을 통해 더 세분화된 영역의 정보를 복원함으로써 보완될 수 있다.

4.2.1 포톤 에너지 추출

포톤추적과정에서 포톤의 에너지를 반투명 물질에 저장하기 위해 두 가지 방법을 사용했다. 첫 번째는 검색된 반투명 물질에 포톤의 에너지를 그대로 저장하는 것이고 두 번째는 포톤과 물질과의 거리에 따른 가중함수를 이용해 정규화된 가중값을 얻어 이를 곱한 결과를 반투명 물질에 저장하는 것이다. 첫 번째의 경우 식 (7a)와 같이 렌더링 단계에서 계산위치와 반투명 물질의 거리 d_i 에 따른 가중함수 $W(d_i)$ 를 이용 물질에 저장된 에너지 E 를 복원하게 되며 두 번째의 경우 식 (7b)처럼 반투명 물질에 저장된 에너지를 합산하여 현재 에너지를 추정한다.

$$E = \sum_{i=1}^{n_p} \Phi_i \cdot W(d_i) \quad (7a)$$

$$E = \sum_{i=1}^{n_p} \Phi_i \quad (7b)$$

4.2.2 커널 스무딩을 이용한 방향정보 추출

광구 추정법에서 포톤의 방향정보는 반투명 물질에 할당된 히스토그램에 기록되었다. 포톤의 방향정보는 위상함수의 방향성에 따라 다중산란 결과 값에 중요한 역할을 하게 되는데 연속된 공간을 몇 개의 대표방향으로 구분한 히스토그램의 누적 값을 그대로 사용하는 것은 사실적인 결과물을 얻기에 충분하지 못하다. 따라서 렌더링과정에서 방향공간을 더 세분화하여 각 영역의 밀도분포를 파악하고 결과값 계산에 적용하여야 한다.

이를 위해 3.4절에서 소개한 비모수 추정방법인 커널 스무딩을 사용했다. 히스토그램의 공간은 θ 와 ϕ 로 정의되는 이차원 평면에 대응되게 된다. 따라서 이차원 커널을 이용하여 커널 스무딩 방법을 적용했다. 식 (8)는 특정 방향 $\vec{\omega}_i$ 의 밀도를 추정하기 위한 방법을 나타낸 것이다. 반투명 물질에 저장된 히스토그램의 한 영역을 대표하는 벡터가 $\vec{\omega}_j$ 일 경우 $\vec{\omega}_i$ 와 $\vec{\omega}_j$ 의 거리는 $\cos^{-1}(\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_j)$ 로 정의된다. 이 거리를 이용해 구해진 커널의 값은 히스토그램의 누적값 $n(j)$ 와 곱해서 $\vec{\omega}_i$ 에 누적되며 히스토그램의 모든 영역에 대해 계산이 끝나면 이차원 커널의 정규화를 위한 h^2 값과 히스토그램에 기록된 누적 값의 총계 $\alpha = \sum_j n(j)$ 을 이용해 밀도를 정규화 해주어 $\vec{\omega}_i$ 에 대한 pdf를 구한다. 구해진 pdf와 이차원 공간에서 $\vec{\omega}_i$ 영역의 넓이 β 를 곱해서 밀도를 얻는다.

$$D(\vec{\omega}_i) = \frac{\beta}{\alpha \cdot h^2} \sum_j^{near-\vec{\omega}_i} n(j) \cdot Kernel2D\left(\frac{\cos^{-1}(\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_j)}{h}\right) \quad (8)$$

그런데 지금까지 설명한 방향정보에 대한 밀도추정을 이용하기 위해선 입자에 퍼져있는 방향정보 히스토그램을 통합할 필요가 있다. 만약 입자가 가지고 있는 히스토그램을 모두 누적해서 통합하려 한다면 히스토그램 크기와 입자 수에 비례하는 계산시간이 소요되게 된다. 따라서 그림 9와 같은 중요도에 따른 샘플링 통합 방법을 제시한다. 즉 입자에 할당된 히스토그램 중 임의의 한 영역을 선택하고 통합 히스토그램의 동일 영역에 누적 값을 증가시키는 것이다. 이를 위해서 각 입자마다 누적된 포톤의 총 수에서 임의의 수를 선택하고 히스토그램의 각 영역의 누적 값을 순차적으로 더해 선택된 임의의 수가 속하는 영역이 도달하게 되면 그 영역이 선택되게 한다.

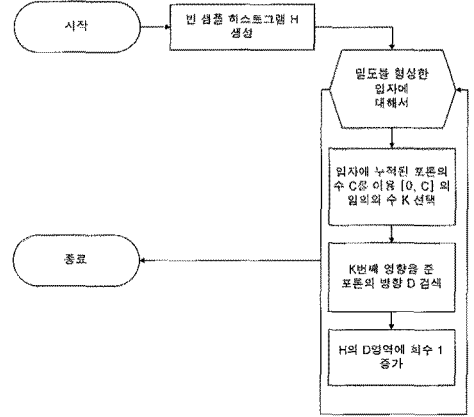


그림 9: 히스토그램 통합

4.2.3 다중산란 결과 계산

최종적으로 식 (9)와 같이 방향에 대한 밀도장과 에너지를 이용해 다중산란 값을 계산하게 된다. 복원 히스토그램의 각 영역 $\vec{\omega}_k$ 에 대해서 위상함수를 이용해 시점방향의 기여도를 계산하고 추정된 방향에 따른 에너지 분포를 이용해 다중산란 값을 추정한다.

$$\frac{E}{\frac{3}{4} \pi r^3} \cdot \sum_{k=1}^K D(\vec{\omega}_k) \cdot \rho(\vec{\omega}_0, \vec{\omega}_k) \quad (9)$$

지금까지 설명한 방향정보 추정과정을 통한 내부산란 계산시간은 추정방향 수 d 와 사용된 커널과 커널의 영향범위의 크기에 따라 결정되는 각 방향에 영향을 주는 히스토그램 영역의 수 k 및 반투명 물질의 방향정보 히스토그램의 크기 s 의해 다음과 같은 식으로 추정할 수 있다.

$$O((d \times h) + s) \quad (10)$$

반면에 볼륨 포톤매핑기법을 사용할 경우 사용하고자 하는 포톤 수 α 와 전체 포톤수 n 에 따라 다음과 같이 수행시간이 정의된다.

$$O(\log(n) + \alpha) \quad (11)$$

5. 실험 결과

본 논문의 실험에는 다양한 크기의 입자로 구성된 연기 시뮬레이션 결과물을 사용하였다(그림 10). 빛이 직접적으로 영향을 주지 못하는 영역에서 내부산란에 의한 영향이 가장 크게 표현되기 때문에 좁은 영역에 비추이는 스코프광원을 사용했다.

5.1 결과물을 통한 비교

먼저 밀도추정을 통해 나타낼 수 있는 효과를 비교하기 위해 볼

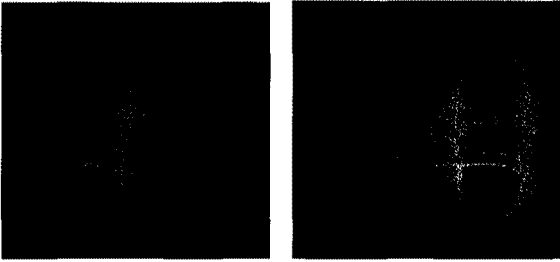
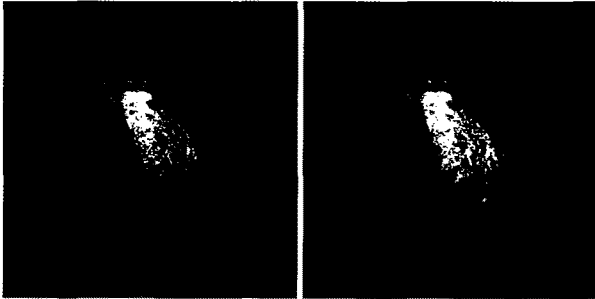
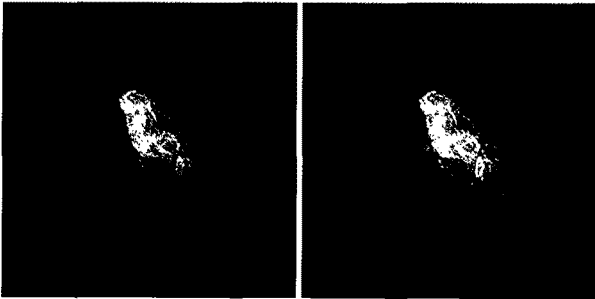


그림 10: 입자 형태로 주어진 반투명 물질 예



(a) 적용 전

(b) 적용 후



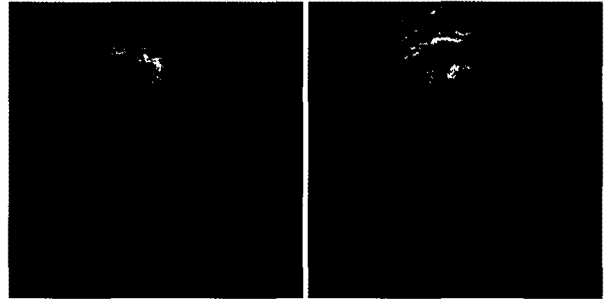
(c) 적용 전

(d) 적용 후

그림 11: 방향정보 밀도추정 전후 비교 (위상함수 인자 $g=0.7$)

블룸 포토 맵을 사용하여 방향정보에 대한 밀도추정을 사용하였다. 그림 11에서 보이는 것처럼 광원의 직접적인 영향이 없는 영역 (하이라이트 외의 지역)에서 시점에 따라 강조되는 내부산란값이 잘 추정되어 보다 선명한 결과물이 나올 수 있다.

그림 12는 기동형태로 올라오던 연기입자들이 천정에서 흡어지는 시뮬레이션을 광구 추정법과 블룸 포토맵기법을 통해 렌더링한 결과물이다. 스폿광원으로 비춰지지 않는 외곽영역 (하이라이트 외의 지역)에서 간접조명으로 인한 효과가 보다 선명하게 나오는 것을 볼 수 있다. 그림 13은 버섯구름 형태로 퍼져나가는 연기입자를 렌더링하여 비교한 결과이다. 블룸 포토맵에서는 나타나지 않았던 간접광원에 영향받는 지역이 드러나고 연기의 윤곽이 보다 입체감있게 나타남을 볼 수 있다.



(a) 광구 추정법: 프레임 1

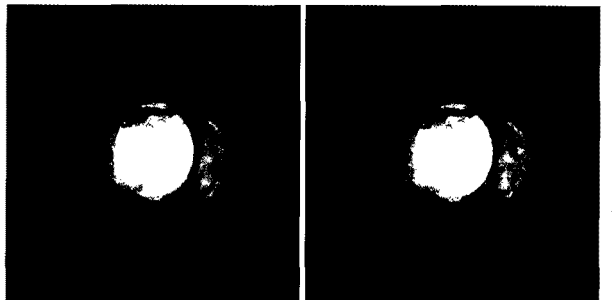
(b) 광구 추정법: 프레임 2



(c) 블룸 포토맵: 프레임 1

(d) 블룸 포토맵: 프레임 2

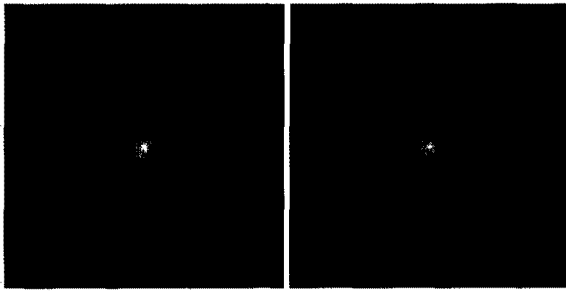
그림 12: 블룸 포토맵과의 비교 (위상함수 인자 $g=0.8$)



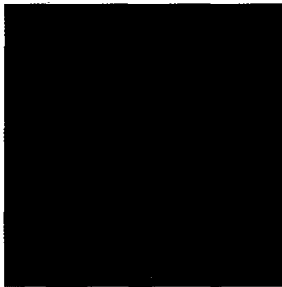
(a) 블룸 포토맵

(b) 광구 추정법

그림 13: 블룸 포토맵과의 비교 (위상함수 인자 $g=0.6$)



(a) 영향범위 최대 (b) $\sigma \times 1.5$



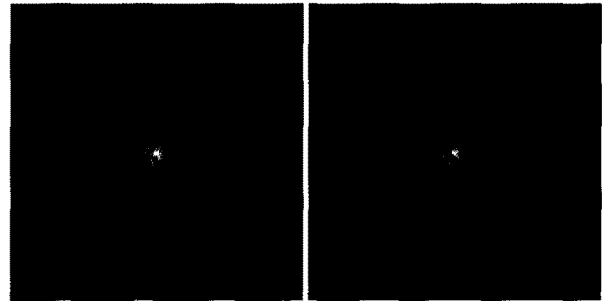
(c) σ

그림 14: 커널이 정규분포에 따를 때 (σ 는 히스토그램 영역의 검색 범위 기준값). (a), (b), (c) 순서대로 히스토그램 검색 범위를 좁힘에 따라 다중 산란 효과가 감소하는 문제가 발생한다.

5.2 계산 시간 비교

광구 추정법에서 커널 스무딩을 이용하기 위해 알고자 하는 방향과 가까운 방향정보 히스토그램의 영역을 찾아 누적 값을 알아내야 한다. 이때 커널의 특징에 따라 찾아야 하는 히스토그램 영역의 수가 차이 나는데 이는 계산시간에 큰 영향을 미친다. 그림 14는 정규분포 형태의 커널을 사용할 때 히스토그램의 영역을 찾는 범위를 제한하여 렌더링한 결과이다. 제한정도에 따라 다중산란 특징을 잃게 되는 것을 볼 수 있다. 그림 15는 커널의 영향범위가 제한되지만 [13]에서 설명한 바와 같이 추정오차를 줄여주는 Epanechnikov 커널을 사용한 경우이다. 적은 히스토그램의 영역을 사용했지만 정규분포형태를 사용했을 때와 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 표 1은 정규분포형태의 커널을 사용하고 광구 추정법을 행했을 때 샘플수와 매체정보 검색범위에 따른 계산시간을 측정된 결과이다. 광구 추정법 적용 시 128개의 방향으로 세분화 했으며 그림 15를 렌더링 하였다. 성능측정을 위해 사용한 장비는 AMD Athlon 64 3500+ CPU와 2기가바이트의 메인메모리를 장착한 PC이다. 정규분포 형태의 커널을 사용할 경우 불투명 포톤매핑 기법보다 계산시간이 더 많이 소요되지만, Epanechnikov 커널을 사용하였을 경우 향상된 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 16은 포톤매핑 기법 사용시 포톤검색에 사용되는 이론적인 계산시간과 실제 측정된 시간 및 광구 추정법에서 사용된



(a) 정규분포 커널 (b) Epanechnikov 커널

그림 15: 커널 변경에 따른 비교

(위상함수 인자 $g = 0.4$, 단위: 초)

검색범위	0.4	0.3	0.2
포톤 맵	618.2	353.9	186.3
8개 방향 샘플	539.4	375.3	223.8
32개 방향 샘플	835.5	572.6	321.8

표 1: 포톤 맵과 광구 추정법 계산시간 비교

시간을 비교한 결과이다. 포톤이 증가함에 따라 포톤매핑의 계산시간이 크게 증가함을 볼 수 있다.

6. 결론 및 추가 연구과제

본 논문에서는 포톤매핑 기법을 바탕으로 반투명 물질의 다중산란 효과를 효율적으로 샘플링하여 저장하고 커널 스무딩을 통해 사실적으로 복원하는 광구 추정법을 제안하였다. 포톤추적이 러시안 룰렛 방식에 따르기 때문에 생기는 포톤의 비대칭적인 분포를 개별 포톤이 영향력을 가지고 물질에 직접 정보를 저장하도록 하여 개선했으며, 시점독립적인 포톤매핑기법의 특징을 유지했다. 또한 포톤의 수에 따라 증가하던 저장공간 사용량과 내부산란효과 계산시간 증가를 반투명 물질의 정보 크기에 비례하도록 했다. 이러한 광구 추정법은 주어진 포톤의 정보를 물질에 분배하는 것이기 때문에 다양한 성질의 광원에서 생성된 포톤의 정보를 추가적인 조치 없이 사용할 수 있으며 반투명 물질의 발광이 고려되는 경우에도 발광정보를 샘플링 하여 저장하고 광구 추정법에 따라 다중산란정보와 통합하여 복원할 수 있다.

그러나 반투명 물질에 포톤의 방향정보를 히스토그램을 통해 샘플링 하여 저장하기 때문에 적은 히스토그램만으로 좋은 질

(위상함수 인자 $g = 0.4$, 단위: 초)

검색범위	정규분포 커널	Epanechnikov 커널
0.4	835.5	495.75

표 2: 커널 선택에 따른 계산시간

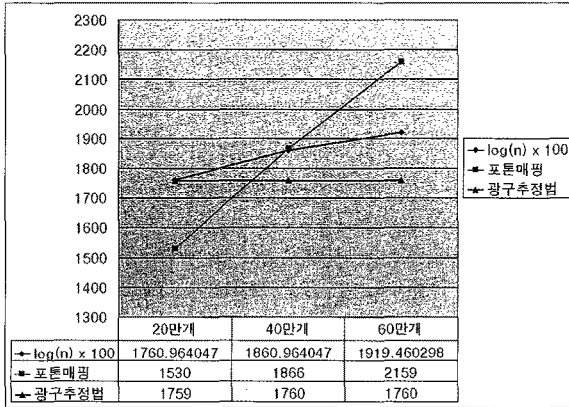


그림 16: 수행시간 비교 (연기 입자 6만개, 단위: 초)

과를 얻지 못하는 경우 히스토그램을 보다 세분화하여 사용해야 한다. 이 경우 방향정보 추정에서 사용되는 히스토그램 영역의 수가 증가하기 때문에 계산시간이 길어지게 되며 저장공간 역시 더 많이 필요하게 된다. 또한 커널 스무딩을 통해 추정되는 방향정보의 분포는 수집되지 못한 정보를 복원하는 긍정적인 영향도 있지만 실제로 없어야 될 정보가 추정되거나 과장/축소될 가능성이 존재한다. 따라서 내부산란이 충분히 일어날 수 있는 고밀도 영역에 대해 광구 추정법을 적용하는 것이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다.

한편 전역조명효과 구축에 있어서 포톤의 저장위치에 따르지 않고 포톤의 진행 경로를 활용해 더 좋은 결과를 얻으려는 시도가 있었다[14]. 이렇게 포톤의 저장위치에 따른 정보가 아닌 포톤추적에 따라 파생된 추가적인 정보를 활용하려는 시도에 대해 포톤의 정보를 저장위치에서 통합하여 저장한 광구 추정법은 적용이 어려울 것으로 보인다. 다만 포톤이 산란될 때 러시안 룰렛에 따라 원의 한 방향을 선택하여 진행하게 되는 경우 원에 대한 방향을 균등하게 나누어 저장하고 파이널 게더링에서 처럼 주변 방향을 샘플링 하여 입사된 빛을 계산한다면 결과물에 생길 수 있는 노이즈를 줄일 수 있을 것이다.

또한 광구 추정법을 사용해 다중산란을 계산하는 것은 자료의 내용에 독립적인 고정된 계산과정을 거치므로 하드웨어를 활용해 가속하도록 할 수 있을 것이다. GPU를 사용해 가속하려는 시도를 하였으나 다중산란을 계산하기 위해서 형성된 방향정보 히스토그램을 GPU에 전달하는 과정에서의 병목현상이 커서 성능이 향상되지 못했다. 간섭매체의 자료구조를 GPU상에 미리 저장하여두고 이를 사용할 수 있다면 이러한 병목현상을 없애고 보다 빠른 간섭매체의 렌더링을 할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: R01-2007-000-

21057-0(2009)).

참고 문헌

- [1] H. W. Jensen and P. H. Christensen, "Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps," in *Proc. of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1998, pp. 311–320.
- [2] J. Stam, "Stochastic rendering of density fields," in *Proc. of Graphics Interface '94*, 1994, pp. 51–58.
- [3] N. Foster and D. Metaxas, "Realistic animation of liquids," *Graphical Models and Image Processing*, vol. 58, pp. 471–483, 1996.
- [4] E. Cerezo, F. Perez-Cazorla, X. Pueyo, F. Seron, and F. Sillion, "A survey on participating media rendering techniques," *The Visual Computer*, vol. 21, pp. 303–328, 2005.
- [5] S. Premoze, M. Ashikhmin, J. Tesendorf, R. Ramamoorthi, and S. Nayar, "Practical rendering of multiple scattering effects in participating media," in *Proc. of Eurographics Symposium on Rendering '04*, 2004, pp. 363–374.
- [6] J. Jimenez and X. Pueyo, "Interactive rendering of globally illuminated scenes including anisotropic and in homogeneous participating media," *The Visual Computer*, vol. 21, pp. 449–462, 2005.
- [7] K. Chiu, K. Zimmerman, and P. Shirley, "The light volume: an aid to rendering complex environments," in *Proc. of Eurographics Rendering Workshop '96*, 1996, pp. 1–10.
- [8] A. Boudet, P. Pitot, D. Pratomarty, and M. Paulin, "Photon splatting for participating media," in *Proc. of the 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*, 2005, pp. 197–204.
- [9] N. Adabala and S. Manohar, "Modeling and rendering of gaseous phenomena using particle maps," *Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 11, pp. 279–293, 2000.
- [10] S. Chandrasekhar, *Radiative Transfer*, 1st ed. Oxford Univ. Press, 1950.
- [11] B. W. Silverman, *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, 2nd ed. CHAPMAN & HALL/CRC, ISBN 0-412-24620-1, 1986.

- [12] D. W. Scott, *Multivariate Density Estimation*, 1st ed. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-54770-0, 1992.
- [13] M. P. Wand and M. C. Jones, *Kernel Smoothing*, 1st ed. CHAPMAN & HALL/CRC., ISBN 0-412-55270-1, 1995.
- [14] V. Havran, J. Bittner, R. Herzog, and H. P. Seidel, "Ray maps for global illumination," in *Proc. of Eurographics Symposium on Rendering '05*, 2005, pp. 43-54.

〈저자 소개〉



- 민승기**
- 2002년 2월 아주대학교 미디어학(학사)
 - 2007년 8월 서강대학교 컴퓨터공학과 (석사)
 - 2008년 1월 ~ NCSOFT LF개발팀
 - 관심분야: 실시간 렌더링, 분산처리



- 임인성**
- 1985년 2월 서울대학교 계산통계학과 (학사)
 - 1987년 5월 Rutgers, The State University of New Jersey, 컴퓨터학과 (석사)
 - 1991년 7월 Purdue University, 컴퓨터학과 (박사)
 - 1993년 3월 ~ 현재 서강대학교 컴퓨터공학과 교수
 - 관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 고성능 계산, 과학적 가시화