

다광원 문제를 위한 광원 기여도 기반의 중요도 샘플링

김효원⁰¹ 기현우² 오경수¹

¹숭실대학교 미디어학부 ²SK 이노에이스

blueciel@ssu.ac.kr kih@innoace.com oks@ssu.ac.kr

Light Contribution Based Importance Sampling for the Many-Light Problem

Hyowon Kim⁰¹ Hyunwoo Ki² Kyoungsu Oh¹

¹Department of Media, Soongsil University ²SK Innoace

요 약

컴퓨터 그래픽스에서 많은 광원들을 포함하는 장면을 사실적으로 렌더링하기 위해서는, 많은 양의 조명 계산을 수행해야 한다. 다수의 광원들로부터 빠르게 조명 계산을 하기 위해 많이 사용되는 기법 중에 몬테 카를로(Monte Carlo) 기법이 있다. 본 논문은 이러한 몬테 카를로(Monte Carlo) 기법을 기반으로, 다수의 광원들을 효과적으로 샘플링 할 수 있는 새로운 중요도 샘플링 기법을 제안한다.

제안된 기법의 두 가지 핵심 아이디어는 첫째, 장면 내에 다수의 광원이 존재하여도 어떤 특정 지역에 많은 영향을 주는 광원은 일부인 경우가 많다는 점이고 두 번째는 공간 일관성(spatial coherence)이 낮거나 그림자 경계 지역에 위치한 픽셀들은 영향을 받는 주요 광원이 서로 다르다는 점이다. 제안된 기법은 이러한 관찰에 착안하여 특정 지역에 광원이 기여하는 정도를 평가하고 이에 비례하게 확률 밀도 함수(PDF: Probability Density Function)를 결정하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 이미지 공간상에서 픽셀들을 클러스터링(clustering)하고 클러스터 구조를 기반으로 대표 샘플을 선정한다. 선정된 대표 샘플들로부터 광원들의 기여도를 평가하고 이를 바탕으로 클러스터 단위의 확률 밀도 함수를 결정하여 최종 렌더링을 수행한다. 본 논문이 제안하는 샘플링 기법을 적용했을 때 전통적인 샘플링 방식과 비교하여 같은 샘플링 개수에서 노이즈(noise)가 적게 발생하는 좋은 화질을 얻을 수 있었다. 제안된 기법은 다수의 조명과 다양한 재질, 복잡한 가려짐이 존재하는 장면을 효과적으로 표현할 수 있다.

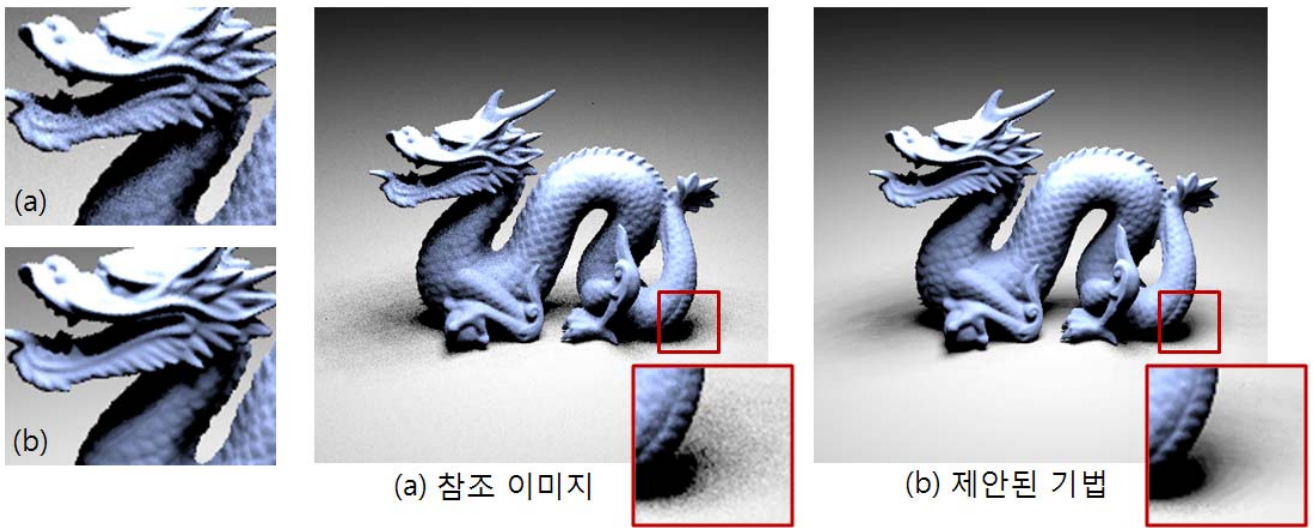
1. 서 론

컴퓨터 그래픽스 분야에서 실세계와 같이 많은 조명들로 구성된 장면을 렌더링하는 것은 매우 어려운 문제로 남아있다. 이전 연구에서 [1,2]는 모든 종류의 광원들을 많은 수의 점광원들로 변환하여 효과적인 근사가 가능하다는 것을 보여주었다. 하지만 이미지의 각 픽셀마다 수백, 수천 개의 광원들에 대해 직접 조명 계산을 수행하는 것은 여전히 많은 비용을 필요로 한다. 다수의 조명이 존재하는 장면에서 빠르게 직접 조명을 계산하기 위해 많이 사용되는 접근 방법 중에 하나는 몬테 카를로 기법이다. 이 기법은 광원들을 확률 밀도 함수에 따라 샘플링하여 적은 수의 광원으로 효과적인 조명 계산을 수행하고자 하는 방식이다. 이 기법을 사용하여 고품질의 결과를 빠르게 얻기 위해서는 확률 밀도 함수를 결정하는 문제가 중요하다. 조명 계산 결과에 영향을 많이 주는 중요한 광원이 보다 높은 확률로 샘플링 되도록 함수를 구성해야 적은 개수의 샘플로도 좋은 화질을 얻을 수 있기 때문이다.

기존의 많은 연구들이 보다 정확한 확률 밀도 함수를 근사하기 위해 여러 가지 샘플링 기법들을 소개 하였다.

대표적으로 BRDF를 이용한 샘플링 기법이 있으며 이러한 기법들은 반짝이는 재질의 물체를 표현하는데 매우 효과적이다[3]. 하지만 난반사에 가까운 재질과 복잡한 가려짐이 존재하는 장면에서 낮은 효율을 보인다. 광원의 밝기를 이용한 파워 샘플링 기법은 반대로 난반사 재질과 작지만 밝은 광원들을 효과적으로 처리할 수 있지만 반짝이는 재질의 표현에 비효율적이다[4]. 이러한 두 가지 샘플링 기법의 장단점을 보완하고자 BRDF와 광원의 밝기를 동시에 고려한 샘플링 기법들도 소개되었지만 이들은 복잡한 가려짐이 존재하는 장면에서 여전히 좋지 못한 결과를 보인다[5,6]. 또한 샘플링과 다른 접근 방식으로 수많은 광원들을 효과적으로 처리하기 위한 클러스터링 기법들도 제안되었다[2,7,8].

이러한 기존의 기법들은 공통적으로 장면 내의 가려짐을 무시하거나[2,5,6,11], 통계적인 수치로 가려짐을 예측하여[4,9] 샘플링을 수행한다. 가려짐은 조명 계산 결과의 분산에 가장 큰 영향을 미치는 조건이지만 계산량이 많고 예측이 어렵기 때문에 고려하기 힘들다. 하지만 최근 몇몇 연구들은 이러한 가려짐 조건에 의해 장면 내에 많은 광원들이 존재한다



[그림 1] 드래곤 모델 렌더링 결과. 영역 광원으로부터 변환된 100개의 방향성 있는 점광원을 포함하고 있는 장면이다. 참조 이미지 (a)는 전통적인 몬테 카를로 방식의 균일한 확률 분포 함수를 적용하여 광원을 샘플링한 결과이다. 본 논문에서 제안하고 있는 광원 기여도 기반 중요도 샘플링은 같은 샘플링 개수에서 노이즈가 적은 화질을 달성하였다.

할지라도, 일부의 광원만이 장면 전체 또는 장면 일부에 영향을 준다는 것을 보여주었다[8,10].

실제로 장면 안의 많은 조명들 중에서 실제로 특정 지역의 밝기에 기여하는 조명은 매우 일부인 경우가 많다. 본 논문은 이러한 관찰에 기반하여 각 픽셀 집합에 조명이 기여하는 정도를 이용한 새로운 중요도(importance) 샘플링 기법을 제안한다. 우리는 클러스터 단위로 적절한 샘플들을 선택하여 모든 조명들의 기여도를 측정하고, 이에 비례하게 확률 분포 함수를 구성하여 조명 계산을 수행한다. 우리는 광원의 기여도에 따라 샘플링 확률을 결정하며, 광원의 기여도는 BRDF와 조명의 밝기, 가려짐 조건까지 포함하고 있기 때문에, 이들의 일부만을 고려하는 기존의 기법들보다 효과적인 샘플링이 가능하다.

제안된 기법은 총 세 단계의 처리 과정을 거쳐 장면을 렌더링한다. 첫 번째 단계에서는 우선 장면의 기하 정보를 얻기 위해 법선 벡터를 저장한다. 이는 해당 지역의 기하학적 복잡도를 판단하는데 사용한다.

두 번째 단계에서는 이미지 공간상에서 픽셀들을 클러스터링 하고 클러스터의 대표 샘플로부터 광원들의 기여도를 평가한다. 우리는 기하 복잡도가 높거나 그림자의 경계가 위치하는 지역 내의 픽셀들은 서로 다른 광원의 영향을 받는 것을 관찰하였다. 따라서 제안된 기법은 공간 일관성과 가시성을 기준으로 클러스터링을 수행한다. 각 클러스터에서는 대표 샘플을 선택하여 모든 광원들과의 기여도를 평가한다.

세 번째 단계는 최종 렌더링을 수행한다. 클러스터의 대표 샘플로부터 평가한 광원들의 기여도와 비례하게 확률 밀도 함수를 결정하고 몬테 카를로 기법을

사용하여 밝기를 계산한다. 클러스터 내의 픽셀들은 장면 내의 광원들 중에서 영향을 받는 중요 광원들이 서로 유사하다. 따라서 클러스터의 대표 샘플로부터 얻은 확률 밀도 함수를 클러스터 내의 모든 픽셀들에게 적용하여도 좋은 화질의 샘플링 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서 제안하는 샘플링 기법은 전통적인 샘플링 방식에 비해 노이즈가 적게 발생하는 좋은 화질을 얻을 수 있었다. 제안된 기법은 다수의 광원을 포함하는 복잡한 형태의 장면을 효과적으로 표현할 수 있다.

2. 관련 연구

다광원 문제를 효과적으로 수행하고자 하는 많은 연구들이 소개되었다. [2,7]의 Lightcuts은 CPU기반 광선 추적을 바탕으로 다수의 광원들을 트리 구조로 클러스터링하고 에러율에 따라 트리의 레벨을 결정하여 렌더링하는 기법을 제안하였다. 또한 construction cut을 이용해 효과적으로 그림자 광선의 수를 줄이는 방법을 소개하였다. 이들의 construction cut은 공간 유사성을 사용하여 그림자 광선을 줄이는 기법으로 우리의 픽셀 클러스터링과 유사한 평가 과정을 사용한다.

[11]은 다수의 점광원들을 옥트리(octree)로 계층화하고 난반사와 정반사에 따라 서로 다른 클러스터링 알고리즘을 사용한다. 하지만 이들의 기법은 가려짐 조건을 무시하고 있으며 픽셀마다 옥트리의 계층 레벨이 다름에 따라 생기는 불연속면 아티팩트가 발생한다.

[8]은 다수의 광원과 다수의 픽셀들 간의 조명 계산

문제를 커다란 행렬 형태로 보고 GPU 기반 그림자맵을 사용하여 효과적으로 행과 열을 계산하는 방식을 제안하였다. 이들은 장면 내에 영향을 주는 중요한 광원들을 선택하여 클러스터링하는 방식을 사용하였다. 이를 위하여 랜덤하게 일부 픽셀을 선택하고 이 픽셀들로부터 모든 광원들의 기여도를 평가하였다. 본 논문의 기법은 마찬가지로 모든 광원들의 기여도를 평가하지만 랜덤한 샘플이 아닌 기하 정보와 가시성 기반으로 샘플을 선정한다. 랜덤한 샘플 선정과 전역 조명 트리 구조로 인해 [8]의 방법은 반짝이는 재질과 기하학적으로 복잡한 지역을 효과적으로 표현하지 못한다.

[4]은 직접 조명 계산을 위한 환경맵 샘플링 방식을 제안하였다. 이들은 기본적으로 파워 샘플링을 수행하지만 가려짐 조건의 분산을 분석하여 클러스터 영역의 크기를 고려하였다. 또한 최적화 단계에서 잠재적인 기여도에 따른 픽셀 단위의 샘플 정렬을 수행한다. [6]은 wavelet을 이용하여 BRDF와 환경맵의 곱을 효과적으로 샘플링하였다. 또한 균일한 샘플의 집합을 중요도에 따라 와핑(warping)하는 계층적인 방식도 제안하였다. 하지만 이들의 방식은 환경맵에서의 직접 조명만을 고려하고 있다.

[10]은 이미지를 8x8 픽셀 블록으로 분할하고 블록단위로 확률 밀도 함수를 결정하여 정확한 직접 조명을 계산하는 기법을 제안하였다. 이들은 픽셀 평가(estimate)를 통해 임계값 이하의 분산에 도달할 때까지 반복적으로 샘플을 추출하고 확률 밀도 함수를 갱신한다. 우리의 기법과 유사하게 지역단위의 확률 분포 함수를 결정하지만 이들의 8x8 픽셀 블록은 지역적으로 관련성이 없다. 안티 앨리어싱(anti-aliasing)을 위한 이들의 샘플 선택 방식은 재질과 기하 정보를 고려하고 있다.

3. 다광원 직접 조명 계산

컴퓨터 그래픽스에서 실사와 같은 이미지를 렌더링 하기 위해서는 장면 내에서 빛 에너지가 상호작용 하는 과정을 시뮬레이션 해야 한다. [12]는 이를 계산하기 위한 적분식을 제안하였고, 이를 직접 조명만을 고려한 계산식으로 근사하면 다음과 같다.

$$L(\bar{x}) = \int_S V(\bar{x}, \bar{y}) f_r(\bar{x}, \bar{y}) L_e(\bar{y}) G(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{y} \quad (1)$$

여기서 $L(\bar{x})$ 는 직접 조명에 의해서 임의의 지점 \bar{x} 로 부터 반사되어 카메라로 들어오는 밝기를 말한다. S 는 광원들의 집합이다. 한 광원의 위치를 \bar{y} 로 표현할 때, $V(\bar{x}, \bar{y})$ 는 \bar{x} 에서 \bar{y} 가 보이는지 여부를 나타낸다. 가려짐이 존재하여 보이지 않을 경우 0, 보이는 경우 1 의 값을 갖는다. $f_r(\bar{x}, \bar{y})$ 는 \bar{x} 지점의 BRDF 이다. 이

함수는 \bar{y} 방향에서 들어온 빛의 양이 \bar{x} 방향으로 얼마만큼 반사되는지를 나타낸다. $L_e(\bar{y})$ 는 광원 \bar{y} 에서 발산되는 빛 에너지의 양이다. $G(\bar{x}, \bar{y})$ 은 \bar{x} 와 \bar{y} 표면의 노멀의 각도와 두 지점의 거리에 따른 기하를 고려한다.

간단한 장면의 경우, (1)의 식을 정확하게 계산하여 결과를 얻을 수 있다. 하지만 광원의 개수와 복잡한 물체 등이 많아져 장면의 복잡도가 증가할수록 정확한 계산의 결과를 얻는데 드는 비용은 늘어나게 된다.

(1)의 식을 계산하기 위한 일반적인 접근 방법 중에 하나가 몬테 카를로 기법이다. 몬테 카를로 기법은 집합 S 중에서 N 개의 샘플 $\{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_N\}$ 를 확률 밀도 함수에 따라서 선택한다.

$$L(\bar{x}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V(\bar{x}, \bar{y}_i) f_r(\bar{x}, \bar{y}_i) L_e(\bar{y}_i) G(\bar{x}, \bar{y}_i)}{p(\bar{y}_i)} \quad (2)$$

(2)번 식의 결과는 샘플의 개수에 따라 노이즈가 발생한다. 고화질의 결과 이미지를 얻는데 필요한 샘플의 개수는 확률 밀도 함수 $p()$ 에 의존적이다. 가장 간단한 형태의 확률 밀도 함수는 모든 샘플이 균일한 확률을 갖는다.

노이즈를 감소시키기 위해서는 중요한 샘플이 높은 확률을 갖도록 확률 밀도 함수를 결정해야 한다. 이처럼 중요도를 기반으로 샘플을 선택하는 방식을 중요도 샘플링이라고 한다. 이는 몬테 카를로 기법에서 노이즈를 감소시키는 가장 대표적인 방법 중에 하나이다.

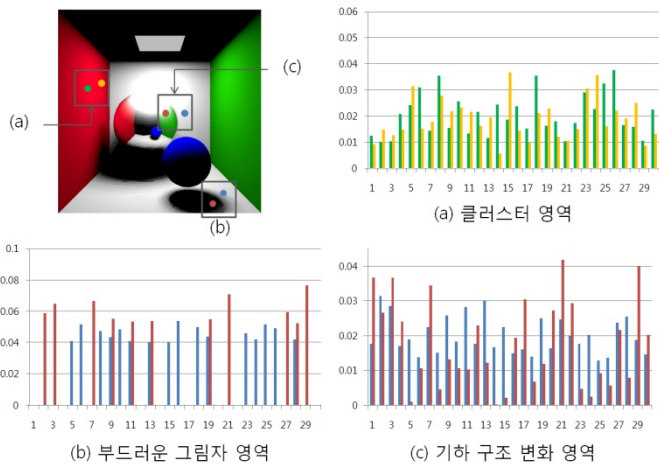
(2)번 식에서 이상적인 확률 밀도 함수는 광원의 밝기와 확률이 정확히 비례하는 경우이다. 즉, 보이지 않는 광원은 0의 확률을 가져야 한다. 임의의 지점에서 광원들의 이상적인 확률 밀도 함수는 다음과 같다.

$$p_{ideal}(\bar{y}_i) \propto V(\bar{x}, \bar{y}_i) f_r(\bar{x}, \bar{y}_i) L_e(\bar{y}_i) G(\bar{x}, \bar{y}_i) \quad (3)$$

이상적인 확률 밀도 함수는 (3)의 식과 같이 각 광원들이 해당 지점에 기여하는 밝기에 비례한다. 이는 광원으로부터 조명 계산을 수행해야 얻을 수 있으므로 결국 (1)의 식을 계산하는 것과 같다. 따라서 최대한 이상적인 함수에 가깝도록 확률 밀도 함수를 근사해야 한다. 근사한 확률 밀도 함수와 이상적인 확률 밀도 함수 사이의 차이가 클 수록 결과 값의 분산이 커지게 되고 노이즈가 발생하게 된다.

4. 광원 기여도 기반의 중요도 샘플링

본 논문의 광원 기여도 기반 중요도 샘플링은 광원이 특정 지역의 밝기에 얼마만큼 기여하는가를 기준으로 광원을 샘플링한다. 이는 장면 안의 다수의 조명들 중에서 실제로 특정 지역의 밝기에 기여하는 조명은 일부라는 사실에 착안한다.



[그림 2] 이미지 공간 상에서 영역별 광원의 기여도 분포. (a)와 같이 공간 일관성이 높고 그림자가 존재하지 않는 영역은 영향을 받는 광원이 서로 유사하다. (b)의 경우는 가시성에 의한 차이, (c)의 경우는 위치나 법선 벡터에 의한 차이로 인접한 픽셀들 간에도 광원의 기여도가 크게 다르다. (가로: 광원 인덱스, 세로: 광원 기여도)

우리는 광원의 기여도를 평가하기 위해 일부 샘플들을 선정하여 해당 샘플의 밝기에 각 광원들이 얼마만큼의 영향을 주고 있는지 계산한다. 이때 어떤 위치의 샘플들을 얼마만큼 선택해야 하는지가 중요한 문제가 된다. 가장 단순한 방법은 균일하게 공간을 분할하여 샘플을 선택하는 것이다. 하지만 이러한 방식은 복잡한 기하 구조와 그림자를 제대로 표현하지 못한다[8].

이러한 문제를 해결하기 위하여 우리는 이미지 공간 상에서 픽셀을 클러스터링하고 클러스터를 기반으로 샘플을 선택하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 인접한 픽셀이라 할 지라도 법선 벡터의 방향이 다른 곳은 서로 다른 광원의 영향을 받게 된다. 또한 기하 형태가 유사한 지역이라 할 지라도 다른 물체에 의해 그림자가 생길 경우 광원의 기여도가 크게 변화한다. 이러한 관찰에 기반하여 우리는 기하 복잡도와 가시성을 기준으로 클러스터링을 수행한다.

픽셀 클러스터링이 완료된 후 클러스터의 중앙에서 대표 샘플을 선택한다. 대표 샘플들은 모든 광원들과의 조명 계산을 수행하여 각 광원들의 기여도를 평가한다. 우리의 기법은 기존의 수동으로 샘플의 개수를 선택하는 방식[8]과 달리 장면의 복잡도에 따라 클러스터의 수와 크기가 자동으로 적합하게 결정된다.

최종 렌더링 단계에서는 클러스터의 대표 샘플로부터 평가한 광원들의 기여도와 비례하게 확률 밀도 함수를 결정하고 몬테 카를로 기법의 조명 계산을 수행한다. 클러스터 내의 모든 픽셀들은 같은 확률 밀도 함수를 적용하여도 노이즈가 적은 샘플링 결과를 얻을 수 있다.

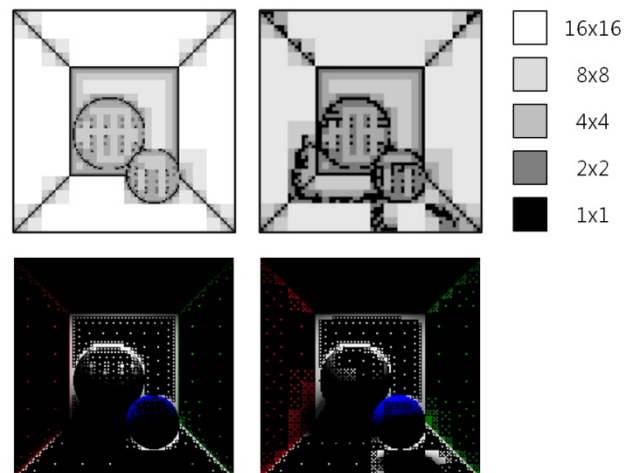
4.1. 픽셀 클러스터링

우리는 렌더링 할 이미지의 크기를 32x32 사이즈의 블록들로 나눈다. 32x32 이상의 영역은 픽셀들 간의 거리의 차이로 인해 클러스터링 될 수 없기 때문이다. 최초의 32x32 블록들로부터 각각 쿼드 트리(quad tree) 구조의 클러스터링을 수행한다.

우선 현재 구역의 네 군데 모서리 픽셀들의 값을 비교한다. 첫 번째 단계에서 얻은 법선 벡터 값을 이용하여 네 군데 픽셀의 차이가 지정된 임계값보다 크다고 판단되면 해당 구역은 네 개의 작은 클러스터로 분할한다. 클러스터 분할은 최대 깊이에 다다르거나 공간 일관성이 높아 법선 벡터의 차이가 크지 않은 범위에 다다르면 중단된다.

법선 벡터 기준의 분할이 끝난 후에 리프 노드에 해당하는 각 클러스터에서 대표 샘플을 결정한다. 대표 샘플은 클러스터의 중앙 위치에서 선택한다. 선택된 대표 샘플에서 모든 광원들과의 조명 계산을 통해 각 광원들의 기여도를 저장한다. 광원에 대한 1차적인 평가가 끝난 후, 가시성을 고려한 분할이 이루어진다. 아직 최대 깊이에 다다르지 않은 클러스터에서 대표 샘플이 일정 이하의 가시성을 기록하였다면, 해당 클러스터는 그림자 영역 안에 있는 것으로 판단할 수 있다. 그림자 영역의 클러스터는 이전과 마찬가지로 네 개의 자식 클러스터로 분할한다. 그리고 네 개의 자식 클러스터에서 대표 샘플을 뽑고 각각 광원들의 기여도를 평가한다.

만약 네 개의 자식 클러스터의 대표 샘플이 전부 일정 이하의 가시성을 기록하였다면 해당 클러스터는 딱딱한 그림자 영역 안에 존재한다. 딱딱한 그림자 영역의 클러스터는 더 이상 분할하지 않는다. 반면에 네 개의 자식 클러스터가 각기 다른 가시성 분포를 보이면



[그림 3] 픽셀 클러스터링 결과와 대표 샘플에서의 광원 기여도 평가. 왼쪽은 기하 복잡도만을 고려한 클러스터링 결과이고 오른쪽은 가시성 검사를 수행한 클러스터링 결과이다.

해당 클러스터는 부드러운 그림자 영역에 존재한다. 부드러운 그림자 영역은 인접한 픽셀들 간에도 광원의 가시성에 따라 밝기의 변화가 크다. 따라서 부드러운 그림자 영역의 클러스터는 더 작은 영역으로 분할하여 광원의 기여도를 평가한다.

최종적으로 가시성을 고려한 클러스터 분할이 끝난 후에는 모서리와 같이 기하 정보가 복잡한 지역과 그림자의 경계 영역에 많은 대표 샘플들을 얻게 된다. 반면에 그림자가 존재하지 않는 평평한 영역은 많은 픽셀을 포함하는 넓은 클러스터가 위치하게 된다.

4.2. 확률 밀도 함수 결정

제안된 기법은 광원의 기여도에 비례하게 확률 밀도 함수를 결정한다. 여기서 광원의 기여도는 각 광원들이 특정 샘플의 밝기에 얼마큼 영향을 주었는지를 평가한 값이다. 우리는 이를 위해 각 광원들과 대표 샘플들 간의 조명 계산을 수행하였다.

어떤 샘플 $\vec{\alpha}$ 에 대한 광원 \vec{y} 의 기여도 $C(\vec{\alpha}, \vec{y})$ 는 다음과 같다.

$$C(\vec{\alpha}, \vec{y}) = V(\vec{\alpha}, \vec{y}) f_r(\vec{\alpha}, \vec{y}) L_e(\vec{y}) G(\vec{\alpha}, \vec{y}) \quad (4)$$

이미지 내의 모든 클러스터들의 집합 R 에서 샘플 $\vec{\alpha}$ 을 포함하는 클러스터가 r_i 라고 할 때, 클러스터 r_i 에 대한 광원 \vec{y} 의 기여도는 (5)로부터 근사할 수 있다.

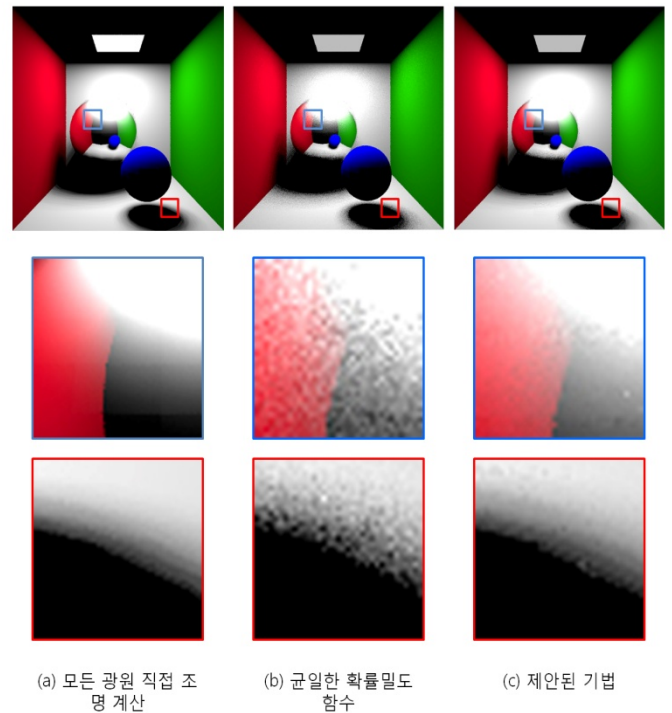
$$C(r_i, \vec{y}) \approx V(\vec{\alpha}, \vec{y}) f_r(\vec{\alpha}, \vec{y}) L_e(\vec{y}) G(\vec{\alpha}, \vec{y}) \quad (5)$$

클러스터 내의 모든 픽셀들은 광원들의 기여도가 서로 유사하다. 따라서 대표 샘플 $\vec{\alpha}$ 로 부터 평가한 광원 기여도는 해당 클러스터에 대한 광원 기여도로 볼 수 있다. 우리는 클러스터 r_i 에서의 광원의 확률 밀도 함수를 다음과 같이 광원의 기여도에 비례하게 결정한다.

$$p_{r_i}(\vec{y}) \propto C(r_i, \vec{y}) \quad (6)$$

[표 1] 렌더링 시간 비교

장면	렌더링 시간(초)		
	모든 광원들과 직접조명계산	균일한 확률밀도함수 사용	제안된 기법
코넬 박스	2641.7	1161.3	1319.6
드래곤	3046.0	1203.7	1380.1



[그림 4] 코넬 박스 장면에서 세 가지 기법의 화질 비교

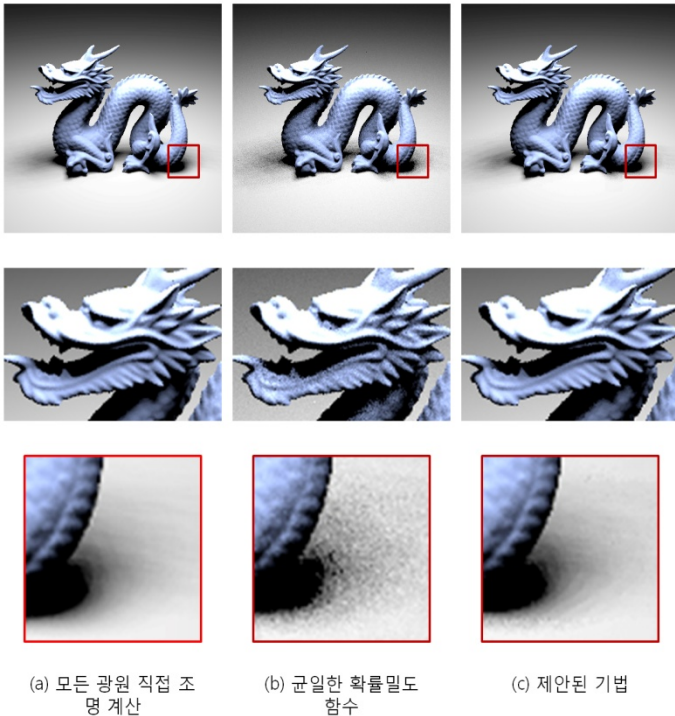
5. 결과

제안된 기법은 CPU 기반 광선 추적 엔진인 PBRT 를 기반으로 제작되었다[17]. 렌더링의 일부 과정은 GPU 를 통해 가속화가 가능하지만 현재 모든 과정은 CPU 를 통해 처리되고 있기 때문에 GPU 의 성능은 결과에 영향을 주지 않는다. 실험은 Pentium4 3.0 Ghz CPU 와 2 GB RAM 환경의 PC 에서 이루어졌다. 모든 이미지들은 512x512 해상도로 렌더링하였으며 안티 앨리어싱을 위해 픽셀 당 2 개의 샘플을 사용하였다.

그림 4 의 코넬 박스 장면은 영역 광원으로 부터 64 개의 점광원을 생성하였고, 그림 1 과 5 의 드래곤 모델 장면은 100 개의 점광원을 생성하였다. 그림 4 와 5 는 세 가지 기법의 화질 차이를 보여주고 있다. (a)의 이미지는 장면내의 모든 광원들과 직접 조명 계산을 수행하여 가장 정확한 결과값을 보여준다. (b)는 장면내의 모든 광원들에 균일한 확률을 적용하여 샘플링 한 결과이다. (c)는 본 논문이 제안하는 기법을 수행하여 렌더링한 결과 이미지이다. 화질 비교를 통해 제안된 기법이 균일한 확률밀도함수를 사용하는 전통적인 몬테 카를로 기법보다 적은 노이즈를 발생시키고 정답에 가까운 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

장면 내의 모든 광원들과 직접 조명 계산을 수행한 경우 코넬 박스 장면은 2641.7 초, 드래곤 모델 장면은 3046.0 초가 소요되었다. 본 논문의 기법은 코넬 박스 장면에서 1319.6 초, 드래곤 모델 장면에서 1380.1 초의 렌더링 시간을 달성하였다.

균일한 확률밀도함수를 사용한 렌더링은 제안된 기법과 같은 개수의 광원을 샘플링 하였기 때문에 비슷한 렌더링 시간이 소요되었다. 단, 픽셀 클러스터링 연산 시간, 클러스터 단위의 광원 기여도 평가 시간, 클러스터 단위의 확률밀도함수 구성 시간이 소요되지 않기 때문에 약간 빠른 렌더링 시간을 기록하였다.



[그림 5] 드래곤 모델 장면에서 세 가지 기법의 화질 비교

6. 결론

본 논문은 다수의 광원이 존재하는 장면에서 효과적으로 광원을 샘플링하는 새로운 중요도 샘플링 기법을 제안하였다. 우리의 기법은 전통적인 몬테 카를로 샘플링 방식과 비교하여 같은 샘플 개수에서 노이즈가 적은 좋은 화질을 제공한다. 우리의 기법은 복잡한 가려짐이 존재하는 장면에서 부드러운 그림자를 효과적으로 표현할 수 있다. 우리는 제안된 기법이 광선 추적 기반의 렌더링 시스템에서 다양한 종류의 다광원을 포함한 장면들의 화질을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

[1] Keller, A. Instant radiosity. In Proceedings of SIGGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 49–56. 1997.
 [2] Walter, B., FERNANDEZ, S., ARBREE, A., BALA, K., DONIKIAN, M., AND GREENBERG, D. P. Lightcuts: a scalable

approach to illumination. ACM Transactions on Graphics 24, 3 (Aug.), 1098–1107. 2005.
 [3] Lawrence, J., Rusinkiewicz, S., and Ramamoorthi, R. Efficient BRDF Importance Sampling using a Factored Representation. ACM Transactions on Graphics 23, 3, 496–505. 2004.
 [4] Agarwal, S., Ramamoorthi, R., Belongie, S., and Jensen, H. W. Structured Importance Sampling of Environment Maps. ACM Transactions on Graphics 22, 3, 605–612. 2003.
 [5] Veach, E., and Guibas, L. J. Optimally Combining Sampling Techniques for Monte Carlo Rendering. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 95, 419–428. 1995.
 [6] Clarberg, P., Jarosz, W., Akenine-Möller, T., and Jensen, H. W. Wavelet importance sampling: efficiently evaluating products of complex functions. ACM Trans. Graph. 24, 3 (Jul. 2005), 1166–1175. 2005.
 [7] WALTER, B., ARBREE, A., BALA, K., AND GREENBERG, D. P. Multidimensional lightcuts. ACM Transactions on Graphics 25, 3 (July), 1081–1088. 2006.
 [8] Hašan, M., Pellacini, F., and Bala, K. Matrix row-column sampling for the many-light problem. ACM Trans. Graph. 26, 3 (Jul.), 26. 2007.
 [9] WARD, G. Adaptive shadow testing for ray tracing. In Proceedings of the Second Eurographics Workshop on Rendering, 11–20. 1994.
 [10] Donikian, M., Walter, B., and Fernandez, S. Accurate Direct Illumination Using Iterative Adaptive Sampling. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 12, 3 (May. 2006), 353–364. 2006.
 [11] Eric Paquette, Pierre Poulin, George Drettakis, A Light Hierarchy for Fast Rendering of Scenes with Many Lights. Computer Graphics Forum 17 (3) , 63–74, 1998
 [12] Kajiya, J. T. The Rendering Equation. In Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 86), 143–150. 1986.
 [13] Kollig, T., and Keller, A. Efficient Illumination by High Dynamic Range Images. In Eurographics Symposium on Rendering, 45–50. 2003.
 [14] DACHSBACHER, C., AND STAMMINGER, M. Splatting of indirect illumination. In 2006 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. 2006.
 [15] HAŠAN, M., PELLACINI, F., AND BALA, K. Direct-to-indirect transfer for cinematic relighting. ACM Transactions on Graphics 25, 3 (July), 1089–1097. 2006.
 [16] Dutré, P., Bekaert, P., and Bala, K. Advanced Global Illumination. A K Peters. 2003
 [17] Matt Pharr, Greg Humphreys, Physically Based Rendering. Morgan Kaufmann. 2004.