
프로그래밍 가능한 그래픽스 하드웨어를 사용한 고품질 전역 조명 생성

High-Quality Global Illumination Production Using Programmable Graphics Hardware

차득현, Deukhyun Cha*, 장병준, Byungjoon Chang**, 임인성, Insung Ihm***

요약 최근 컴퓨터 그래픽스 분야에서 3차원 렌더링은 영화 제작, 광고, 인테리어 시뮬레이션, 의료 영상 등 많은 분야에서 중요하게 사용되고 있으며 기술의 발달로 인해 그 사실성이 매우 높아지고 있다. 또한 렌더링 기술의 발달과 하드웨어의 비약적인 발전에 의해 실시간 게임 등에도 물리 기반 3차원 렌더링 기법들이 응용되어 사실성을 더해 가고 있다. 그러나 영화 제작 등에 사용될 수 있는 정도의 고품질 영상을 생성하기 위해 아직 적지 않은 시간을 필요로 하는 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 가상의 3차원 공간에 만들어진 복잡한 장면에 대하여 고품질 영상의 매우 중요한 요소 중의 하나인 물리 기반 전역 조명을 빠른 시간 안에 사실적으로 생성할 수 있는 렌더링 기법을 제안한다. 특정 제약 속에서 빠른 계산을 가능하게 하는 프로그래밍 가능한 그래픽스 하드웨어를 사용하여 물리 기반 전역 조명 알고리즘을 가속하고 포톤 매핑 기법을 적용한 광선 추적법 기반에서 효과적으로 동작할 수 있도록 렌더링 시스템의 구조를 최적화 하였다.

Abstract 3D rendering is a critical process for a movie production, advertisement, interior simulation, medical and many other fields. Recently, several effective rendering methods have been developed for the photo-realistic image generation. With a rapid performance enhancement of graphics hardware, physically based 3D rendering algorithm can now often be approximated in real-time games. However, the high quality of global illumination, required for the image generation in the 3D animation production community is a still very expensive process. In this paper, we propose a new rendering method to create photo-realistic global illumination effect efficiently by harnessing the high power of the recent GPUs. Final gathering routines in our global illumination module are accelerated by programmable graphics hardware. We also simulate physically based light transport on a ray tracing based rendering algorithm with photon mapping effectively.

핵심어: *Global illumination, Final gathering, Programmable graphics hardware, Photon mapping, Complex scene*

*주저자 : 서강대학교 컴퓨터공학과

**공동저자 : 서강대학교 컴퓨터공학과

***교신저자 : 서강대학교 컴퓨터공학과 정교수; e-mail: ihm@sogang.ac.kr

1. 서론

가상의 3차원 공간에서 만들어진 장면에 대하여 사실적인 영상을 생성하여 사용하는 일은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 전통적으로 연구되어온 주제이지만, 최근 고품질 영상에 대한 요구가 더욱 커지고 있다. 이로 인해 사실적인 고품질 영상을 빠른 시간 안에 생성하기 위한 많은 연구들이 진행되었다[1-5].

최근 프로덕션에서 사용 가능한 품질의 전역 조명(global illumination) 효과를 생성하기 위해서 널리 사용되고 있는 방법은 최종 수집(final gathering) 방법이다. 이는 물체의 성질에 따라 사방에서 혹은 특정 방향에서 집중적으로 들어오는 빛의 정보를 얻기 위하여 필요한 방향으로 다시 한번 광선들을 추적하는 방법을 말한다. 깊이 1 까지만 수행되는 경로 추적(path tracing) 방법이라고도 할 수 있는데 포톤 매핑(photon mapping) 등의 기법과 함께 매우 효율적으로 고품질의 전역 조명을 생성하는 것이 가능하다. 널리 사용되고 있는 상용 렌더링 소프트웨어(RenderMan, mental ray, V-Ray 등)들에서도 대부분 최종 수집 방법 혹은 이와 유사한 방법을 사용하여 전역 조명을 생성하는 기능을 제공하고 있다.

기존 연구들에 의한 훌륭한 결과에도 불구하고 렌더링 시간의 한계로 인해 근사적인 방법을 사용하여 알고리즘을 가속하는 방법들을 사용하였기 때문에 장면의 복잡도나 그 밖의 여러 렌더링 환경에 따른 제약들을 가지고 있었다. 본 논문에서 제안하는 렌더링 시스템은 고품질의 전역 조명 효과를 보다 빠른 시간에 극대화 하는데 목표를 가지고 있으며 단순한 3차원 장면이 아닌 실제 영화나 3차원 애니메이션에서 사용되는 정도의 복잡도를 가지는 장면을 대상으로 한다. 또한 물리 기반 영상 생성 개념을 최대한 근사화 하지 않고 프로그래밍 가능한 그래픽스 하드웨어를 사용하여 가속함으로써 장면의 기하적 특성 등에서 발생할 수 있는 제약을 최소화 하였다.

본 논문은 2장에서 렌더링 시스템의 개관을 설명하고 3장에서는 본 논문에서 제안하는 전역 조명 가속 모듈을 설명하며 4장에서 실험 결과를 보이고 끝으로 5장에서 결론을 맺도록 한다.

2. 렌더링 시스템 개관

본 논문에서 제안하는 렌더링 시스템은 최적화된 고품질의 전역 조명 모듈을 구현하고 있으며, 이는 카메라에서 보이는 물체들을 결정하는 가시성 검사 모듈과는 독립적으로 수행 가능함으로 기존의 다양한 가시성 검사 알고리즘과 함께 사용될 수 있다. 그 중 전통적으로 널리 사용되고 있는 광선 추적 기법을 사용하여 렌더링 시스템을 구축하고 제안

된 전역 조명 모듈의 효율성을 보이고자 하였다.

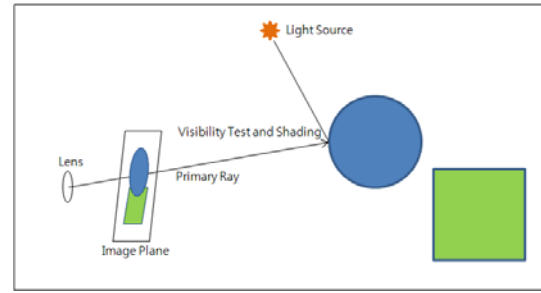


그림 1. 광선 추적 기반 렌더링 알고리즘

2.1 광선 추적 기반 가시성 검사

광선 추적법은 카메라로부터 광선을 추적하여 필름에 맺히는 색을 계산하는 이미지 공간 기반 방법으로서 전역 조명을 표현하는 가장 기본적인 방법으로 널리 사용되고 있다. 카메라 렌즈와 필름의 각 영역에 대하여 추적할 광선을 생성하고, 이렇게 생성된 광선과 3차원 공간에 놓인 물체들과의 교점을 계산하여 해당 필름 영역에서 보이는 지역을 찾아내는 가시화 검사를 수행한다. 가시화 검사를 통해 얻어낸 가시 지역의 기하 정보와 광원이나 전체 장면에 포함된 물체들의 기하 정보를 사용하여 가시 지역에서 해당 필름 영역으로 들어오는 빛의 정보를 계산하고 저장하게 된다(그림 1).

2.2 전역 조명 모듈

3차원 공간상에서 복잡한 경로를 거쳐 카메라로 들어오는 빛을 사실적으로 계산하기 위해서는 식 (1)의 렌더링 방정식을 계산해야 한다. 광원에서 직접 들어오는 빛의 정보와 주변 환경을 통해 간접적으로 들어오는 빛의 정보를 계산하는 부분으로 이루어져 있다. 광원에서 직접 들어오는 빛의 정보는 비교적 단순한 색깔 계산 방법들을 통해 빠르게 계산할 수 있지만 사방에서 간접적으로 들어오는 빛의 정보를 계산하는 일은 매우 어려운 일이다. 그러나 사람의 눈이 부드럽게 변하는 간접 조명 효과에 더 민감하게 반응하기 때문에 이 부분의 계산이 영상의 품질을 좌우 한다고 할 수 있다.

서론에서 언급한 바와 같이 본 논문에서 제안하는 전역 조명 모듈은 최근 고품질의 영상을 위해 널리 사용되고 있는 포톤 매핑 기반 최종 수집 방법을 GPU를 사용하여 가속화 할 수 있는 기법을 사용하여 간접 조명 효과를 빠르게 계산하도록 하였다.

$$L(x, \vec{w}) = L_e(x, \vec{w}) + \int_{\Omega} f_r(x, \vec{w}, \vec{w}') L_i(x, \vec{w}') (\vec{w} \cdot \vec{n}) d\vec{w}' \quad (1)$$

포톤 매핑 기법은 확률적인 방법을 사용하여 각 광원으로 부터 빛의 경로를 추적하여 빛이 물체와 상호작용 하는 정보를 3차원 공간상에 저장하고 잘 근사화된 광휘 정보로 사용하는 것이다. 그러나 이 기법은 복잡한 빛의 경로를 저장 하는데 저장 공간 및 계산시간으로 인한 한계가 있어 오차를 발생하게 되는데, 최종 수집 방법을 사용하여 색깔 계산이 필요한 지점에서 물체의 특성에 따른 빛의 예상 경로를 다시 한 단계 추적함으로써 오차가 제거된 고품질 영상을 얻을 수 있다. 그러나 최종 수집 방법 역시 매우 많은 시간을 필요로 하는 방법이므로 이를 가속화 하는 것이 중요하다. 본 논문에서 제안하는 렌더링 시스템의 구조는 다음과 같다(그림 2).

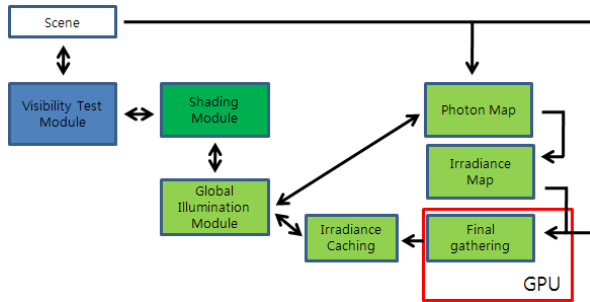


그림 2. 렌더링 시스템 개관. 가시성 검사 모듈에서 결정된 가시 지점의 정보를 입력으로 받아 셰이딩 모듈과 전역 조영 모듈을 통해 직접 조영을 포함한 전역 조영 계산이 수행된다. 전역 조영 모듈에는 포톤 매핑 모듈, 광휘 맵 모듈, GPU에 의해 가속되는 최종 수집 모듈과 광휘 캐시 모듈을 포함한다.

3. 전역 조영 가속 모듈

본 논문에서는 GPU를 사용하여 최종 수집 방법을 가속화 하여 기존의 CPU에서 수행하던 방법과 비교해서 매우 향상된 속도로 고품질 전역 조영 효과를 얻을 수 있도록 하였다. 또한 이 가속 모듈은 한번의 최종 수집을 수행하는데 독립적으로 설계 되어 있으므로 포톤 매핑과 같은 추가적인 전역 조영 모듈이나 광휘 캐시와 같은 추가적인 가속화 모듈 과도 효과적으로 연동 가능하다.

GPU를 사용한 가속화 모듈을 최적화 할 수 있는 새로운 자료 구조들도 제안 한다. 1차적으로 생성된 성긴 광휘 정보를 GPU로 효과적으로 흘려보내기 위해 광휘 저장 자료구조인 광휘 맵을 정의하여 사용하였으며 기존의 광휘 캐시 방법을 발전시킨 적응적 광휘 캐시 기법을 고안 하였다. 광휘 맵을 통해 GPU가 최종 수집을 위해 처리해야할 물체들의 양을 최적화 할 수 있으며 적응적 광휘 캐시 방법을 통해

전체 장면 중 최종 수집 계산을 수행해야 할 지점 역시 최적화 할 수 있게 된다.

본 논문에서 전역 조영 모듈의 성능을 실험하기 위해 설계한 렌더링 시스템에서는 포톤 매핑 기법을 통하여 커스틱 및 간접 조명 효과에 대한 1차 정보를 표현하였다. 또한 반짝이는 물체에 대해서는 전통적인 광선 추적법을 사용하여 효과적으로 표현하는 방법을 사용하였으며, 계산 시간이 큰 비 광택 물체에 대해서 GPU로 가속한 최종 수집 방법을 사용하였다.

3.1 GPU를 통한 최종 수집

비 광택(non-specular) 물체는 특정 지점에 들어온 빛을 사방으로 동일하게 반사하는 성질이 있으므로 물체에 영향을 미치는 빛을 계산하기 위해서는, 역으로 물체 표면으로부터 사방으로 들어오는 빛을 추적하여야 한다. 그러므로 비 광택 물체에 대한 최종 수집 방법은 색깔 계산을 하고자 하는 지점에서 반구 방향으로 광선을 추적하여 포톤 맵으로부터 빛의 정보를 가져온다. 반구를 샘플링 한 많은 수의 광선과 물체의 교점을 계산하고 포톤 정보를 가져오는 과정에서 렌더링 시간이 급격하게 증가하게 되므로, 이를 가속화하기 위하여 각 지점에서 큐브 맵(cube-map)을 생성하고 샘플링된 반구 방향의 색을 큐브 맵을 참조하여 가져올 수 있다. 큐브 맵을 생성하고 참조하는 모든 과정을 GPU를 사용하여 구현함으로써 광선을 추적하는 것보다 매우 빠른 시간에 최종 수집을 수행할 수 있도록 하였다.

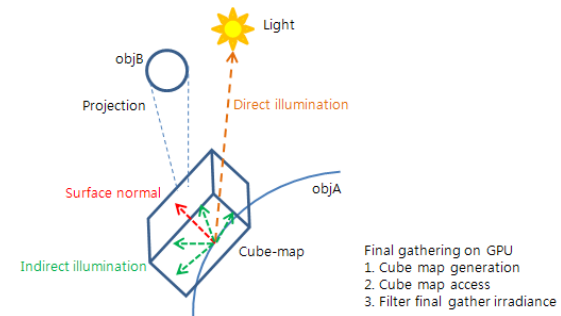


그림 3. 최종 수집 GPU 가속 알고리즘. 간접 조영을 위해 필요한 반구 방향 샘플링을 GPU의 최적화된 픽셀 셰이더를 사용하여 반 큐브 맵(hemi-cube map)으로 근사화 한 후 많은 개수의 최종 수집 광선을 효과적으로 샘플링 한다.

3.2 광휘 맵

GPU로 최종 수집을 수행하기 위해서는 1차 광휘 정보인 포톤 맵 정보를 포함한 물체들의 기하 정보를 GPU로 흘려

보내 주어야 한다. 이를 위해 광휘 맵(irradiance map)을 정의하고 포톤 맵 정보를 물체 정보와 함께 텍스처 형태로 GPU에서 사용할 수 있도록 하였다. 광휘 맵은 기하정보에 대해 독립적인 자료구조로서 포톤 정보에 대한 정확도를 효과적으로 유지할 수 있는 장점이 있어 단순화된 물체를 통한 속도 향상을 가능하게 한다. 또한 본 논문에서는 큰 복잡도를 가지는 장면에 대한 광휘 맵을 빠르게 생성하기 위하여 포톤 정보를 역으로 확산하는 방식을 취함으로써 성능을 개선 하였다. 물체의 복잡 도에 따라 GPU에서 효과적으로 계산 가능한 광휘 맵은 GPU가 제공하는 텍스처 메모리의 크기에 제한을 받는다. 그러나 최근 약 700 MB에서 1G를 웃도는 텍스처 메모리를 가지고 있는 그래픽스 하드웨어가 보급 되고 있는 상황에서 비교적 상당한 복잡도를 가지는 장면에 대해서도 제약 없이 사용 가능 하였다<표 1>.

표 1. 실제 애니메이션 제작에 사용되는 복잡도의 장면에 대하여 사용된 광휘 맵의 수와 필요한 텍스처 메모리, 사용된 광휘 맵은 모든 물체에 대해 동일하게 128x128 해상도를 할당 하였다. 현재 출시되는 그래픽스 하드웨어의 성능에 전혀 제한을 받지 않고 사용될 수 있는 메모리를 요구하고 있으며 고품질 전역 조명을 표현하는데 크게 무리가 없음을 확인 할 수 있다.

실험 장면	삼각형 개수	광휘 맵 개수	텍스처 메모리(MB)
가필드 장면 I	400,489	270	50,625
가필드 장면 II	352,702	150	28,125

3.3 광휘 캐시

최종 수집에 의해 계산되는 비 광택 물체에 대한 간접 광원 효과는 매우 부드럽게 변하는 정보이므로 상당한 부분에 대해서 기존에 계산된 정보를 재사용하여 보간(interpolation) 된 색 정보를 계산하는 것이 가능할 수 있다. 기존의 광휘 캐시(irradiance cache) 방법은 앞에서 계산된 최종 수집 지점들의 기하 정보와 현재 계산하고자 하는 지점의 기하 정보를 통해 간접 광원 효과의 변화 정도를 예측하여 재사용 가능한가를 결정 하였다. 또한 재사용 가능한 광휘에 대해서는 기하 관계로부터 계산되는 가중치를 사용하여 보간 하였다.

그러나 예측하고자 하는 정보는 결국 간접 광원에 의한 색 변화 정보이므로 기하 정보를 통한 예측은 텍스처 매핑 등을 통해 복잡하게 변하는 광휘를 예측하지 못할 수 있는 문제점이 있으며 최종 수집으로부터 얻어지는 기하 정보의 오차로 인하여 캐시 지점을 결정하는데 최적화 되지 못할 수 있는 문제점이 있다. 또한 점진적으로 계산되는 특성이 있어 보간이 아닌 보외(extrapolation)가 일어 날 수 있는 가능성이 있다. 기존의 연구들에서 이러한 문제들을 해결하고자 하는 노력들이 이루어 졌으나 본 연구에서는 적응적

광휘 캐시를 사용하여 보다 효율적으로 캐시 지점을 결정할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 기존의 적응적인 샘플링 방법이 레벨 단위 계산을 통해 보외를 제거하고 색 변화를 효과적으로 계산해 낼 수 있는 점에 착안하여 적응적으로 레벨을 이동하며 색 차이를 통해 최종 수집을 수행할 지점을 결정하고 기존의 기하정보를 사용하는 예측 방법을 사용하여 색 차이만으로 예측이 어려운 부분에 대해서 캐시를 수행하는 새로운 방법이다. 이러한 방법을 사용하여 캐시율을 줄이고 캐시가 필요한 지점을 효과적으로 찾을 수 있다<그림 4>.



그림 4. 본 논문에서 제안한 광휘 캐시 방법. 왼쪽부터 광휘와 GPU를 통한 가속 모듈을 사용하여 전역 조명 효과를 렌더링 한 최종 이미지, 계산된 캐시 지점, 보간이 이루어진 최종 간접 광원 효과. 간접 광원 효과가 크게 변하는 지점에서만 효과적으로 실제 계산이 이루어 지면서 부드러운 이미지를 보간해 내는 것을 확인할 수 있다.

4. 실험 결과

실제 3차원 애니메이션 제작에 사용되는 장면을 포함한 여러 장면들에 대하여 본 논문에서 제안한 방법이 효과적으로 동작함을 확인 하였다. 본 실험은 Intel Core2 CPU 2.4GH, 3GB 메모리를 사용한 PC에서 이루어 졌으며 그래픽스 하드웨어는 하나의 NVIDIA Geforce 8800 GTX 를 사용 하였다.

<그림 5>는 본 논문에서 제안한 렌더링 시스템을 통해 전역 조명 계산에 필요한 여러 가지 조명 요소들을 렌더링 한 결과를 보여주고 있다. 각 요소들이 나타내는 효과를 확인할 수 있다.



그림 5. 본 논문에서 제안한 렌더링 시스템을 통해 렌더링 된 이미지. 왼쪽부터 최종 이미지, 직접 조명, 간접 조명, 투명한 물체 효과, 커스틱 효과.

<그림 6, 7>은 실제 3차원 애니메이션 제작에 사용되었

던 장면(가필드 장면 I, 가필드 장면 II - (주) 디지아트 제공)에 대한 전역 조영 효과를 보여주고 있다. 1, 3행의 광선 추적법 만을 수행한 결과에 비해서 전역 조영 효과를 계산한 2, 3행의 이미지에서 복잡한 경로로 방안을 이동하는 빛의 효과를 사실적으로 표현해 주는 것을 알 수 있는데 단순한 밝기뿐만 아니라 색 번짐 효과도 잘 나타나고 있다.

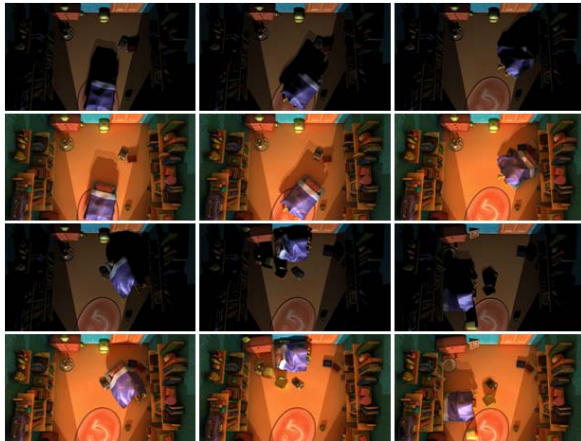


그림 6. 실제 3차원 애니메이션으로 제작된 장면(가필드 장면 I - (주) 디지아트 제공)에 대한 연속 장면 렌더링 결과. GPU에서의 최종 수집을 위해 16,384개의 샘플링이 사용되어 CPU에서의 연산과 비교하여 빠른 시간에 고품질 영상을 생성하였다. 1,3행은 광선 추적법만을 사용한 결과이며 2,4는 전역 조영 효과를 수행한 결과이다.

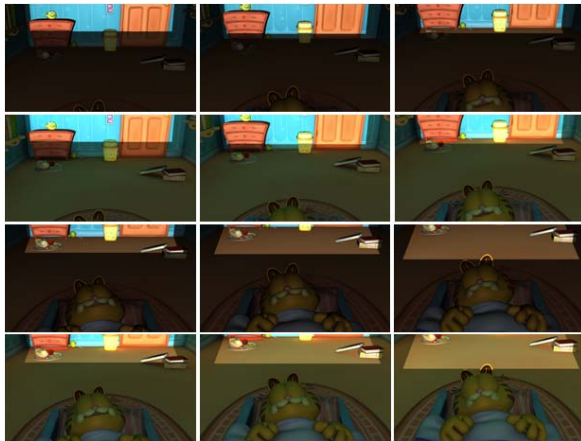


그림 7. 실제 3차원 애니메이션으로 제작된 장면(가필드 장면 II - (주) 디지아트 제공)에 대한 연속 장면 렌더링 결과. 역시 1,3행은 광선 추적법만을 수행한 결과 이고 2,4행은 GPU를 사용하여 가속하고 광휘 캐시를 사용하여 전역 조영을 표현한 결과이다. 밝기나 색감, 색 번짐 효과 등에서 차이를 확인할 수 있다.

〈표 2〉는 본 논문에서 제안한 최종 수집의 GPU에 의한 가속 기법과 적응적 광휘 캐시에 의한 성능 향상 결과를 보여주고 있다. 표에서 보는 것처럼 CPU만을 사용하여 렌더링

을 수행한 경우 기하 광휘 캐시를 사용하였음에도 불구하고 계산 시간이 너무 오래 걸려 실제 애니메이션 제작에는 사용하기 어려움을 알 수 있다. 그러나 GPU를 사용하여 가속화 한 경우를 보면 캐시를 사용하지 않았음에도 불구하고 약 15배 이상의 성능 향상을 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 최종 수집의 GPU 가속과 적응적 광휘 캐시를 모두 사용한 경우에는 CPU와 기하 광휘 캐시를 사용한 경우 보다 71배 이상의 성능 향상을 보이고 있으며 GPU 가속만을 사용한 경우 보다 4배 이상의 성능 향상을 보이고 있다.

사실상 렌더링 방정식을 수치적으로 계산하는 방법에 있어서 최종 수집의 과정을 거의 근사화 하지 않고 GPU에서 구현하였다고 할 수 있으며 적응적 광휘 캐시를 사용하여 효과적으로 계산을 최소화 하였다고 할 수 있다. 그 결과로 고품질 전역 조영을 표현 하는 실제 영상 제작에서 사용 가능한 정도의 성능 향상을 가져 올 수 있었다.

표 2. 전역 조영 알고리즘의 성능 비교. 렌더링된 이미지 해상도는 720x405로 모두 동일하며 최종 수집에서 사용된 광선의 개수와 안티알리아싱을 위한 픽셀당 샘플 개수는 표에 나온 것과 같다. 본 논문에서 제안한 GPU 가속 기법과 적응적 광휘 캐시를 사용하여 고품질 영상을 제작하는데 있어서 매우 큰 성능 향상을 보이고 있음을 확인 할 수 있다.

렌더링 수행 환경	렌더링 시간 (min)	렌더링 이미지
CPU 사용, 기하 광휘 캐시 FG ray #: 4,096 samples/pixel: 4	2,092.9	
GPU 가속 FG ray #: 16,384 samples/pixel: 16	133.17	
GPU 가속, 적응적 광휘 캐시 FG ray #: 16,384 samples/pixel: 16	29.2	

5. 결론

본 논문에서는 고품질 전역 조영효과를 보다 빠른 시간에 생성하기 위하여 GPU를 사용하여 가속하는 방법을 제안하였다. 또한 다양한 방식으로 생성된 1차 광휘 정보를 GPU를 통한 가속화 기법에 적용하기 위하여 광휘 맵의 개념을 정의하고 포톤 매핑의 최신 기술을 1차 광휘 정보로 사용하여 실험 하였다. 또한 적응적 광휘 캐시 기법을 제안하여 기존의 기하 기반 광휘 캐시 기법의 효율성을 높일 수 있었다.

본 연구에서 제안한 기법은 물리 기반 전역 조영 기법을 GPU를 통해 효과적으로 계산하기 때문에 광휘 정보의 오차

를 줄이고 결과적으로 광휘 캐시의 성능을 더욱 향상 할 수 있다.

그러나 광휘 맵을 사용하기 위해서는 각각의 물체가 중복 되지 않는 텍스처 좌표를 가지고 있어야 한다는 제약이 있어 광휘 맵에 적합한 텍스처 좌표를 생성하는 연구를 수행하고 있다. 또한 프레임간 연속성을 고려한 전역 조명 계산 방법을 적용하여 계산의 효율성을 높이고 빛의 정보가 매우 부족한 상황에서 발생할 수 있는 프레임간 노이즈를 최소화 할 수 있으리라고 생각한다.

참고문헌

- [1] J. T. Kajiya, "The Rendering Equation," In *Prog. of ACM SIGGRAPH'86*, Vol. 20, pp. 143~150, 1986.
- [2] E. Tabellion and A. Lamorlette, "An Approximate Global Illumination System for Computer Generated

Films," In *Prog. of ACM SIGGRAPH'04*, Vol. 23, pp. 469~476, 2004.

- [3] B. Walter, S. Fernandez, A. Arbree, K Bala, M. Donikian and D. P. Greenberg, "Lightcuts: A Scalable Approach to Illumination," In *Prog. of ACM SIGGRAPH'05*, Vol. 24, pp. 1098~1107, 2005.
- [4] O. Arikan, D. A. Forsyth and J. F. O'brien, "Fast and Detailed Approximate Global Illumination by Irradiance Decomposition," In *Prog. of ACM SIGGRAPH'05*, Vol. 24, pp. 1108~1114, 2005.
- [5] C. Dachsbacher, M. Stamminger, G. Drettakis and F. Durand, "Implicit Visibility and Antiradiance for Interactive Global Illumination," In *Prog. of ACM SIGGRAPH'07*, Vol. 26, No 61, 2007.
- [6] D. P. Mitchell, "Generating Antialiased Images at Low Sampling Densities," In *Prog. of ACM SIGGRAPH'87*, Vol. 21, pp. 65~72, 1987.