

Scattered Light Representation in Accordance with the Material Using Scatterer Template in Volume Rendering

Byeong-Joon Lee[†] · Koojoo Kwon^{††} · Byeong-Seok Shin^{†††}

ABSTRACT

For realistic rendering volume to calculate the light effects as well as the shade is essential. In order to produce the high quality of the resulting image, it is necessary to represent a global illumination, and it should be considered an indirect effect of the direct impact and scattering of light. It requires a lot of resources in order to perform this operation and, in particular, is very expensive when large amounts of data to be rendered as a volume data is consumed. In this paper, we generate a scatterer template according to the physical laws for each material. Considering that each object having material property stores photons of the template based on the Lambert illumination model. When the volume rendering in this paper, using the photon is stored in the template, based on the voxel to be sampled within the examination volume occluded, and it represents the global illumination of the scattering. Because the materials produced by the template requires a less resource only if comprised of a complex material, a simple operation can be expressed within the scattering volume at a low cost through.

Keywords : Volume Rendering, Global Illumination, Volume Scattering, Ambient Occlusion, Ray-Casting, Material Representation

볼륨 렌더링에서 산란자 템플릿을 이용한 재질별 산란광 표현

이 병 준[†] · 권 구 주^{††} · 신 병 석^{†††}

요 약

사실적인 볼륨 렌더링을 위해서는 음영처리 뿐만 아니라 조명 효과를 계산하는 것이 필수적이다. 높은 품질의 결과영상을 만들어내기 위해서는 전역 조명을 표현할 필요가 있는데, 빛의 직접적인 영향과 산란에 따른 간접적인 영향을 고려해야 한다. 이러한 연산을 수행하기 위해서는 많은 자원이 필요하고, 특히 볼륨 데이터처럼 대용량의 데이터로 렌더링 할 때는 매우 많은 비용이 소모된다. 본 논문에서는 각 재질에 대해 물리적 법칙에 따른 산란자 템플릿을 생성한다. 각 물체들이 가지는 재질 특성을 고려하여 램버트 조명 모델을 기반으로 템플릿의 광자들을 저장한다. 본 논문에서 볼륨 렌더링을 할 때, 볼륨 내부에서 샘플링 되는 복셀을 기준으로 템플릿에 저장된 광자를 이용해 차폐를 검사하고, 산란에 따른 전역 조명을 표현한다. 재질별로 템플릿을 생성하기 때문에 매우 복잡한 물질들로 구성된 것만 아니라면 적은 자원을 필요로 하며, 간단한 연산을 통해 적은 비용으로 볼륨 내부의 산란을 표현할 수 있다.

키워드 : 볼륨 렌더링, 전역 조명, 산란광, 앰비언트 오클루전, 광선 투사법, 재질 표현

1. 서 론

볼륨 렌더링(volume rendering)은 물체의 외부뿐만 아니라 내부까지 보여 줄 수 있어서 다양한 분야에서 사용된다.

볼륨 렌더링은 작은 큐브형태인 복셀(voxel)들로 이루어진 볼륨데이터를 이용하여 반투명체를 렌더링 하는 방법이다. 최근에 그래픽 하드웨어의 성능이 높아지면서 대용량의 볼륨 데이터를 실시간에 렌더링 할 수 있게 되었다. 볼륨 렌더링은 물체의 내부를 반투명하게 표현할 수 있다는 특징이 있어서 의학 또는 공학 분야에서 다양하게 사용된다[1].

고품질의 사실적인 렌더링을 위해서는 조명효과는 필수적이다. 조명 처리를 통해 음영(shading)을 명확하게 표현해 주면 결과 영상에서 깊이감과 형태감을 뚜렷하게 하여 입체적인 표현이 가능하다.

컴퓨터에서 조명효과를 표현하기 위한 수학적 모델은 2가지로 분류된다. 첫째는 주변 환경을 고려하지 않고 광원의 영향만을 고려하여 조명 효과를 표현하는 지역 조명(local

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-차세대정보컴퓨팅기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012M3C4A7032781).

※ 이 논문은 2016년도 한국정보처리학회 춘계학술발표대회에서 '볼륨 렌더링에서 산란과 음영 표현을 위한 빛-분포 템플릿 설계'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임.

† 준 회 원 : 인하대학교 컴퓨터정보공학과 석사과정

†† 정 회 원 : 인하대학교 컴퓨터정보공학과 연구교수

††† 종신회원 : 인하대학교 컴퓨터정보공학과 교수

Manuscript Received : July 4, 2016

First Revision : August 18, 2016

Accepted : August 24, 2016

* Corresponding Author : Byeong-Seok Shin(22151486@inha.edu)

illumination) 모델이고, 두 번째는 실제 물리적 법칙을 기반으로 주변 환경을 이루는 물체들과 그 물체들의 물성까지 고려하여 조명 효과를 계산하는 전역 조명(global illumination) 모델이다. 지역 조명 모델은 고려해야 할 인자가 적기 때문에 연산 속도가 빠르지만, 음영의 경계가 급격하게 변하므로 사실적인 결과를 얻을 수 없다[2]. 이를 해결하기 위해 앰비언트 오클루전(ambient occlusion) 기법으로 음영을 처리하여 자연스럽게 표현하는 방법을 사용한다[3]. 지역 앰비언트 오클루전(local ambient occlusion)만으로는 좋은 효과를 내기 어렵기 때문에, 동적 앰비언트 오클루전(dynamic ambient occlusion)과 같은 기법이 추가로 나타나게 되었다[4-6]. 전역 조명 처리를 위해서는 주변의 간접 광원들까지 고려해야 한다. 볼륨 렌더링에서 조명 표현을 할 때는 물체의 내부에서 일어나는 빛의 작용도 계산해야 하기 때문에 기존의 조명 처리보다 더 많은 자원을 소모하게 된다. 이렇게 하면 결과 영상의 품질은 좋아지지만, 연산량과 자원 소모량이 크게 증가한다. 이러한 문제를 해소하기 위해 그림자 맵을 생성하여, 그림자 맵을 토대로 렌더링 하는 기법이 있다[7]. 이는 음영만을 표현해주는 단점이 있었다. 빛이 소멸되는 것을 이용해 간접 조명을 표현해주는 기법과 같은, 전역 조명을 위한 복잡한 연산을 단순한 수식으로 근사시켜 연산과 자원의 소모를 줄이고 속도를 증가시키는 연구들이 진행되고 있다[8-10].

전역 조명처리에서 물체의 내부에서 일어나는 광학현상을 모사해야 하므로 빛에 의한 산란을 효과적으로 표현해야 한다. 산란은 추적하기 힘들 정도로 매우 많은 지점에서 발생한다. 광선 추적법(ray-tracing)을 이용해서 이를 계산할 수 있지만[11], 물체의 내부에서 빛의 흡수, 굴절, 반사가 일어날 때마다 다시 재귀적으로 광선을 추적해야 하기 때문에 많은 비용이 소요 된다. 조명 효과의 품질을 높이기 위해 광선의 수를 증가 시킬수록 처리 비용은 기하급수적으로 늘어나게 된다. 이러한 문제점을 개선하고자 사전에 시뮬레이션을 통해 근사시킨 값들을 계산하여 사용하거나, 전처리 과정을 통해 볼륨 데이터에 대한 포톤맵(photon-map)를 생성하여 이를 참조해 전역 조명을 표현하기도 하였다[12, 13]. 이를 볼륨 렌더링에 적용하기 위한 형태로 변형하여 사용하기도 하였다[14]. 그러나 이러한 방법에서는 전처리 과정에 많은 시간이 소모되고, 시뮬레이션을 통해 최종적으로 얻어진 값의 집합들이나 포톤맵은 많은 자원을 사용하는 문제가 있다.

본 연구에서는 물체가 가지고 있는 각 재질의 물성을 기반으로 산란에 따른 광량을 계산하여 산란자 템플릿(scatterer template)을 생성하고, 이를 통해 전역 조명 효과를 표현하는 방법을 제안한다. 비슷한 재질의 물체 내에서는 빛의 산란에 의한 광자의 분포가 유사한 형태를 가지게 되므로, 이 성질을 이용하여 빛의 반사, 굴절과 흡수를 근사시켜서 광자들을 생성한다. 각 템플릿들은 재질별로 생성되므로, 극단적으로 다양한 물성을 가진 물체를 렌더링 하는 경우가 아니라면 기존의 방법들에 비해 매우 적은 자원을 필요로 한다. 여기서 각 템플릿은 “광량은 비슷한 겉보기 정도를 가진

다.”는 램버트의 법칙(lambert's law)에 따라 램버트의 조명 모델을 사용하여 광량을 계산한다[15]. 생성된 템플릿의 광자들을 참조하여 색상 혼합(color blending)을 통해 산란에 따른 렌더링 지점의 색상을 결정한다. 음영 표현을 위한 앰비언트 오클루전을 적용하고자 한다. 이에 산란자 템플릿을 이용하여 주변의 차폐물을 검사한다. 사실적인 산란광 표현을 위해 산란자 템플릿의 광자들을 참조한다. 산란광을 표현하는 중에 서로 다른 재질간의 빛의 산란을 계산하기 위해서 서로 다른 재질에 대한 템플릿간의 물리 법칙에 의한 상관관계를 계산한다. 확률적으로 광자의 분포가 비정상적으로 밀집되거나 비슷한 형태의 템플릿들에 의해 노이즈가 생기는 현상이 발생할 수도 있는데 이것은 템플릿들의 혼합을 통해 개선할 수 있다.

2. 관련 연구

빛의 산란을 계산하려면 물성에 따른 반사율과 굴절률을 고려해야 한다. 간접 조명의 영향을 완벽하게 계산할 수는 없으므로 가장 비슷하게 근사해야 한다. 사람의 몸과 같이 반투명하며 다양한 물질로 구성된 혼합물은 내부에서 빛의 산란이 일어나게 된다. 빛의 산란은 인접한 물체들간의 재질차이에 의해 발생되는데, 인체의 내부에서는 뼈와 근육, 근육과 피부 사이뿐만 아니라, 이를 이루는 세포의 경계에서도 빛의 산란이 일어난다. 혼합물에서 광학현상은 발광, 흡수, 산란을 통해 일어난다. 스스로 빛을 내는 발광체는 광도에 영향을 준다.

산란에는 내부 산란(in-scattering)과 외부 산란(out-scattering)이 존재한다. 외부 산란은 단일한 빛이 여러 갈래로 흩어지는 경우를 말하고, 내부 산란은 여러 갈래의 빛들이 하나로 합쳐지는 것을 말한다. 혼합물 내부에서는 빛의 산란이 매우 빈번하게 발생하게 되고, 내부의 빛의 영향을 받는 각각의 지점들에서는 주변의 간접 광원에서 외부 산란된 빛들을 내부 산란 과정을 통해 흡수하게 된다. 이때, 유사한 물성을 가진 혼합물 내부에서는 비슷한 형태의 산란이 일어나고, 전혀 다른 물성을 가진 물체와의 경계에서는 빛의 굴절과 반사되는 정도가 달라진다. 따라서 물체 내부의 한 지점에서 내부 산란을 통해 흡수되는 빛의 양은 광원으로부터 해당 지점에 도달하는 빛의 양과 같다.

볼륨 렌더링은 샘플링한 3차원 데이터를 2차원으로 투영하여 보여주는 기법을 말한다. 대표적인 방법으로 텍스처 슬라이싱(texture slicing)과 광선 투사법(ray-casting)이 있다. 텍스처 슬라이싱은 CT와 같은 기기를 통해 얻은 2차원 이미지를 차례대로 쌓아서 결과 영상을 생성한다. 하지만 이 방법은 관측자의 시점이 슬라이싱 되는 텍스처 평면의 옆면이 되면 결과가 보이지 않는 문제가 있다. 이를 개선하기 위해 시점 정렬 슬라이스(view-aligned slice) 기법이 제안되었다[16]. 이것은 볼륨 데이터를 잘라서 이미지를 생성할 때, 항상 관측자의 시점 방향과 수직이 되는 평면으로 슬라이스 이미지를 생성하는 기법이다. 이 기법을 통해 시

점 문제는 해결됐지만, 복잡한 연산이 필요하다는 문제가 있다[17]. 광선 투사법은 화면의 각각의 픽셀에서 렌더링 대상을 향해 광선을 발사한다. 발사된 광선은 진행되는 동안 일정 거리마다 샘플링을 수행하게 된다. 얻어진 샘플링 결과를 누적시켜서 광선이 발사되었던 픽셀의 최종 색상을 결정하게 된다[18]. 이 때, 포톤맵과 같은 전역 조명 처리 기법에서는 샘플링 되는 각각의 지점에서 포톤 분포를 참고하여 해당 지점의 밝기를 결정한다. 각 재질에 따라 광선이 투과되는 정도가 다르기 때문에, 샘플링을 수행하기 이전에 먼저 물체의 특성을 정의하여 사용한다. 발사된 광선은 물성에 따라 투과되는 정도가 다르다. 투과되는 정도는 불투명도 전이함수(opacity transfer function)을 통해 얻을 수 있다. 이 투명도를 이용하여 광선이 진행되는 과정에서 불투명한 만큼 광선의 세기를 약하게 하고, 투과된 광선의 세기가 임계값 이하로 되면 광선 투사법을 종료시킴으로써 성능을 높여준다.

3. 산란자 템플릿

전역 조명을 계산하기 위한 방법들은 매우 오랜 시간이 걸리거나, 많은 양의 자원을 필요로 한다. 이러한 점들을 완화하면서 산란효과를 나타내기 위해서, 적은 양의 자원을 사용하는 산란광 템플릿의 구조와 생성과정에 대해 제안 한 후, 산란광 템플릿을 구성하는 광자들을 이용해 서로 다른 재질들에 대해서 산란효과와 음영효과를 계산하는 방법을 제안한다.

3.1 산란자 템플릿의 구조

전역 조명을 계산하기 위해서는 물체의 재질에 따른 반사율과 굴절률을 고려해야 한다. 인체는 다양한 물질들의 혼합물이며 CT나 MRI를 이용하면 각 물질들을 밀도에 따라 구분할 수 있다. 실제 피부는 매우 많은 종류의 물질로 이루어져 있지만, 대체로 비슷한 밀도를 가지므로 이들은 같은 물성을 가지는 것으로 간주할 수 있다. 하지만 피부와 뼈는 밀도 차이가 크기때문에 이들은 다른 재질로 분류해야 한다.

본 연구에서는 혼합물 내부에서 생기는 빛의 난반사 성질을 이용하여 산란자 템플릿을 생성한다. 템플릿 생성을 위해 빛 에너지를 정의하고, 정의된 빛 에너지의 외부 산란을 계산한다. 외부 산란은 굴절과 반사가 재귀적으로 일어나게 되는데, 산란이 일어나는 각 지점에서 산란된 빛 에너지들을 흡수하여 광자가 된다. 빛이 재귀적으로 산란되는 이 과정은 빛이 모두 광자로 흡수되어 소멸할 때까지 반복된다. 일반적으로 광량은 빛으로부터 거리에 반비례하고, 입사각에 따라 달라진다. 따라서 램버트의 코사인(lambert's cosine law)을 통해 광량을 결정한다. 이때 빛이 소멸하는 지점은 임계값을 통해 정할 수 있다. 처음 생성된 빛 에너지로는 거리와 투명도에 비례하여 빛이 소멸된다. 물체의 불투명도에 따라서 산란이 일어나는 횟수가 정해지게 된다. 처음의

빛 에너지로부터 굴절과 반사를 통해 각각의 굴절광과 반사광이 생성이 되고, 각 빛들이 광자로 저장 된 후, 다시 산란이 일어나게 된다.

템플릿을 구성하는 광자들은 3차원 좌표와 그 위치에서 흡수된 광량으로 표현된다. 템플릿의 중심 좌표는 (0.0, 0.0, 0.0)이며, 각각의 광자들은 이 중심 좌표를 기준으로 한 상대 좌표를 저장하게 된다. 빠른 접근 및 처리를 위해 광자는 광량의 순서대로 배열의 형태로 저장된다. 템플릿을 생성하면서, 이미 광자가 존재하는 지점에 빛 에너지가 들어오면, 빛이 들어온 지점에 해당하는 광자의 광량을 증가시켜 준다.

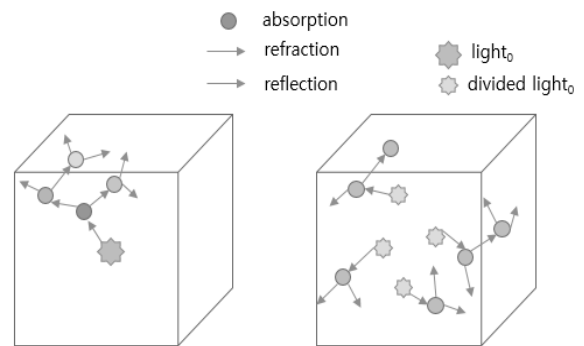


Fig. 1. Scattering Occurs in Template

Fig. 1은 템플릿이 생성되는 과정을 보여준다. 각 재질에 대해 생성되는 템플릿의 수를 적절히 조절해야 한다. 너무 적게 하면 기억공간은 절약이 되지만 결과 영상에서 노이즈가 발생할 수 있다. 또한, 템플릿을 이루는 광자들을 생성할 때 단 단일 광원만 사용하면, Fig. 1의 좌측 이미지처럼 산란에 의한 광자의 분포가 어느 한 곳에만 집중되는 문제가 발생할 수 있다. 이는 충분하지 않은 수의 광자들로 템플릿이 구성되기 때문에 발생한다. 따라서 이를 Fig. 1의 오른쪽 이미지와 같이 템플릿을 생성할 때, 각 재질에 대해 충분한 종류의 템플릿을 생성하고 이들을 생성할 때, 초기 빛 에너지를 나누어서 여러 개의 광원으로부터 생성되도록 함으로써 광자들의 분포를 고르게 한다.

3.2 템플릿 생성

인체와 같은 혼합물 데이터에서 산란을 계산하기 위해 범 위 방정식을 사용하였다. 빛의 이동거리 x , 빛의 광도 I 라 하고 볼륨 데이터가 가지는 밀도를 d 라고 할 때, 전이함수 T 를 통해 변환된 함수 값은 $T(d)$ 가 된다. 얻어진 $T(d)$ 는 재질에 따른 투명도를 결정하는 함수이다. 빛의 세기는 램버트의 모델을 따르므로 빛의 이동거리에 따른 광량의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dI}{dx} = -(1 - T(d)) \times I \quad (1)$$

처음에 주어지는 빛 에너지, Fig. 1의 $light_0$ 의 광도를 I_0 라 할 때, Δx 만큼 이동한 빛의 세기 I 는 다음과 같다.

$$I = I_0 \times e^{\left(-\frac{\Delta x}{\lambda}\right)} \times \cos \theta \quad (2)$$

이 값은 입사각 θ 에 따라 달라지며, λ 는 평균 자유 행로(mean free path)를 의미한다. 평균 자유 행로로 빛이 물질의 내부에서 충돌해가며 이동하는 평균 거리를 의미한다. 평균 자유 행로를 결정하기 위해서 광자들은 맥스웰 분포(Maxwell-boltzmann distribution)를 따른다고 가정한다. 평균 자유행로는 산란원의 밀도와 산란이 일어나는 유효면적의 곱으로 계산 가능하다. 이때, 광자간의 상호작용을 고려하기 때문에 2의 제곱근을 곱하여 평균 자유 행로를 구해준다. Δx 만큼 이동한 광자는 자신의 위치에서 흡수가 일어나게 된다. 3차원 좌표 x 에서 흡수된 광량 $A(x)$ 은 다음과 같다.

$$A(x) = (1 - T(d)) \times I \quad (3)$$

흡수된 빛을 제외한 나머지의 빛들은 x 에서 다시 산란이 일어나게 된다. 이때, 굴절에 의해 이동하기 위한 방향은 입계각도 이내에서 무작위로 결정되며 그에 따른 굴절된 광량 $Rf(x+\Delta x)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$Rf(x + \Delta x) = (1 - T(d)) \times I \times \cos \theta' \quad (4)$$

여기서 θ' 은 굴절된 각도이다. 산란에 의해 굴절뿐만 아니라 반사도 발생하게 된다. 이 때 반사되는 광량 $RI(x+\Delta x)$ 은 다음과 같다.

$$RI(x + \Delta x) = (1 - T(d)) \times I \times (1 - \cos \theta') \quad (5)$$

굴절, 반사된 각각의 광량 $Rf(x+\Delta x)$ 와 $RI(x+\Delta x)$ 에서 다시 Equation (3)~(5)를 재귀적으로 계산하여 광자를 생성한다. 이 계산은 빛 에너지가 완전히 없어졌다고 간주되는 임계점까지 반복된다. 이때, 산란을 통해 생성된 템플릿의 총 광량은 처음 정의된 빛 에너지와 오차 범위내에서 유지되어야 한다.

3.3 산란 표현

본 연구에서는 광선 투사법을 사용하여 볼륨 렌더링을 수행하였다. 관측 시점에서 발사된 광선이 처음 유효한 값이 존재하는 볼륨 데이터에 도달하게 되는 순간부터 템플릿을 이용해 렌더링을 수행한다. 하나의 템플릿은 광자의 위치와 광량에 대한 정보를 가지고 있다. 이를 참조하여 샘플링 되는 지점에서의 내부 산란을 통해 명암과 색상을 결정한다.

음영 표현을 위해서 물체와 광원과의 위치 관계를 고려해

야 한다. 샘플링 되는 위치에서 광원에 대한 벡터를 구하면 광원에 대한 방향과 거리를 알 수 있다. Fig. 2에서 광원에서 녹색 정육면체로 표현된 복셀까지의 거리와 템플릿을 구성하는 각 광자들로부터 광원까지의 거리를 계산하여 비교한다. 그 중에서 이 복셀보다 광원과 가까운 광자들을 구분한다. 이 광자들을 통해 일차적으로 복셀의 음영을 결정한다.

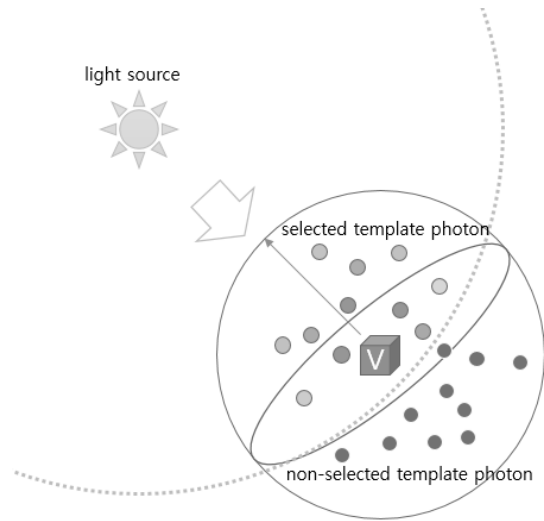


Fig. 2. Applying Scattering Method Using a Template in Accordance with the Position of the Light Source

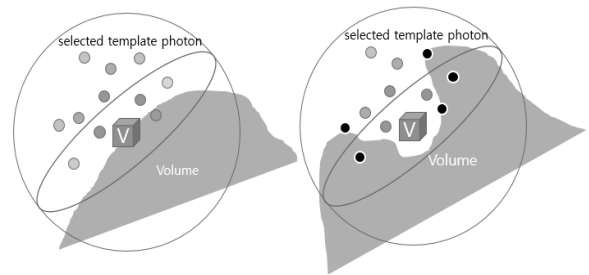


Fig. 3. Shading Using Template

Fig. 3은 볼륨 렌더링을 할 때의 물체의 형상에 따라 템플릿이 적용되는 모습이다. 녹색으로 표시된 볼륨 데이터에서 샘플링되는 중앙 복셀의 음영을 결정해야 하는데, 좌측은 광원 방향에 있다고 구분된 광자들이 어떠한 차폐물에도 가려지지 않는 경우이고, 우측은 일부 광자들이 주변 볼륨에 차폐되는 경우를 보여주고 있다. 복셀의 밝기는 내부 산란을 통해 결정되기 때문에, 광원 방향에 존재하는 광자들이 차폐되어 있다면 빛이 들어오지 못하는 상태라고 결정한다. 차폐된 광자들은 검정색으로 표시되어 있다. 차폐되지 않은 광자들의 광량에 비례하여 샘플링되는 복셀의 밝기가 증가한다.

템플릿은 물체의 내부에서 발생하는 빛의 산란을 가정하고 생성되었기 때문에, 예외적으로 손가락 사이, 또는 귀와 같이 얇은 부분에 적용하면 문제가 발생 할 수 있다. Fig. 4

에서 귀에 해당하는 볼륨데이터를 렌더링 할 때, 귀의 한 지점에서 음영을 결정하기 위해 템플릿의 광자들을 검사하게 된다. 이 때, 실제로는 광원에서 오는 빛이 머리에 가려지고 있지만 템플릿의 범위 내에 차폐물이 없는 것으로 판단하기 때문에 어둡게 표현되어야 할 귀가 밝게 표현 된다. 이러한 오류를 막기 위해 차폐되지 않은 광자들에 대해서는 복셀에서 광자의 방향으로 특정 배수만큼 거리를 검사하여 차폐물의 존재를 감안하여 음영처리를 해 준다.

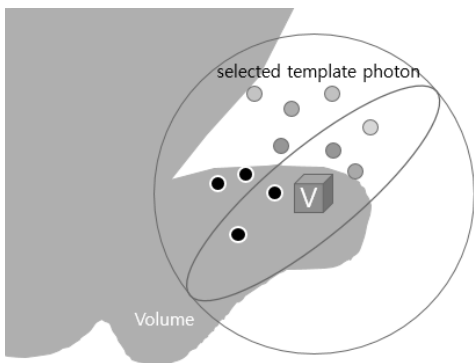


Fig. 4. Exceptional Case

샘플링되는 복셀의 색상을 결정하기 위해, 각 광자들의 위치에 동일하게 분류된 재질의 볼륨 데이터가 존재한다면, 광자의 광량과 광원의 색상을 통해 복셀의 색상을 결정한다. 샘플링된 복셀의 색상과 명암을 광선이 소멸할 때까지 누적시켜 화면상의 최종 색상을 결정하게 된다.

광선 투사법에 의해 진행되는 광선의 세기는 샘플링이 될 때마다 해당 재질의 불투명도에 따라 감소한다. 감소된 광선의 세기만큼 샘플링된 색은 최종 색상을 결정하는데 영향이 줄어든다. 이 성질을 이용해서 템플릿 내의 모든 광자들에 대해 산란을 계산하는 대신에 투사중인 광선의 세기와 광자가 가지고 있는 광량의 곱이 임계값보다 높은 광자들만을 참조한다. 그러면 임계값보다 낮아지는 시점부터는 결과 영상에 영향이 없다고 판단하여 그 뒤의 광자들에 대한 계산은 수행하지 않으므로 불필요한 연산을 줄일 수 있다.

3.4 다른 재질간의 경계 처리

빛이 한 매질에서 다른 매질로 이동 할 때, 매질간의 경계에서 굴절이나 반사가 일어나게 된다. 템플릿을 생성 할 때, 비슷한 밀도를 가진 재질 내에서는 혼합물이라도 산란의 형태가 유지된다. 하지만 전혀 다른 밀도를 가진 재질과의 경계에서는 굴절 일어나게 된다. 서로 다른 재질간의 경계에서 일어나는 빛의 굴절은 스넬의 법칙(Snell's law)에 따른다.

서로 다른 재질로 된 매질에서 굴절률이 n_1 과 n_2 해당 매질에서의 속도를 v_1 과 v_2 라 정의한다. 각 매질을 통과하여 이동하는 빛은 광속에 따라 휘게 되고, 그 휘는 각도는 평면에 대해 θ_{in} 과 θ_{out} 이라 한다. 이 인자들의 관계는 스넬의 법칙에 따라 다음과 같다.

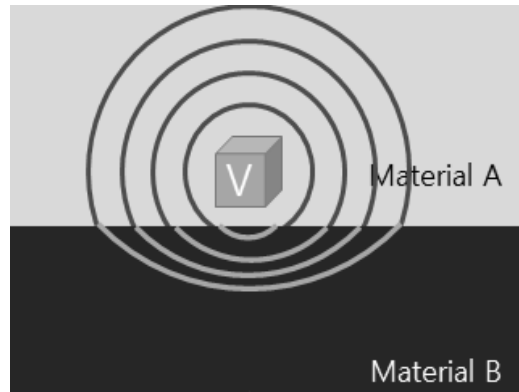


Fig. 5. The Waveform of Light Due to the Difference Material in Speed of Light

$$\frac{\sin \theta_{in}}{\sin \theta_{out}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$v_2 = \frac{v_1 \times n_1}{n_2} \quad (6)$$

서로 다른 매질 내에서 속도는 Equation (6)을 통해 구할 수 있다. 매질 내에서 속도 차이에 의해 빛의 분포는 Fig. 5와 같은 형태로 변하게 된다. A보다 B의 밀도가 더 높고, 그에 따라서 B내에서 빛의 속도는 감소하게 된다. 이 점을 이용하여 각 재질간의 경계에서 광자들의 분포를 변형시켜 내부 산란을 통한 결과를 계산한다. 각 광자에 접근하여 해당 광자의 위치가 중심 복셀과 같은 재질인지를 판단한다. 같은 재질이라면 기존의 방법을 통해 광량을 계산한다. 만약 광자가 존재하는 지점의 재질이 복셀과 다른 재질이라면 복셀과 광자 사이의 거리를 구한다. 이때 이동거리는 시간과 속도에 비례한다. 템플릿 크기 정도에서 빛의 속도에 대해 시간 차이는 의미가 없다. 따라서 템플릿 내에서 광자의 이동거리는 속도에 의해 결정된다. 이렇게 A에서의 광속과 B에서의 광속의 비율을 결정한다. 결정된 비율을 복셀과 광자의 거리와 방향 적용하여 광자위치를 변경하여 참조한다. 이 때, 광자의 광량은 두 재질 사이의 불투명한 비율에 비례해서 변경된다.

4. 실험 및 결과

실험은 Intel Core i5-5570 CPU, 메모리는 8GB, GPU는 2GB의 메모리를 탑재한 AMD Radeon HD7800을 사용하여 진행하였다. 렌더링 대상이 되는 인체 데이터는 실제 색상값을 가지고 있는 Visible Korean 데이터를 사용하였고, 뼈, 근육, 피부로 재질을 구분하였다. 재질에 대해 분류하여 각 재질별로 불투명도가 다르게 적용하여 렌더링을 수행하였다[19].

Table 1. Template Results(Alpha: 50%)

x	y	z	intensity
-0.01	0.02	-0.02	0.72760
0.00	0.04	-0.01	0.10492
0.01	0.06	0.00	0.04836
0.03	0.09	-0.03	0.02219
0.05	0.06	-0.06	0.01002
0.02	0.03	-0.03	0.00454
0.02	0.05	-0.06	0.00206
0.04	0.04	-0.08	0.00945

Table 2. Template Results Using 4 Light(Alpha: 50%)

x	y	z	intensity
0.01	-0.02	-0.03	0.18145
0.05	-0.01	-0.01	0.12455
-0.01	0.09	0.01	0.12500
-0.02	0.00	-0.24	0.12321
-0.02	0.02	-0.22	0.05762
-0.03	0.12	0.01	0.05719
0.02	0.03	0.02	0.05676
0.05	0.14	0.04	0.02634

Table 3. Template Results for Material

	x	y	z	intensity
material A n=0.3	0.25	-0.02	0.04	0.12291
	-0.01	-0.03	0.0	0.12241
	0.04	-0.19	-0.15	0.07501
	0.53	0.05	0.16	0.07500
	0.53	-0.02	0.16	0.48284
	0.05	-0.18	-0.14	0.48282
	0.05	-0.17	-0.16	0.03076
material B n=0.7	0.26	0.08	0.02	0.03060
	-0.03	0.00	-0.03	0.22145
	0.00	-0.02	0.05	0.17421
	-0.01	-0.01	0.09	0.17500
	0.05	0.01	-0.01	0.17120
	-0.02	-0.04	0.07	0.04829
	0.08	0.00	0.09	0.04805
-0.03	0.04	0.08	0.04728	
0.01	0.08	0.04	0.01339	

Table 1과 Table 2는 불투명한 재질의 물체에 대해 생성된 템플릿의 예를 보여준다. 산란의 방향을 보여주기 위해 각각 템플릿의 인자들 중 일부만 저장된 순서대로 가져왔다. Table 1은 단일 빛 에너지에 대해 산란된 광자들의 정보이다. 적은 수의 빛에 대해 템플릿을 생성하면 Table 1과 같이 광자들이 한 방향으로 쏠리는 현상이 발생할 수 있다. 초기 빛 에너지를 여러 개로 나누어 이 문제를 해결하였다. Table 2는 초기 빛에너지를 4개의 빛으로 분할하여 템플릿을 생성한 것이다. 그 결과 광자의 세기가 single에서는 처음 광자에 몰려있는 것을 볼 수 있지만, mix에서는 골고루 분산되는 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 불투명도 n에 따라 서로 다른 재질 A와 B에

적용된 템플릿을 보여준다. 투사된 광선을 따라 샘플링을 하는 도중 광자의 위치에 있는 재질과 샘플링 되는 지점의 재질이 다르다면 Equation (6)에 따라 해당 광자의 위치를 이동시켜 준다. 예를 들어 A에서 B로 이동한다면, 속도는 0.7286배 만큼 느려지게 된다. 따라서 샘플링 되는 지점으로부터 광자와의 거리를 0.7286배 만큼 이동시켜 계산해 준다.

생성된 광자들은 각 32bits의 데이터로 표현된다. 산란을 멈추는 임계값을 0.01이라 할 때, 불투명도 50%의 재질에 대해서 템플릿을 생성하면 56~63개 정도의 광자가 생성된다. 63개의 광자만 계산 하더라도 240bytes의 메모리를 사용하게 된다. 각 재질에 하나의 템플릿만을 사용하면 결과 영상에 노이즈가 생길 수 있기 때문에 이를 개선하기 위해 여러 개의 템플릿을 생성한다. 각 재질에 대해 8개의 템플릿을 생성하고, 4종류의 재질이 있다고 했을 때, 7.68KB의 메모리만을 사용한다. 즉, 더 많은 종류의 템플릿을 사용하더라도 메모리는 1MB이상 소모되지 않는다. 광선 샘플링을 종료하는 임계값이 0.02라 하자. 진행되는 광선 투사법을 통해 발사된 광선의 샘플링 비율이 물체 내부의 한 지점에서 0.2가 되었다고 가정 했을 때, Table 2의 5번째 광자의 세기인 0.05762는 광선의 세기인 0.2를 곱해서 0.011524가 된다. 이는 임계값 이하이므로 이 이상의 광자들은 샘플링을 통한 최종 색상에 주는 영향이 없다고 판단하여 그 뒤의 광자들은 참조하지 않는다. 따라서 광선 투사법이 진행될수록 계산되는 광자의 수가 줄어들고, 그만큼 속도는 빨라지게 된다.



Fig. 6. The Result of Rendering
Left: Ray Casting Without Illumination,
Right: Our Method Using Scatterer Template

Fig. 6은 제안한 방법을 통해 얻은 이미지이다. 조명 표현 없이 광선 투사법을 통한 렌더링을 하면 42~56 fps가 나왔고, 제안한 기법을 통한 렌더링은 20~24 fps가 나왔다. 템플릿을 통해 빛의 산란을 표현하였고, 그로 인해 피부의 안쪽 색까지 바깥으로 비춰져 보이는 것을 확인할 수 있다.

우측의 첫 번째 그림에서 엄지와 같이 미세하게 분리된 부분에 대해서도 음영 효과를 처리할 수 있었다.

5. 결 론

여기서는 많은 자원을 사용하는 볼륨 렌더링에서 재질에 따른 전역 조명 표현을 위해 비교적 적은 자원을 사용하는 산란자 템플릿의 적용 방법에 대해 제안하였다. 높은 품질의 결과를 위해서는 전역 조명이 필수적이다. 기존의 전역 조명 표현 방법을 위해서는 오랜 시간의 전처리 시간이 필요하거나, 많은 자원을 사용해야 하거나, 연산에 많은 시간을 필요로 하였다. 비용과 자원의 소모를 감소시키고자 산란의 물리적 특성을 이용하여 재질에 따른 템플릿들을 생성하였다. 생성된 템플릿은 적은 자원만을 필요로 하였다. 또한 물성을 기준으로 생성되기 때문에 재질의 종류에 따라 템플릿의 개수는 늘어날 수 있지만, 볼륨 데이터의 크기와는 독립적으로 생성된다. 따라서 볼륨 데이터가 클수록 산란광 표현을 위한 자원이 소모량이 크게 감소된다. 기존의 광선 투사법에 본 연구에서 제안하는 방법을 통해 재질과 재질의 경계에 따른 산란을 효과적으로 표현할 수 있었다. 차후 이에 대해 필터를 적용함으로써 결과 영상의 품질을 더욱 높이고자 한다.

References

[1] Paul S. Calhoun et al., "Three-dimensional Volume Rendering of Spiral CT Data: Theory and Method 1," *Radiographics*, Vol.19, No.3, pp.745-764, 1999.

[2] J. Kronander et al., "Efficient visibility encoding for dynamic illumination in direct volume rendering," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.18, No.3, pp.447-462, 2012.

[3] M. Hadwiger et al., "GPU-accelerated deep shadow maps for direct volume rendering," *SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware: Proceedings of the 21st ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Graphics Hardware*, Vienna, Austria, Vol.3, No.4, pp.49-52, 2006.

[4] M. Bunnell, "GPU gems, Dynamic ambient occlusion and indirect lighting," Addison-Wesley Professional, Aug., 2007.

[5] J. Kruger and R. Westermann, "Acceleration techniques for GPU-based volume rendering," *Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003 (VIS'03)*, IEEE Computer Society, 2003.

[6] J. Díaz et al., "Real-time ambient occlusion and halos with summed area tables," *Computers & Graphics*, Vol.34, No.4, pp.337-350, 2010.

[7] T. Ropinski et al., "Interactive volume rendering with dynamic ambient occlusion and color bleeding," *Computer Graphics Forum*, Vol.27, Iss.2, pp.567-576, 2008.

[8] V. Šoltészová et al., "A multidirectional occlusion shading model for direct volume rendering," *Computer Graphics Forum*, Vol.29, Iss.3, pp.883-891, 2010.

[9] Yubo Zhang and Kwan-Liu Ma, "Fast global illumination for interactive volume visualization," *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, ACM, 2013.

[10] J. Danksin, and P. Hanrahan, "Fast algorithms for volume ray tracing," *Proceedings of the 1992 Workshop on Volume Visualization*, ACM, 1992.

[11] P. Gautron, C. Delalandre, and J.-E. Marvie, "Extinction transmittance maps," *SIGGRAPH Asia 2011 Sketches*, ACM, 2011.

[12] W. Jarosz, M. Zwicker, and H. W. Jensen, "The beam radiance estimate for volumetric photon mapping," *ACM SIGGRAPH 2008 Classes*, ACM, 2008.

[13] H. W. Jensen and P. H. Christensen, "Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps," *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 1998.

[14] D. Jönsson et al., "Historygrams: Enabling interactive global illumination in direct volume rendering using photon mapping," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.18, Iss.12, pp.2364-2371, 2012.

[15] T. Whitted, "An improved illumination model for shaded display," *ACM Siggraph 2005 Courses*, ACM, 2005.

[16] P. Lacroute, and M. Levoy, "Fast volume rendering using a shear-warp factorization of the viewing transformation," *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 1994.

[17] Y. Sato, et al., "Three-dimensional multi-scale line filter for segmentation and visualization of curvilinear structures in medical images," *Medical Image Analysis*, Vol.2, No.2, pp.143-168, 1998.

[18] R. Westermann, and B. Sevenich, "Accelerated volume ray-casting using texture mapping," *Proceedings of the Conference on Visualization'01*, IEEE Computer Society, 2001.

[19] Koo-Joo, Kwon and Byeong-Seok Shin, "Visualization of segmented color volume data using gpu," *Advances in Artificial Reality and Tele-Existence*, Springer Berlin Heidelberg, 1062-1069, 2006.



이 병 준

e-mail : 22151486@inha.edu
 2015년 인하대학교 컴퓨터정보공학과(학사)
 2015년~현 재 인하대학교
 컴퓨터정보공학과 석사과정
 관심분야 : global illumination, volume
 graphics, real-time rendering



권 구 주

e-mail : mysofs@hanafos.com
1999년 우석대학교 컴퓨터공학과(학사)
2001년 인하대학교 컴퓨터정보공학과(석사)
2007년 인하대학교 컴퓨터정보공학과(박사)
2012년~현 재 인하대학교
컴퓨터정보공학과 연구교수

관심분야 : Volume Graphics, Real-Time Rendering, Medical Image



신 병 석

e-mail : bsshin@inha.ac.kr
1990년 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)
1992년 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)
1997년 서울대학교 컴퓨터공학과(박사)
2000년~현 재 인하대학교
컴퓨터정보공학과 교수

관심분야 : Real-Time Rendering, Volume Graphics, Medical Image, HCI