

HDR 환경 맵 보간을 이용한 동적 가상 조명 생성

황규현[†], 박상훈^{**}

요 약

광원은 그래픽 모델의 색상과 밝기에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 사실적인 합성 결과를 얻기 위해서는 실세계에 존재하는 모든 광원의 정보를 정교하게 저장하고 적절히 활용할 수 있어야 한다. 실세계 광원 정보를 HDR 환경 맵으로 표현하여 높은 정확도로 저장하는 것이 가능하지만, 고정된 조명 환경에서 촬영된 한 장의 HDR 환경 맵만으로는 동적 가상 조명 위치에 대한 새로운 환경 맵을 생성하는 것은 불가능하다. 본 논문에서는 미리 정의된 위치와 방향에서 촬영된 대표 HDR 환경 맵들을 이용하여 임의로 선택된 위치에 대응하는 가상 광원의 정보를 동적으로 생성하는 기법에 대해 설명한다. 본 기법은 입력된 대표 HDR 영상들로부터 분석된 광원의 밝기와 분포 등의 정보를 기반으로 영상 보간을 통해 가상 조명에 대한 HDR 환경 맵을 자동 계산한다. 보간 결과로 얻어진 정보를 영상기반 라이팅 기법에 활용함으로써 가상 광원의 효과가 그래픽 모델의 렌더링 결과에 사실적으로 반영될 수 있음을 보인다.

Generating Dynamic Virtual Light Sources by Interpolating HDR Environment Maps

Gyuhyun Hwang[†], Sanghun Park^{**}

ABSTRACT

The light source is an important visual component that empirically affects the color and illumination of graphic objects, and it is necessary to precisely store and appropriately employ the information of all light sources in the real world in order to obtain photo-realistic composition results. The information of real light sources can be accurately stored in HDR environment maps; however, it is impossible to create new environment maps corresponding to dynamic virtual light sources from a single HDR environment map captured under a fixed lighting situation. In this paper, we present a technique to dynamically generate well-matched information for arbitrarily selected virtual light sources using HDR environment maps created under predefined lighting position and orientation. Using the information obtained from light intensity and distribution analysis, our technique automatically generates HDR environment maps for virtual light sources via image interpolation. By applying the interpolated environment maps to an image-based lighting technique, we show that virtual light can create photo-realistically rendered images for graphic models.

Key words: Image-Based Lighting, Dynamic Lighting, HDR Environment Maps, HDR Interpolation

※ 교신저자(Corresponding Author): 박상훈, 주소: 서울특별시 중구 필동 3가 26번지 동국대학교 학술관 S422호 (100-715), 전화: 02)2260-3765, FAX: 02)2260-3766, E-mail: mshpark@dongguk.edu
접수일: 2012년 8월 7일, 수정일: 2012년 10월 11일
완료일: 2012년 11월 10일

[†] 준회원, 동국대학교 멀티미디어학과
(E-mail: spony@dongguk.edu)

^{**} 종신회원, 동국대학교 멀티미디어학과

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A2006486).

1. 서 론

실사 동영상과 3차원 그래픽 모델을 사실적으로 합성하기 위해서는 동영상을 촬영한 카메라의 정보 뿐만 아니라 영상 촬영시 실세계에 존재하는 모든 광원(light source)의 정확한 정보를 저장하고 활용하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 실세계 광원에 대한 빛의 정보를 높은 정확도로 저장하고 표현할 수 있는 HDR(high dynamic range) 영상을 합성 과정에서 활용하는 영상기반 라이팅(image-based lighting) 기법이 널리 활용되고 있다[1-4]. 하지만 촬영된 실사 동영상에 존재하는 조명의 위치와 방향을 대화식으로 변경하려고 할 때, 고정된 실세계 조명 환경에서 촬영된 한 장의 HDR 영상만으로는 동적으로 변하는 가상 조명 환경에 어울리는 자연스러운 합성 결과를 얻는데 한계가 있다. 동적 조명 환경을 위해서는 조명의 변화에 맞춰 대응하는 개별 HDR 영상을 생성하거나 수작업을 이용하여 편집하는 방법, 그리고 다수의 HDR 시퀀스를 이용하여 계산된 ILF(incident light field)를 이용하는 방법 등이 있지만, 이러한 방법들 모두 HDR 영상 획득 과정에서의 계산 비용이나 메모리 측면 등을 고려할 때 매우 비효율적이라 할 수 있다[5-11].

본 논문에서는 상이한 조명 조건에서 촬영된 소수의 대표 HDR 영상들로부터 영상에 포함된 광원의 밝기와 분포 등을 분석하고, 이를 이용하여 가상의

동적 조명을 보간하고 편집하는 기법에 대해 설명한다. 추정된 조명의 밝기 분포 분석을 통해 생성된 가상 조명 정보는 동적 영상기반 라이팅을 위한 HDR 환경 맵의 생성 및 편집을 위해 사용되며, 이를 이용하여 실사 영상에 배치된 그래픽 모델의 표면을 동적 조명 환경과 어울리는 자연스러운 색상과 밝기로 표현하는 것이 가능하다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 동적 영상기반 라이팅을 위한 HDR 환경 맵 보간 과정을 단계별로 나타낸 것으로, 상이한 조명 조건을 가지는 대표 HDR 영상들을 이용하여 조명의 분포와 위치를 추정하기 위해 영상에 나타나는 하이라이트 영역을 추출하는 과정이 먼저 수행된다. 이 과정에서는 평균 보다 밝은 픽셀로 정의된 하이라이트 영역을 추출하게 되는데, 광원으로 판단되는 하이라이트 영역의 분포를 고려하여 직/간접 조명을 분할하게 된다(3절 참고). 분할된 하이라이트 정보들은 구 표면에 존재하는 조명의 3차원 위치를 추정하고 복원하는데 사용되며, 동적 가상 조명의 위치와 방향 등을 고려한 HDR 환경 맵 보간 과정을 통해 동적 조명의 움직임에 대응하는 HDR 환경 맵을 자동으로 생성하게 된다(4절 참고). 마지막으로 보간하여 생성된 HDR 환경 맵을 이용하여 그래픽 모델의 표면을 동적 조명 환경에 맞는 색상과 밝기로 표현하는 동적 영상기반 라이팅 과정이 수행된다.

본 연구와 관련된 기존 연구들은 2절에서 설명하



그림 1. 동적 영상기반 라이팅을 위한 HDR 환경 맵 보간 과정

고, 그림 1에 제시된 각 단계별 수행 순서에 따라 이후의 절들에서 자세한 구현 내용을 서술 한 후, 6절에서 결론을 맺고 논문을 마무리한다.

2. 관련 연구

2.1 사실적 렌더링을 위한 HDR 영상의 활용

실세계 광원 정보는 HDR 영상을 이용하여 실제 빛을 높은 정확도로 저장할 수 있으며, 저장된 HDR 영상을 광원으로 활용하는 영상기반 라이팅 기법을 이용하여 실사 영상에 삽입된 그래픽 모델의 표면을 실제와 같은 자연스러운 색상과 밝기로 표현할 수 있다[2,4,5]. 수식 1은 실사 영상에 삽입된 그래픽 모델의 색상과 밝기에 영향을 미치는 실제 광원의 방사도(radiance)를 계산하기 위한 수식으로, 객체의 발광(emission) 정도를 나타내는 함수 L_e 와 객체 표면의 상태를 나타내는 반사 함수(reflectance function) f_r , 객체 표면에서의 조사도(irradiance) 함수 E_i 로 나누어진다. 여기서 $\vec{\omega}_i$ 와 $\vec{\omega}_o$ 는 각각 객체의 표면 x 로 향하는 빛의 입사 벡터와 뷰 벡터를 의미한다 [12].

$$L_o(x, \vec{\omega}_o) = L_e(x, \vec{\omega}_o) + \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) E_i(x, \vec{\omega}_i) d\omega_i \quad (1)$$

조사도 $E_i(x, \vec{\omega}_i) = L_i(x, \vec{\omega}_i)(N \cdot \vec{\omega}_i) d\omega_i$ 는 그림 2의 (a)와 같은 HDR 환경 맵을 이용하여 계산된 입사 방사도 $L_i(x, \vec{\omega}_i)$ 와 빛의 입사 벡터 $\vec{\omega}_i$ 와 표면 x 의 노말 벡터 N 를 이용하여 구할 수 있다. 그림 2의 (b)는 실사 영상 촬영 단계에서 금속 구(chrome ball) 반복

촬영 기법을 이용하여 획득한 HDR 영상과 이를 이용한 영상기반 라이팅의 결과를 보여주는 것으로, 좌측과 가운데에 위치한 인형은 모델링된 그래픽 모델이며, 우측 것은 책상위에 놓인 실제 인형을 촬영한 것이다. 중간 렌더링 결과로부터 실제 존재하는 광원의 정보를 이용하여 실제와 유사한 색상과 밝기로 표현 가능함을 확인할 수 있다.

2.2 HDR 환경 맵

실세계 광원 정보는 영상 합성시 실사 영상에 배치된 그래픽 모델의 색상과 밝기에 큰 영향을 미치는 중요한 요소로 작용하기 때문에, 자연스럽게 사실적인 합성 결과를 얻기 위해서는 실사 영상 촬영에 사용된 실세계 모든 광원의 정보를 정교하게 저장하고 활용하는 것이 중요하다[1,2,6,14]. 이를 위해 Debevec [15]은 미리 정의된 노출 값에 따라 금속 구를 반복 촬영하여 획득한 복수의 LDR(low dynamic range) 영상으로부터 한 장의 HDR 환경 맵을 생성하는 기법을 제안하였다. 이 기법은 $360^\circ \times 360^\circ$ 의 전체 범위(omni-directional)를 한 장의 환경 맵 영상으로 표현하기 위해, 금속 구를 중심으로 카메라의 위치와 방향을 90° 간격으로 바뀌가며 서로 다른 노출 값으로 촬영된 복수의 LDR 영상으로부터 카메라의 반응 곡선(response curves)을 추출하고, 원시 데이터로의 복원 과정을 통해 실세계 광원 정보를 HDR 환경 맵으로 표현하는 방법이다(그림 3 참고). 하지만 이 방법은 한 장의 HDR 환경 맵 생성을 위해 많은 수작업과 추가 보정 과정을 요구하기 때문에, 동적 영상기반 라이팅을 위한 시간 가변 HDR 환경 맵을 생성하



(a) HDR 영상



(b) (a)를 이용한 영상기반 라이팅 결과

그림 2. HDR 영상을 이용한 영상기반 라이팅의 예[13]

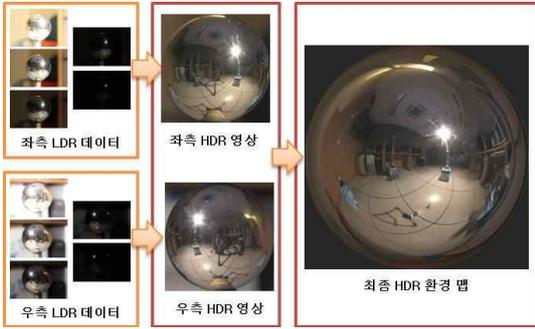


그림 3. 금속 구 반복 촬영 기법을 이용한 HDR 환경 맵 생성의 예

는데 효율적이지 못한 한계가 있다.

Waese[5]와 Unger[6]는 조명 조건이 동적으로 변하는 경우를 고려하여 Debevec에 의해 소개된 방법을 응용한 동적 HDR 환경 맵 생성 기법을 제안하였는데, 이 방법은 RGB 비디오 카메라 앞에 금속 구를 배치한 다음 캡춰된 영상을 이용하여 HDR 환경 맵을 생성하는 방법이다. 하지만 이 기법 역시, 동적 HDR 환경 맵 시퀀스를 생성하기 위해 전용 하드웨어를 사용하여야 하는 한계가 있으며, 프레임 단위로 계산 저장되는 HDR 영상을 저장하기 위해 메모리 관리와 복잡한 연산 등이 요구되기 때문에 효율적이지 못한 한계가 있다. 이와 다른 접근 방법으로는 촬영된 한 장의 HDR 환경 맵을 편집[7-9]하거나, 다수의 HDR 시퀀스를 이용하여 계산된 ILF를 이용하는 기법[10,11] 등이 제안되었지만, 이 기법들 역시 전용 하드웨어의 사용이나 복잡한 연산 등이 요구되는 한계가 있다.

3. HDR 영상 분석을 통한 실세계 조명 추정 및 분할

가상 조명의 생성 및 동적 영상기반 라이팅을 위한 HDR 환경 맵 생성을 위해 상이한 조명 조건에서 촬영된 복수의 대표 HDR 영상이 이용된다. 우선 입력으로 사용되는 HDR 영상으로부터 잠재적인 하이라이트(highlight) 영역을 추출하고, 이를 대략적인 조명의 위치와 분포를 추정하기 위해 사용한다. 하이라이트 영역은 환경 맵의 모든 픽셀들에 대해 적절한 수식을 적용함으로써 추출될 수 있으며, 추출된 하이라이트의 분포와 사용자가 입력한 극치(threshold value)에 따라 분할된다. 최종적으로 분할된 하이라

이트 클러스터를 이용하여 조명의 위치를 복원할 수 있으며, 분할된 조명의 위치와 분포를 이용하여 가상 조명을 보간 하게 된다.

3.1 조명 추정을 위한 하이라이트 추출

HDR 환경 맵으로부터 영상에 존재하는 조명의 정보를 추정하기 위해 영상에 존재하는 하이라이트 영역이 이용된다. 하이라이트 영역은 환경 맵의 모든 픽셀들에 대해 적절한 수식을 적용함으로써 계산 될 수 있는데, 본 논문에서는 영상 전체의 평균 밝기보다 높은 값을 가지면서, 사용자가 선택한 극치 γ 보다 큰 밝기 값을 갖는 픽셀들의 집합을 하이라이트 영역이라 정의하였다. 수식 2는 HDR 환경 맵에 존재하는 하이라이트 영역을 추출하기 위해 사용되는 하이라이트 마스크 $H(i)$ 를 생성하기 위한 수식으로, i 번째 픽셀의 밝기 $L(i)$ 가 환경 맵의 평균 밝기 λ 와 사용자가 선택한 극치 γ 보다 크거나 같은 경우, 하이라이트 마스크 값을 1로 설정한다.

$$H(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } L(i) \geq \lambda \text{ and } L(i) \geq \gamma \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

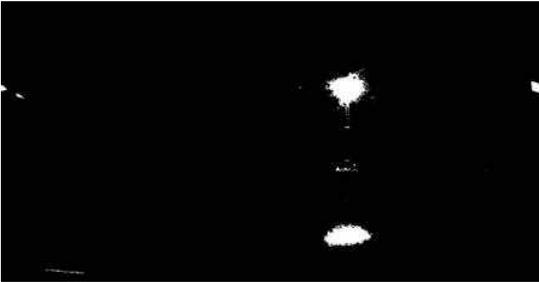
그림 4는 조명 추정을 위한 하이라이트 추출 결과를 보여주는 것으로, HDR 환경 맵과 식 2를 이용하여 계산된 하이라이트 마스크를 이용하여 얻을 수 있다. 그림 4의 (c)에서 붉은색으로 표시된 하이라이트 영역은 직/간접 조명의 위치를 추정하기 위한 하이라이트 분할 과정에 이용되며, 최종적으로 동적 가상 조명의 생성 및 HDR 환경 맵 보간 과정을 위해 사용된다.

3.2 하이라이트 분할 및 조명 위치 추정

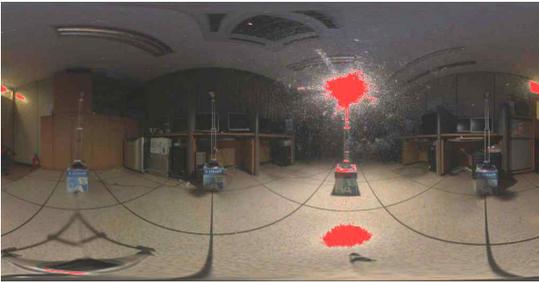
HDR 환경 맵에 존재하는 직/간접 조명의 3차원 위치를 추정하기 위해 3.1절을 통해 추출된 하이라이트 영역을 분할(segmentation)하는 과정이 수행된다. 하이라이트 영역을 분할하기 위해 수식 3과 같이 하이라이트 영역의 가장 밝은 픽셀 i 와 랜덤으로 선택된 주변 픽셀 r 의 밝기 값 l_i 와 l_r 의 차이 제곱이 적절히 선택된 값 τ 보다 작은 경우 g_j 로 분할된다. 하이라이트 영역의 밝기를 고려하여 분할된 하이라이트 g_j 는 분할된 하이라이트의 경계 영역(bounding region)의 중심 좌표 간의 유클리디안(euclidean) 거리차를 이용하여 차이 제곱이 사용자가 입력한 값



(a) 입력 HDR 환경 맵



(b) HDR 환경 맵 마스크 $H(i)$



(c) 하이라이트 추출 결과

그림 4. 조명 추정을 위한 하이라이트 추출 결과

ρ 보다 작은 경우 하이라이트 클러스터 \hat{g}_j 로 분할된다. 여기서 $B(g_j)$ 와 $B(g_k)$ 는 밝기에 따라 분할된 하이라이트 클러스터 g_j 와 g_k 의 하이라이트 경계 영역의 중심 좌표를 의미 하며, τ 와 ρ 은 분할을 위한 사용자

입력 변수이다. 그리고 \hat{g}_j 는 하이라이트의 분포에 따라 분할된 하이라이트를 뜻하고, n 과 m 은 각각 하이라이트 영역의 총 픽셀수와 분할된 하이라이트 영역 g_j 의 총 개수를 의미한다.

$$g_j = |l_r - l_i|^2 < \tau, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\hat{g}_j = |B(g_j) - B(g_k)|^2 < \rho, \quad k = 1, \dots, m$$

그림 5는 식 3을 이용하여 분할된 하이라이트 클러스터 g_j 와 \hat{g}_j 의 결과를 나타내는 것으로 그림 4의 (c)를 이용하여 분할 한 결과이다.

분할된 하이라이트 \hat{g}_j 에 대한 위치는 수식 4를 이용하여 반지름 r 인 구 표면상에 존재하는 광원의 위치 P 로 표현될 수 있다. 여기서 θ 와 ϕ 는 위경도 맵 (latitude-longitude map) 형태로 표현되는 HDR 환경 맵의 하이라이트 텍스처 좌표를 이용하여 계산된다.

$$P = [r \sin(\theta) \cos(\phi), r \sin(\theta) \sin(\phi), r \cos(\theta)]^T \quad (4)$$

그림 6은 밝기와 분포에 따라 클러스터링된 하이라이트 클러스터 \hat{g}_j 를 식 4를 이용하여 3차원으로 복원한 결과를 나타내는 것으로, 조명의 분포와 밝기 등을 고려하여 3차원 구 표면상에 존재하는 동적 가상 조명의 분포와 세기 등을 계산하기 위해 사용된다.

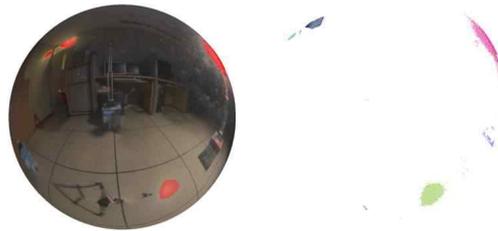


그림 6. 분산된 하이라이트 클러스터와 3차원으로 복원된 하이라이트 클러스터

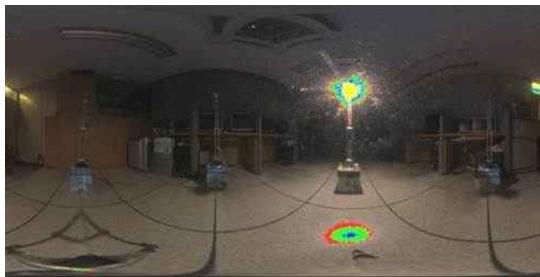


그림 5. 분할된 g_j (좌)와 \hat{g}_j (우)의 결과

4. 동적 가상 조명 생성 및 HDR 환경 맵 보간

그림 7은 임의의 동적 조명 v_j 의 위치를 이용한 보간 과정을 통해 생성된 동적 가상 조명의 하이라이트 G' 을 보여주는 것으로, G' 의 생성을 위해 주변의 인접한 하이라이트 클러스터 G_p, G_q, G_r 이 사용되었다. 인접 하이라이트 클러스터 G_p, G_q, G_r 는 v_j 의 위치에 따라 결정되며, 각각의 인접 하이라이트 클러스터는 3절을 통해 계산된 입력 HDR 영상의 분할된 하이라이트 클러스터 \hat{g}_j 의 집합을 의미한다. 추정된 조명 v_j 를 위한 동적 가상 조명의 하이라이트를 생성하기 위해 인접 클러스터의 분포와 세기 등이 이용되며, 하이라이트 클러스터 간의 단순 선형 보간이 아닌 위치를 고려한 결과를 얻기 위해 수식 5를 이용하여 회전한 인접 하이라이트 클러스터 G'_p, G'_q, G'_r 에 삼각형 무게 중심을 이용하여 가중치를 적용하게 된다. 여기서 $R(\vec{s}, \vec{t})$ 은 벡터 \vec{s} 를 벡터 \vec{t} 로 회전하기 위한 회전 행렬을 의미 하며[16], \vec{s} 는 원점에서 하이라이트 클러스터 G_i 의 위치로 향하는 정규화된 방향 벡터, \vec{t} 는 원점에서 v_j 의 위치로 향하는 정규화된 방향 벡터를 의미한다. 그리고 $G_i(j, k)$ 는 수식 4를 이용하여 계산된 i 번째 인접 하이라이트 클러스터의 j 번째 분할 하이라이트 클러스터 \hat{g}_j 의 위치 $P_j^k = [x_j^k, y_j^k, z_j^k, 1]^T$ 를 의미한다.

$$G'_i(j, k) = R(\vec{s}, \vec{t})G_i(j, k) = \begin{bmatrix} e + hv_x^2 & hv_xv_y - v_z & hv_xv_z + v_y & 0 \\ hv_xv_y + v_z & e + hv_y^2 & hv_yv_z - v_x & 0 \\ hv_xv_z - v_y & hv_yv_z + v_x & e + hv_z^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j^k \\ y_j^k \\ z_j^k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

회전행렬 $R(\vec{s}, \vec{t})$ 을 계산하기 위해 사용되는 변수 v 와 e 는 각각 \vec{s} 와 \vec{t} 간의 외적, 내적을 의미하며 $h = \frac{1-e}{v \cdot v}$ 는 v 와 e 를 이용하여 계산된다[16].

동적 가상 조명 v_j 를 위한 HDR 환경 맵을 생성하기 위해 하이라이트를 제거한 각각의 대표 HDR 영상과 v_j 를 고려하여 생성된 하이라이트 클러스터 G' 이 사용된다. 우선 하이라이트를 제거한 환경 맵을 생성하기 위해, 인접한 HDR 영상의 하이라이트 마스크를 이용하여 중복된 하이라이트 마스크 부분을 제거한 다음, 여기에 가우시안 함수(gaussian function)를 이용하여 하이라이트 영역을 감소시켰다. 하이라이트 클러스터 G' 은 수식 5를 이용하여 회전된 인접 하이라이트 클러스터 G'_p, G'_q, G'_r 와 수식 6을 이용하여 하여 계산될 수 있다. 회전된 인접 하이라이트 클러스터들에 적용되는 가중치 α, β, γ 는 하이라이트 클러스터 G_i 와 G_j 의 중심을 연결한 직선의 방정식 f_{ij} 를 이용하여 계산된다. 여기서 G_i 와 G_j 는 수식 5를 적용하지 않은 인접 하이라이트 클러스터를 의미한다. 그리고 α, β, γ 는 각각 0~1 범위를 가지며, 모든 가중치의 합은 1이다.

$$G' = \alpha G'_p + \beta G'_q + \gamma G'_r$$

$$\alpha = \frac{f_{qr}(\theta, \phi)}{f_{qr}(\theta_p, \phi_p)}, \beta = \frac{f_{pr}(\theta, \phi)}{f_{pr}(\theta_q, \phi_q)}, \gamma = \frac{f_{pq}(\theta, \phi)}{f_{pq}(\theta_r, \phi_r)} \quad (6)$$

그림 8은 본 절에서 설명한 동적 가상 조명 생성 및 HDR 환경 맵 보간 결과를 보여주는 것으로, 그림 8의 (a)와 같은 입력 HDR 환경 맵과 하이라이트 클러스터 중 일부를 이용하여 동적 가상 조명 v_j 를 위한 하이라이트 클러스터 G' 과 HDR 환경 맵을 보간하여 생성한 것이다. 이를 위해 동적 가상 조명 v_j 의 위치에 따라 θ 와 ϕ 가 각각 90° 와 $0^\circ, 180^\circ$ 와 0° 그리고 0° 와 90° 인 세 개의 하이라이트 클러스터와 HDR 환경 맵이 사용되었다.

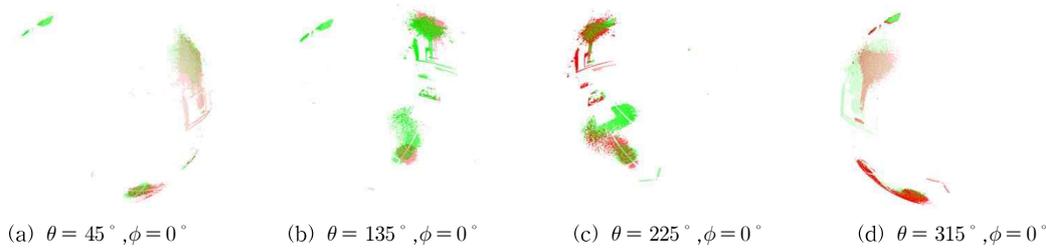


그림 7. 회전행렬 $R(\vec{s}, \vec{t})$ 을 인접 하이라이트 클러스터에 적용한 결과

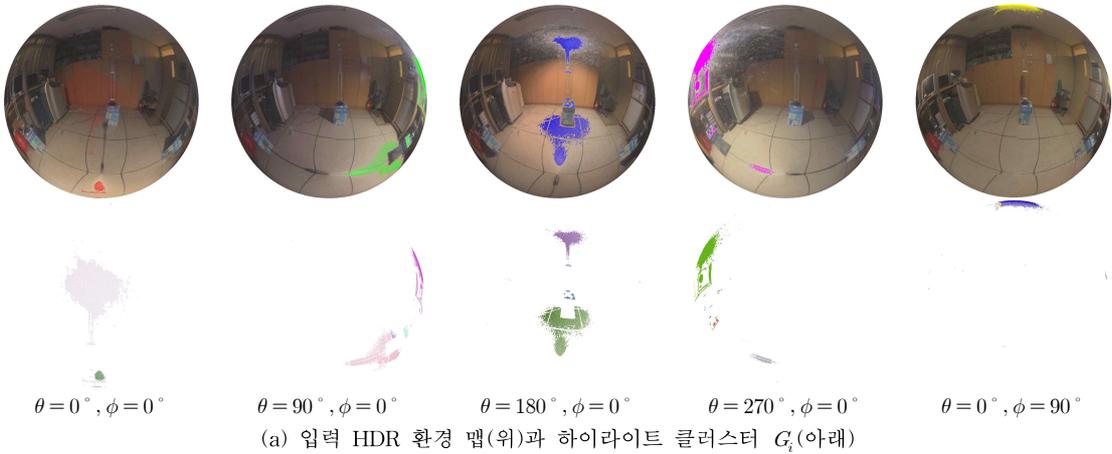


그림 8. 동적 가상 조명 및 HDR 환경 맵 보간 결과

5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 HDR 환경 맵 보간을 이용한 동적 가상 조명 생성을 위해 1024×1024 해상도를 가지는 5장의 HDR 환경 맵과 Intel i7-2600 3.4Ghz의 CPU와 8 GB의 메모리 그리고 GeForce GTX 560 Ti 그래픽 카드가 탑재된 범용 PC를 이용하였다. 실험에 사용된 HDR 환경 맵을 얻기 위해 카메라의 위치를 고정 시킨 후, 조명의 위치와 방향만 이동하였고 금속 구 반복 촬영 기법을 통해 한 장의 HDR 환경 맵을 얻기 위해 약 90분 정도의 촬영 및 추가 보정 시간이 소요되었다. 그림 9는 고정된 실세계 조명에 대한 정보를 저장하고 있는 5장의 HDR 환경 맵을 입력받아 동적으로 변하는 가상의 조명 위치에 대한 HDR 환경 맵을 보간을 통해 생성하고, 이를 영상기반 라이팅 기법에 적용하여 렌더링 한 결과 영상을 보여준다. 동적 가상 조명은 그래픽 모델을 중심으로 60° 간격으로 회전하도록 설정하였으며, 동적 가상

조명의 움직임에 대응되는 HDR 환경 맵을 보간하여 생성하기 위해 약 0.9초의 보간 및 처리 시간이 발생되었다. 보간된 HDR 환경 맵을 이용하여 가상 조명의 움직임에 따라 그래픽 모델의 음영의 변화가 자연



그림 9. 동적 가상 조명의 움직임에 따라 보간된 HDR 환경 맵을 이용한 영상기반 라이팅 결과(좌에서 우, 위에서 아래)



그림 10. 제안된 기법(위)과 한 장의 HDR 환경 맵 편집(아래)을 이용한 기법간의 비교

스럽게 표현되는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 본 논문에서 제안한 방법과 한 장의 HDR 환경 맵을 이용한 편집 기법의 렌더링 결과의 화질을 비교한 것이다. 한 장의 HDR 환경 맵을 이용한 편집 기법을 위해 하이라이트가 제거된 한 장의 HDR 환경 맵과 환경 맵으로부터 추출한 하이라이트 클러스터 G_i 가 이용 되었으며, 동적 가상 조명의 움직임에 대응되도록 HDR 환경 맵을 편집하기 위해 동적 가상 조명 v_j 의 움직임에 따라 회전을 수행한 G_i 를 HDR 환경 맵의 광원으로 삽입하였다. 한 장의 HDR 영상을 이용하여 동적 가상 조명의 움직임에 따라 편집한 결과의 경우(그림 10의 아래), 동적 가상 조명의 움직임에 따라 발생하는 간접 광의 영향으로 인해 생기는 반사 등이 제대로 반영되지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법을 이용하는 경우, 고정된 조명 조건에서 촬영된 대표 HDR 영상만을 보간하여 동적 가상 조명의 움직임에 맞는 결과를 사실적으로 생성할 수 있는 것을 확인할 수 있었으며, 실시간 HDR 환경 맵 생성 기법과 달리 많은 메모리와 연산 등이 요구되지 않는 장점이 있는

것을 확인할 수 있었다.

그림 11은 제안된 기법과 실제 광원 정보를 이용한 렌더링 결과의 차 영상(differential image)을 보여주는 것으로, 차 영상의 색상을 반전을 통해 두 영상 간의 픽셀 값의 차이가 작을수록 흰색에 가깝게 나타나도록 하였다. 비교 실험을 위해 가상 조명의 위치와 방향이 일치하는 곳에 실제 조명을 배치한 후 촬영된 실측 HDR 환경 맵을 실제 광원 정보로 이용하였다. 실측 HDR 환경 맵을 이용한 렌더링 결과와의 차 영상인 그림 11의 (c)와 (f)를 통해 제안된 기법이 한 장의 HDR 환경 맵 편집 기법에 비해 실제 광원 정보를 이용한 결과와 유사하게 렌더링 된 것을 확인할 수 있다. 또한 표 1에서와 같이 PSNR(peak signal-to-noise ratio)을 이용한 각 기법과 실측 HDR을 이용한 렌더링 결과 영상의 유사도 비교에서도 제안된 기법이 약 33.65 dB, 한 장의 HDR 환경 맵 편집 기법이 약 28.47 dB로 제안된 기법이 한 장의 HDR 환경 맵 편집 기법 보다 우수한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 그림 11의 (b)와 (c)와 같이 가상 조명을 이용한 렌더링 결과가 실제와는 상이한 색상으로 표

표 1. PSNR을 이용한 그림 11의 렌더링 결과 영상 간의 유사도 비교

	제안된 기법과 실제 광원 정보를 이용한 결과를 비교	한 장의 HDR 환경 맵 편집 기법과 실제 광원 정보를 이용한 결과를 비교
PSNR (dB)	33.65	28.47

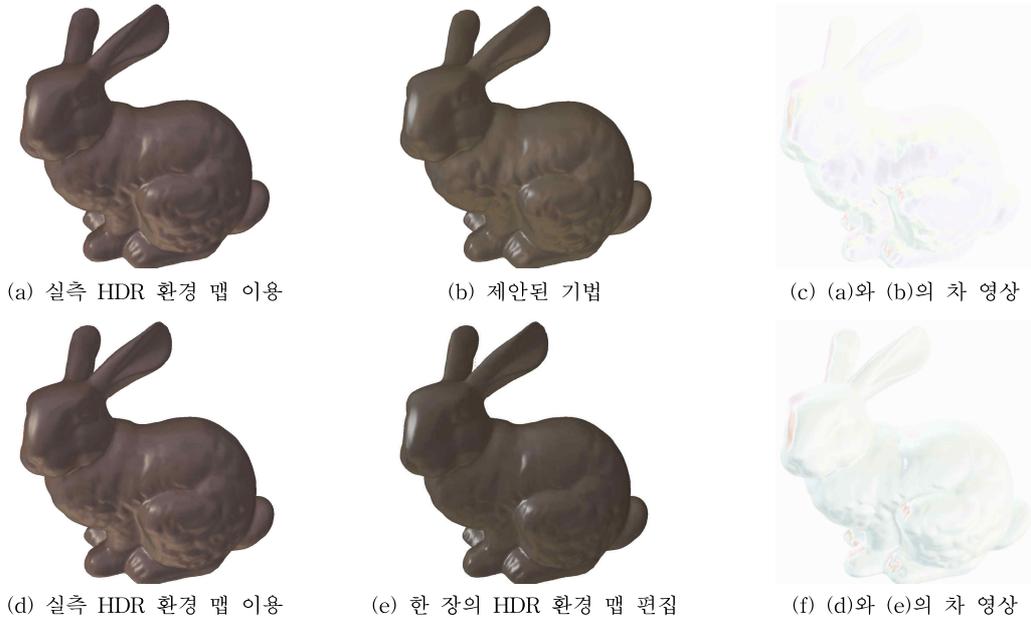


그림 11. 제안된 기법과 한 장의 HDR 환경 맵 편집 기법, 그리고 실제 광원 정보를 이용한 렌더링 결과 영상간의 비교

현되는 한계가 존재하는데, 이는 보간을 통해 생성된 HDR 환경 맵이 실세계 간접 광원의 정보를 충분히 반영하지 못해 발생하는 문제로 입력으로 사용되는 대표 HDR 환경 맵의 수를 증가하는 방법을 통해 해결 가능하다.

6. 결론 및 향후 연구

고정된 조명 조건에서 촬영된 HDR 환경 맵의 밝기와 하이라이트의 분포를 분석하고 이를 보간 함으로써, 동적 가상 조명의 위치와 방향을 반영한 새로운 HDR 환경 맵을 생성할 수 있었다. 또한 보간된 HDR 환경 맵을 영상기반 라이팅에 활용하여 사실적인 렌더링 결과 영상을 제작할 수 있음을 보였다. 하지만 보간 결과로 생성된 HDR 환경 맵의 결과는 하이라이트 추정 및 보간 방법에 따라 품질이 좌우되며, 3차원 공간의 모든 위치에 대한 환경 맵의 보간이 가능하기 위해서는 현재 실험보다 더 많은 입력 샘플 HDR 환경 맵이 필요하다는 한계가 존재한다. 향후 연구를 통해 하이라이트 추정 및 보간 방법을 개선하고, 임의의 위치에 대한 가상 조명을 더 정교하게 보간할 수 있는 기법을 개발한다면 다양한 그래픽스 응용에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] P. Debevec, "Rendering Synthetic Objects Into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography," *Proc. of SIGGRAPH 98*, pp. 189-198, 1998.
- [2] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann Publisher, San Francisco, Calif., 2006.
- [3] 김정호, "HDR 기반의 사실적 렌더링에 관한 연구," 기초조형학연구, 제8권, 제4호, pp. 211-221, 2007.
- [4] 박혜정, 박은혜, 윤성민, 윤성의, 정영일, 황규현, 김정호, 박상훈, "영상기반 조명을 이용한 고품질 애니메이션 제작," 영상문화콘텐츠연구, 제1집, pp. 159-178, 2008.
- [5] J. Waese and P. Debevec, "A Real-time High Dynamic Range Light Probe," *Proc. of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques: Confer-*

ence Abstracts and Applications, pp. 247, 2002.

[6] J. Unger, S. Gustavson, and A. Ynnerman, "Spatially Varying Image Based Lighting by Light Probe Sequences: Capture, Processing and Rendering," *Vis. Comput.*, Vol. 23, No. 7, pp. 453-465, 2007.

[7] F. Pellacini, "EnvyLight: An Interface for Editing Natural Illumination," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 29, No. 4, pp. 34:1-34:8, 2010.

[8] M. Colbert, E. Reinhard, and C. E. Hughes, "Painting in High Dynamic Range," *Journal of Vis. Comun. Image Represent.*, Vol. 18, No. 5, pp. 387-396, 2007..

[9] S. Pessoa, G. de S. Moura, J. do M. Lima, V. Teichrieb, and J. Kelner, "RPR-SORS: Real-time Photorealistic Rendering of Synthetic Objects Into Real Scenes," *Computer and Graphics*, Vol. 36, No. 2, pp. 50-69, 2012.

[10] I. Ihrke, T. Stich, H. Gottschlich, M. Magnor and H.-P. Seidel, "Fast Incident Light Field Acquisition and Rendering," *Journal of WSCG(WSCG'08)*, Vol. 16, No. 1-3, pp. 25-32, 2008.

[11] V. Masselus, P. Peers, P. Dutré, and Y. Willems, "Relighting with 4D Incident Light Fields," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 22, No. 3, pp. 613-620, 2003.

[12] J. Kajiya, "The Rendering Equation," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 143-150, 1986.

[13] 박은혜, 황규현, 박상훈, "범용 디지털 카메라를 이용한 HDR 파노라마 환경 맵 제작 시스템 개발," 한국컴퓨터그래픽스학회논문지, 제18권, 제2호, pp. 1-8, 2012.

[14] 김정호, "3D 컴퓨터 그래픽을 도입한 클레이 캐릭터 제작 공정 개발에 관한 연구," 멀티미디어학회논문지, 제11권, 제9호, pp. 1245-1257, 2008.

[15] P. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," *Proc. of ACM SIGGRAPH97*, pp. 369-378, 1997.

[16] T. Möller, and J. Hughes, "Efficiently Building a Matrix to Rotate one Vector to Another," *Journal of Graphics Tools*, Vol. 4, No. 4, pp. 1-4, 1999.



황 규 현

2006년 2월 대구대학교 멀티미디어공학과 졸업(공학사)
 2008년 2월 동국대학교 멀티미디어학과 졸업(공학석사)
 2008년 3월~현재 동국대학교 멀티미디어학과 박사과정

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 비디오기반 렌더링, 실시간 렌더링, 증강 현실 등



박 상 훈

1993년 8월 서강대학교 수학과 졸업(이학사)
 1995년 8월 서강대학교 컴퓨터학과 졸업(공학석사)
 2000년 2월 서강대학교 컴퓨터학과 졸업(공학박사)

2000년 3월~2000년 6월 서강대학교 컴퓨터학과 박사후 연구원
 2000년 7월~2002년 8월 University of Texas at Austin 박사후연구원
 2002년 9월~2005년 2월 대구가톨릭대학교 컴퓨터정보통신공학부 조교수
 2010년 1월~2011년 2월 University of California, Davis 방문연구원
 2005년 3월~현재 동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과 부교수
 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 과학적 가시화, 실시간 렌더링, 사실적 렌더링, 고성능 컴퓨팅 등