

라디안스 맵을 이용한 광원 모델링

(Light Modeling with Radiance Map)

김 모 곤[†] 김 성 진^{**} 정 순 기^{***}

(Mo Gon Kim) (Sung Jin Kim) (Soon Ki Jung)

요 약 컴퓨터 그래픽스 분야에서 물체나 장면을 실제 사진처럼 표현할 목적으로 표면 반사 특성에 관한 많은 연구가 이루어져왔다. 본 논문은 물체의 표면 반사 특성을 구하기 위한 특별한 장비나 복잡한 기하학적인 정보를 필요로 하지 않는 광원 모델링 기법을 제시한다. 이 기법은 영상의 픽셀 밝기 정보가 아닌, 카메라로 들어오는 실제 밝기를 나타내는 라디안스 정보를 이용하여 물체 표면의 반사 특성(BRDF)을 측정하는 것이 특징이다. 본 논문에서 제안한 광원 모델링을 통하여 다양한 광원에서의 사실적인 장면을 복원할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 광원의 조작과 카메라 센서의 노출 시간을 자유롭게 조절하는 것이 가능하다.

Abstract We present a method of modeling lights from photographs taken with conventional imaging equipment. It does not use both any geometrical information and special apparatus to calculate surface reflection properties. To represent surface reflection properties of the scene, we use BRDFs which are calculated by radiance values of surface elements and light sources. And the BRDF data of each surface element is further transformed to the spherical harmonic domain for efficient storage. Thus, it allows to reconstruct the photo-realistic scene under different light sources, to manipulate diversely the arbitrary light source and to control exposure time of camera sensor. Moreover, we test our algorithm with real image instead of synthetic image.

1. 서 론

영상기반 모델링(image-based modeling)에서 물체를 모델링하는 방법은 형태를 모델링(shape modeling)하는 방법과 반사특성을 모델링(reflectance modeling)하는 방법으로 대별할 수 있다. 물체의 형태에 대한 모델링 기법은 이미 많은 연구가 이루어져 왔으며, 대표적인 예로서는 명암이나 모션 등을 이용한 형태복원 기법(shape from X), 광 측정법에 의한 스테레오(photometric stereo) 등이 있다. 반면에 물체의 반사특성을 모델링하는 경우는 사실감있는 장면(scene)을 생성하기 위해 실제 물체의 반사 특성에 대한 모델링이 필요함에도 불구하고 다소 제한적으로 연구되어 오고 있다.

현재까지는 모델링된 물체의 반사특성은 아주 간단하거나 매우 복잡한 양상을 띠고 있다. 예를 들어, 영상을 생성할 때 영상 전체의 색상이나 물체 고유의 색상에 관한 정보를 텍스처 매핑(texture mapping)으로 표현할 수가 있는데, 이는 하이라이트(highlight)와 같은 정확한 셰이딩(shading)효과를 표현할 수 없다는 단점이 있다. 반면에 물체 표면에 대한 반사특성은 BRDF(Bi-directional Reflectance Distribution Function)로 정확하게 표현할 수가 있는데, 물체 표면을 BRDF로 표현할 수만 있다면, 원칙적으로는 정확한 장면을 생성해낼 수는 있다. 그러나 이 방법도 실제로 BRDF를 측정하기 위한 시간과 비용을 고려한다면 그다지 쉬운 일은 아니다.

본 논문에서는 BRDF를 측정하기 위해, 전통적으로 사용하는 BRDF 측정 도구[1]를 이용하지 않고, 광원의 위치에 따른 몇 장의 장면영상으로부터 라디안스 맵(radiance map)을 구성한 뒤 이로부터 BRDF를 측정하는 방법을 제시한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 영상을 사용하기 때문에 복잡한 기하학적인 정보를 필요로 하지 않고, BRDF를 측정하는 시간과 비용을 줄일 수 있다. 또한 사용자가 광원의 위치와 세기를 임의로 조절할 수 있

· 본 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 "영상기반 가상환경의 제작 및 상호작용에 관한 연구" 과제의 지원에 의한 것임(KRF-99-041-E00294)

† 비 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과
mgkim@vr.knu.ac.kr

** 비 회 원 : (주)에이알비전 연구원
saintjin@ar-vision.com

*** 통신회원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 교수
skjung@knu.ac.kr

논문접수 : 2001년 2월 13일

심사완료 : 2001년 7월 26일

으며, 그에 따른 물체의 장면을 빠르게 렌더링할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련연구를 기술하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 광원의 모델링 방법에 대해 자세히 논한다. 4장에서는 모델링된 데이터로부터 장면을 렌더링하는 과정을 기술한다. 5장에서는 실험 결과를 보이고, 6장에서 결론 및 향후과제를 기술한다.

2. 관련 연구

컴퓨터 그래픽스 분야에서는 사실성 있는 물체를 표현하기 위한 연구가 많이 이루어져 왔다. 앞서서도 언급하였듯이, 물체 표면의 반사특성을 표현하기 위해서는 복잡하게 혹은 단순하게 표현할 수가 있다. 일반적으로 물체 표면의 반사특성을 단순화하여 모델링하는 방법으로는 쥘 모델(Phong model)이 있다. 이 방법은 물리적으로는 부정확하지만, 모델링이 쉽고 간단하기 때문에 가장 선호하는 방법중의 하나이다. 그러나 물리적으로 정확한 표면의 특성을 모델링하기 위해서는 좀 더 복잡하고 정교한 모델이 필요하다. 즉 표면의 반사적인 특성을 표현하기 위해서는 표면의 위치에 따른 편광(polarization), 산란(scattering), 형광(fluorescence), 하이라이트(highlight) 등의 현상을 고려해 주어야 한다. 이러한 것을 모두 표현하기 위해서는 광원에 대한 입사각과 표면의 반사각, 파장, 표면의 위치, 입사된 빛과 반사된 빛에 대한 시간적 지연(delay) 등 수많은 변수가 필요하다.

그러나 이러한 모든 것들을 고려하여 물체의 반사특성을 모델링한다는 것은 어렵거나 불가능하다. 이런 모든 변수들을 제거하고 광원의 입사각과 표면에 반사되는 각에 대한 함수로 표현한 것이 BRDF이다. 표면의 반사특성을 BRDF를 이용하여 모델링하는 방법으로, 여러 가지 기법들이 제안되었다[1, 2, 3, 4]. 이런 모델들은 실제 물체의 여러 가지 표면 특성을 근사화하여 표현하였고, 실제감 있는 렌더링에 사용되어 왔다.

반면 Ward[1]와 Karner[5]는 특별한 장치를 이용하여 물체 표면의 반사특성을 측정하고 복원하는 방법을 제시하였다. 또한 Sato[3]는 레이저 스캐닝을 통하여 물체를 모델링하고 텍스처를 통하여 표면의 반사특성을 구하는 방법을 제시하였고, Debevec[6]은 합성물체(synthetic object)에 대한 반사나 그림자 효과를 주기 위해 장면의 특정부분에 해당하는 여러 가지 특징들을 추출하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법들은 물체의 표면에 대한 반사특성을 잘 나타내지만 표면의 반사특성을 모델링하기 위하여 특별히 고안한 장비를 사용하거나 물체의 기하학적 정보(geometrical information)

를 추출하는 복잡한 작업을 필요로 하는 단점이 있다.

이와는 다르게 Wong[7]은 기하학적 정보를 사용하지 않고 광원의 위치를 달리 한 여러 장의 영상을 가지고 장면의 조명(illumination)을 계산하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서도 이와 유사한 방법을 제안하는데, BRDF를 측정하기 위해 Wong이 영상의 밝기 정보를 사용했다면, 본 논문에서는 픽셀의 라디안스 정보를 사용한다는 것이 가장 큰 차이점이다.

3. 광원 모델링(light source modeling)

본 장에서는 광원을 모델링하는 구체적인 방법에 대해 기술한다. 3.1절에서는 영상 획득 및 라디안스 맵 샘플링 과정을 기술하고, 3.2절에서는 BRDF 측정 방법과 이를 위해 라디안스 정보를 사용하는 타당성을 밝힌다. 마지막으로 3.3절에서는 모델링된 데이터의 압축방법을 기술한다. 광원 모델링에 대한 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다.

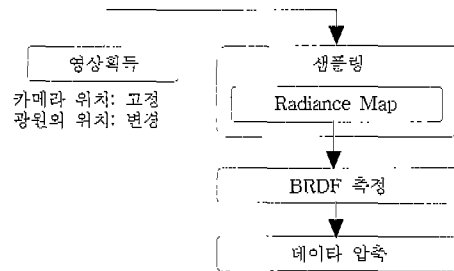


그림 1 광원 모델링 단계

3.1 영상획득 및 라디안스 맵 샘플링

본 논문에서 제안한 광원 모델링의 첫 번째 단계는 입력 영상들로부터 라디안스 맵을 샘플링하는 작업이다.

Wong[7]이 제안한 광원 모델링의 특징은 물체의 반사 특성을 실제 밝기 정보가 아닌 영상의 픽셀의 밝기 정보를 가지고 표현하려 한 점인데, 이는 그림 2에서도 명백하게 알 수 있듯이, 영상의 픽셀 정보는 물체의 반사 특성을 정확하게 표현할 수 없다.

일반적으로 필름이나 디지털 영상은 조명에 의해 물체에 반사되는 빛이 카메라 렌즈를 통과하여 얻어지게 된다. 먼저 물체에 반사된 빛은 카메라의 렌즈를 통과하고 카메라 자체 센서인 조리개를 통하여 노출시간이 결정된다. 이 과정에서 노출시간을 길게 하면 빛을 많이 통과시키고, 짧게 하면 작은 양의 빛을 통과시킨다. 이것은 영상 전체의 밝기를 결정하는데 중요한 역할을 한

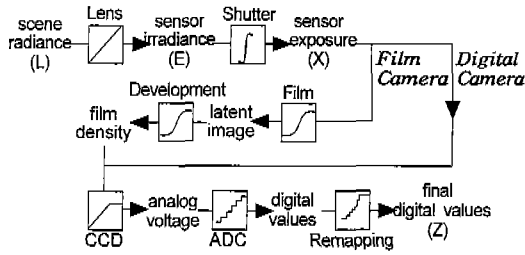


그림 2 영상 획득 파이프라인[6]

다. 그리고 조리개를 통과한 빛의 양에 따라 필름의 밀도(film density)가 결정되고, 이로부터 잠재적인 영상(latent image)을 생성한다. 잠재적인 영상은 CCD (Charge Coupled Device) 배열에 저장되고, 이것은 다시 아날로그-디지털 변환기(AD converter)에 의해 디지털 형태로 변형되고, 영상의 밝기 값으로 매핑하는 과정을 통하여 실제 디지털 영상을 얻어내게 된다.

즉, 실제 표면의 반사특성을 모델링하기 위해서 필요한 정보는 영상획득 파이프라인에서 보여주듯이 디지털 영상의 각 픽셀의 밝기가 아니라 카메라로 들어오는 실제 밝기 정보인 라디안스인 것이다. 또한 영상의 획득 파이프라인에서 조리개를 통과한 빛이 디지털영상으로 매핑하는 과정은 비 선형성(non-linearity)을 가지고 있기 때문에, 한 장의 영상에서부터 실제 렌즈를 통해 들어오는 라디안스 값을 구해내는 것은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 반사되는 빛의 양(radiance)을 구하기 위하여 카메라의 노출 시간을 변화시킨 여러 장의 영상으로부터 라디안스 영상을 구하는 방법[8]을 사용하였다.

카메라를 고정시키고 광원을 수평방향으로 0~90도, 수직방향으로 0~30도까지를 각각 10도씩 간격으로 노출시간을 다르게 하여 입력 영상을 획득한 후, 각 광원의 위치마다 라디안스 맵을 생성한다. 이때 광원의 위치를 표현하기 위해 극 좌표계를 사용하는데, 파라미터 θ 와 ϕ 는 각각 수직각과 수평각을 나타낸다. 이에 대한 알고리즘을 그림 3에 나타내었다.

```

for ( 각 광원의 위치 (  $\theta$ ,  $\phi$  ) ) {
    for ( 노출시간 ) {
        실제 카메라로부터 노출시간을 달리하여
        영상을 획득
    }
    라디안스 맵 생성
}
    
```

그림 3 라디안스 맵 샘플링 알고리즘

그림 4는 실제로 노출시간이 다른 여러 장의 영상으로부터 라디안스 맵을 생성하여 가시화한 결과를 보여 준다.

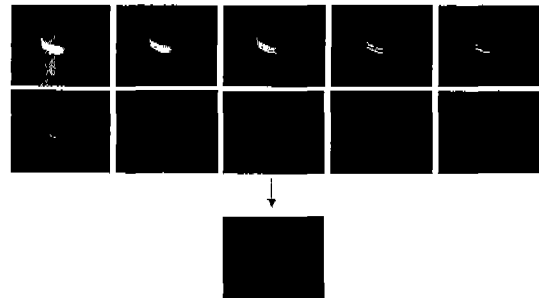


그림 4 노출시간이 다른 여러 장의 영상에서 라디안스 맵 생성

3.2 BRDF의 측정

광원 모델링의 두 번째 단계는 샘플링된 라디안스 맵으로부터 BRDF를 측정하는 작업이다. BRDF는 표면의 반사를 표현하는 가장 일반적인 형태로서, 특정한 시점에 대해서 표면 반사에 의해 생기는 라디안스를 계산하려면, 이 표면의 BRDF가 먼저 측정되어야 한다.

BRDF를 모델링하고 측정하는 방법은 다양한 연구에서 찾을 수 있다. 영상기반 렌더링 시스템에서 조도(illumination)의 다양성을 포함하는 가장 직접적인 접근 방법은 영상에서 보여지는 각 물체의 물체에 대한 BRDF를 측정하는 것이다. 그러나 이러한 접근방법은 몇 가지 단점이 있다.

합성 물체(synthetic object)의 표면에 대한 BRDF는 임의로 할당할 수 있지만, 실제 장면에서 모든 물체의 BRDF를 모두 측정한다는 것은 어려운 작업이고, 불가능한 경우도 있다. 예를 들어 장면에 자갈이 아주 많이 있는 장면의 경우, 모든 자갈에 대한 BRDF를 측정한다는 것은 실제로 불가능하다. 하나의 물체가 보여지는 장면이라 할지라도 BRDF를 측정하기 위하여 표면의 법선을 선택해야한다. 또한 이러한 방법은 장면의 복잡도에 따라서 렌더링 시간이 좌우된다.

이러한 단점을 해결하기 위하여 Wong[7]은 영상의 각 픽셀을 표면요소(surface element)로 보고 각 픽셀에 대한 BRDF를 측정하는 방법을 제안하였다. 즉, 영상 평면(image plane)을 단지 법선의 평면인 표면으로 가정하고 각 픽셀은 그 표면을 이루는 표면요소로 간주하였다. 각 표면의 요소는 다른 조도(illumination)하에

서 서로 다른 방향으로, 서로 다른 양의 라디안트 에너지(radiant energy)를 방출한다. 각 영상 평면의 픽셀의 BRDF를 기록함으로써 그 픽셀 원도를 통하여 보여지는 물체의 반사율을 획득할 수 있다. 이런 접근방법은 장면의 복잡도에 상관없이 장면의 렌더링을 가능하게 한다. 그림 5는 픽셀의 BRDF에 대한 개념을 설명한다.

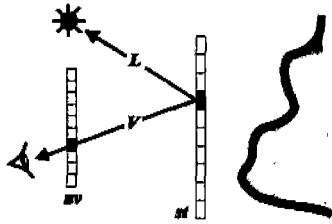


그림 5 픽셀의 BRDF측정[7]

그림 6은 실제로 영상의 밝기 정보를 이용하여 BRDF를 측정했을 때의 문제점을 분석한 그래프이다. 노출시간이 다른 각 영상에서 무작위로 2개의 픽셀을 선택하여 선택한 픽셀의 BRDF를 구한 후, 두 픽셀의 BRDF에 대한 상대적인 비율을 구하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 노출시간에 따른 BRDF의 비율은 일정하지 않음을 보여준다.

BRDF는 입사하는 빛에 대한 반사하는 빛의 비율이기 때문에 표면에 입사하는 빛의 양은 반사하는 양과 항상 비례해야만 한다. 즉, 노출시간이 변한다고 해서 BRDF가 바뀌는 것은 결코 아닌 것이다.

따라서 그래프에서 보여지는 등락은 영상의 밝기 정보로는 정확한 BRDF를 구할 수 없다는 것을 보여준다. 즉, 영상의 밝기를 가지고 BRDF를 구한다는 것은 노출 시간에 따라서 다른 BRDF를 사용하는 것을 의미하고,

노출 시간 \ 픽셀 밝기	Red	Green	Blue
1	0.87143	0.97333	0.98864
2	1.10638	0.96078	0.93651
3	0.78571	0.83871	0.79070
4	1.21053	1.04167	1.00000
5	0.72222	0.60870	0.66667
6	0.76471	1.06667	1.16667
7	1.36364	0.84615	1.14286
8	1.09091	1.00000	0.81250
9	2.00000	1.11111	0.92857
10	0.50000	0.81818	1.00000

이것은 실제 정확한 표면의 특성이 아니라는 것이다. 그러므로, BRDF를 측정하기 위해서는 본 논문에서 제시한 픽셀의 라디안스 정보를 사용하는 것이 타당하다.

실제로 BRDF는 입사한 에너지 흐름(energy flux)에 대한 표면에 반사되는 라디안스 값의 비로 정의된다. 본 논문에서는 BRDF를 측정하기 위하여 픽셀의 밝기정보 대신에 노출시간이 다른 몇 장의 영상을 가지고 만들어 낸 라디안스 값을 각 픽셀의 표면에 반사되는 빛의 양으로 사용하였다. 이는 실제 밝기를 사용함으로써 물리적으로 정확한 표면의 반사율(BRDF)을 측정할 수 있다.

본 논문은 우선 Wong의 방법에서처럼 영상평면의 각 픽셀을 표면요소로 두었다. 광원에서 들어오는 빛 L 이 영상 평면 st 에 반사되어 시점 V 방향으로 반사된다. 입사하는 광원의 라디안스를 L 이라 두고 영상의 각 픽셀의 라디안스 값을 시점 V 로 반사되는 빛의 양으로 두었다. 여기에서 BRDF는 L 과 V 의 비로 계산되어질 수 있다. 그림 7은 각 픽셀의 BRDF를 구하는 알고리즘을 나타낸다.

```

for ( 영상의 모든 픽셀 (s, t) ) {
    for ( 광원의 위치 (θ, φ) ) {
        ρ(θ, φ) =  $\frac{I_{\theta, \phi}$ 의 픽셀 (s, t)의 radiance 값}{광원의 radiance 값}
    }
}
    
```

그림 7 BRDF측정 알고리즘

본 논문에서 BRDF를 구하는 기본적인 알고리즘은 Wong의 접근방법을 근거로 하되, 물리적으로 정확한 BRDF를 얻기 위해 픽셀의 밝기 정보 대신에 라디안스 값을 사용한다. 또한 실제 영상과 라디안스 사이의 비

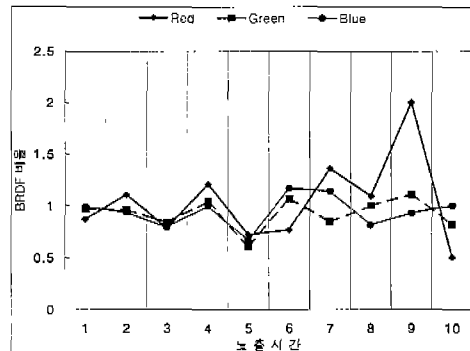


그림 6 밝기(intensity)정보를 사용한 BRDF에 대한 분석

선형적인 관계를 해결하기 위해 Debevec[8]이 제안한 방법을 사용하여 노출시간을 달리한 영상으로부터 실제 밝기 정보인 픽셀의 라디안스 맵 구함으로써 해결한다.

3.3 광원 모델링 데이터의 압축

광원 모델링의 마지막단계는 BRDF를 저장하기 위한 데이터 압축 과정이다. 본 논문에서 제시하는 광원 모델링은 영상의 각 픽셀을 표면의 요소로 다루기 때문에, 각 광원의 위치에 따른 모든 픽셀의 BRDF를 측정하여 기록하게 되면 상당히 많은 저장공간이 요구된다. 따라서 방대한 양의 BRDF를 효율적으로 표현하기 위한 새로운 방법의 도입이 필요하다.

Cabral[9]은 광원의 위치를 다르게 하여 미리 구한 BRDF를 이용하여 계수(coefficient)를 구함으로써 BRDF를 효율적으로 저장하는 방법을 제시하였다. 이 방법의 장점을 두 가지로 요약하면 다음과 같다.

첫째는 저장공간의 압축을 들 수 있다. 앞에서 언급한 것처럼 방대한 양의 BRDF를 직접 저장하는 것이 아니라, 광원의 위치와 BRDF값의 관계를 이용하여 얻은 계수만을 저장하기 때문에 많은 저장공간을 줄일 수 있다.

둘째는 광원의 위치에 따른 BRDF의 관계를 계수로 표현하였기 때문에 임의의 광원 위치에 대한 BRDF가 쉽게 계산되어질 수 있고, 빠른 장면 렌더링을 가능하게 한다.

따라서 본 논문에서는 BRDF를 저장하기 위한 수학적 인 방법으로 Cabral이 제안한 Spherical Harmonics 방법[9]을 이용한다.

식(1)은 spherical harmonics의 계수(coefficient), $C_{l,m}$ 을 구하는 식이다. 더 많은 계수를 구할수록 더 정확한 BRDF를 측정할 수가 있는데, 16개에서 25개의 계수만으로도 충분히 BRDF를 계산할 수 있음을 실험을 통해 알 수 있었다.

$$C_{l,m} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \rho(\theta, \phi) Y_{l,m}(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (1)$$

$$Y_{l,m}(\theta, \phi) = \begin{cases} N_{l,m} P_{l,m}(\cos\theta) \cos(m\phi) & \text{if } m > 0 \\ N_{l,0} P_{l,0}(\cos\theta) / \sqrt{2} & \text{if } m = 0 \\ N_{l,m} P_{l,|m|}(\cos\theta) \sin(|m|\phi) & \text{if } m < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{l,m} = \sqrt{\frac{2l+1}{2\phi} \cdot \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}} \quad (3)$$

$$P_{l,m}(x) = \begin{cases} (l-2m)\sqrt{1-x^2}P_{m-1,m-1}(x) & \text{if } l = m \\ x(2m+1)P_{m,m}(x) & \text{if } l = m+1 \\ x \frac{2l-1}{l-m} P_{l-1,m}(x) - \frac{l+m-1}{l-m} P_{l-2,m}(x) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{0,0}(x) = 1 \quad (5)$$

식(6)은 임의의 위치 (θ, ϕ) 에 대한 BRDF를 구하는 것을 나타낸다. 이것을 통해서 새로운 위치에서의 광원에 대한 라디안스 맵을 재구성(reconstruction)할 수 있다.

$$\rho(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l C_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi) \quad (6)$$

여기서 $C_{l,m}$ 은 spherical harmonics에서 저장한 계수이고, $Y_{l,m}(\theta, \phi)$ 은 식(2)를 통하여 구할 수 있다. 즉, 계수 $C_{l,m}$ 만을 저장하고 있으면 임의의 광원 위치에 따른 픽셀의 BRDF를 구할 수 있다.

4. 장면 렌더링(Scene rendering)

본 장에서는 광원 모델링이 끝난 후, 광원의 위치나 종류에 따른 장면을 생성하기 위한 재구성 단계에 대하여 기술한다. 먼저 임의의 광원에 대하여 빛의 세기와 광원의 위치가 주어지면 모델링의 세 번째 단계에서 구한 계수를 이용하여 BRDF를 복원하고, 이를 이용하여 새로운 광원에 대한 라디안스 맵을 재구성하는 작업을 수행하게 된다. 새로운 라디안스 맵은 톤 매핑(tone mapping)방법을 통하여 실제 RGB영상을 만들게 된다. 이에 관한 블록 다이어그램을 그림 8에 나타내었다.

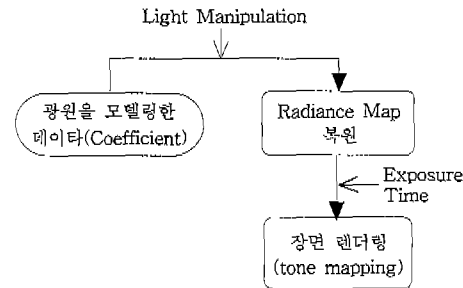


그림 8 장면 렌더링의 블록 다이어그램

4.1 라디안스 맵 복원

3.3절에서 다루었던 spherical harmonics 방법으로 구한 BRDF와 식(7)을 사용하여 라디안스 맵을 재구성할 수 있다. 식(7)은 하나의 광원에 대하여 라디안스를 구하는 식이다.

$$L_{s,t} = \rho_{s,t}(\theta, \phi) \times E \quad (7)$$

$L_{s,t}$ 는 픽셀(s, t)의 라디안스를 의미하고 $\rho_{s,t}(\theta, \phi)$ 는 광원의 위치 (θ, ϕ) 에 대한 BRDF를, E 는 광원의 라디안스를 나타낸다. $\rho_{s,t}(\theta, \phi)$ 는 식(6)으로부터 구할 수 있고, $\rho_{s,t}(\theta, \phi)$ 와 광원의 라디안스(E)를 곱

하여 광원에 대한 픽셀 (s, t) 에서의 라디안스 값을 구할 수 있다.

가. n 개의 광원에 대한 라디안스 맵 복원

만일 n 개의 광원이 동시에 물체를 비출 때 반사되는 라디안스는 각 광원에 대하여 누적되는 값을 가진다. 즉, 식(8)과 같이 n 개의 광원에 대한 픽셀의 라디안스는 각 광원에 대해 표면에 반사되는 라디안스를 구하고 이를 합하여 계산할 수 있다.

$$L_{s,t} = \sum_{i=1}^n \rho_{s,t}(\theta_i, \phi_i) \times E_i \quad (8)$$

나. 광원의 세기에 따른 라디안스 맵 복원

식(7)에서 표면의 반사율 BRDF는 고정시켜 놓고 광원의 세기(E)를 조절함으로써 광원의 세기에 따른 라디안스를 구할 수 있다.

4.2 톤 매핑(tonemapping)

앞 절에서 구한 라디안스 맵은 실제 밝기 정보를 나타낸다. 여기서는 라디안스 맵을 실제 화면에 보이는 영상으로 바꾸기 위하여 톤 매핑 방법을 사용한다. 재구성된 라디안스 맵은 넓은 범위(high dynamic range)의 값을 가지고 있다. 이 넓은 범위의 라디안스 값을 좁은 범위의 화면의 밝기로 바꾸어주는 것을 톤 매핑이라 한다. 실제밝기를 화면의 밝기로 바꾸어주기 위해서는 두 가지 사항을 고려해야 하는데, 가시화(visibility)와 명암대조(contrast)가 그것이다. 즉, 실제세계에서 보여지는 물체는 화면을 통해서도 보여져야하고, 실제밝기는 넓은 범위의 밝기 값을 가지기 때문에 좁은 범위의 화면의 밝기로 바꾸어 줄 때 밝은 부분에 대해서는 명암의 대조가 필요하다는 뜻이다.

본 논문에서는 이 두 가지를 만족시켜주기 위해서 적응성 히스토그램(adaptive histogram)방법[10]을 사용한다. 먼저 라디안스 맵으로부터 각도 1도에 해당되는 각 픽셀의 평균을 실제밝기로 표본을 추출하여 각 밝기 레벨마다의 빈도 수(population)를 계산하고 히스토그램을 생성한다. 이 히스토그램을 이용하여 누적분포함수(cumulative distribution function)를 생성한다. 누적합수 $f(b)$ 는 식(9)에 나타나 있다.

$$f(b) = \frac{\sum_{b_i \leq b} b_i}{T} \quad (9)$$

$$T = \sum_i f(b_i)$$

이렇게 생성한 누적함수를 식(10)을 이용하여 히스토그램 평탄화(histogram equalization)과정을 통하여 화면의 밝기를 구해낸다.

$$B_{de} = \log(L_{dmin}) + [\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})] \cdot F(B_u) \quad (10)$$

히스토그램 평탄화 작업을 통하여 밝기분포를 넓히게 되고 대조(contrast)를 높이게 된다. 이 과정을 하기 전에 명암의 대조를 높이기 위하여 선형한계(linear ceiling)를 결정한다.

위에서 히스토그램을 구할 때 각 레벨의 빈도 수는 선형매핑(linear mapping)의 빈도 수 보다 작아야한다. 식(11)은 히스토그램의 임계값(threshold)으로 사용할 선형한계의 빈도 수를 나타내는 식이다.

$$f(b) \leq \frac{T \Delta b}{\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})} \quad (11)$$

실험에서, 이를 이용하여 히스토그램 빈도수의 한계를 결정하고 히스토그램을 다시 생성한 후, 식(10)을 적용하여 화면의 밝기를 구해낸다.

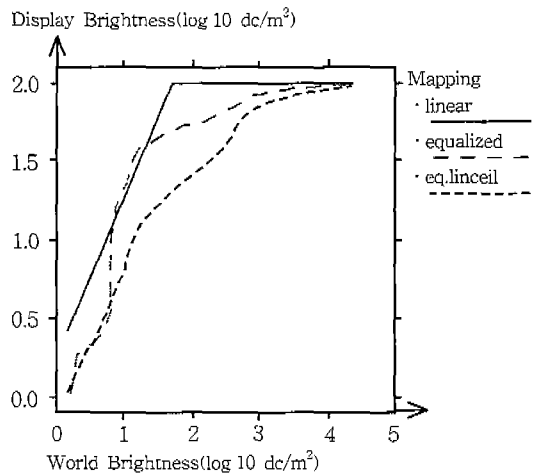


그림 9 톤 매핑 방법의 비교[10]

그림 9는 선형매핑, 히스토그램 평탄화, 선형한계를 사용한 히스토그램 평탄화 작업을 비교한 것이다. 붉은 점선은 선형매핑을 나타내고 긴 점선은 히스토그램 평탄화를 나타내며, 가는 점선은 선형한계를 이용한 히스토그램 평탄화를 나타낸다. 선형 매핑의 경우 특정밝기 이상의 값은 같은 화면 밝기로 매핑된다. 즉 실제 밝기에서 화면밝기의 범위를 벗어나는 부분은 화면의 최대 밝기로 매핑되기 때문에 밝은 부분의 대조가 나타나지 않는다.

본 논문에서는 라디안스 맵에서 장면영상을 만들어내는 방법으로 앞에서 설명한 적응성 히스토그램을 사용하였다. 이 방법을 통하여 대조와 가시화를 잘 표현할 수 있었다.

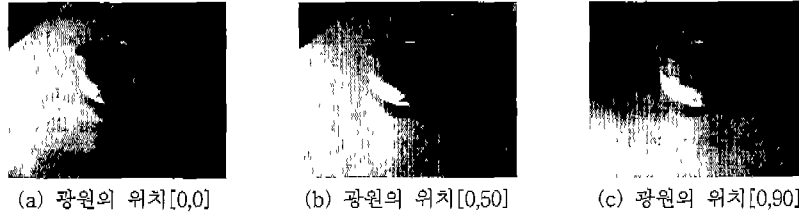
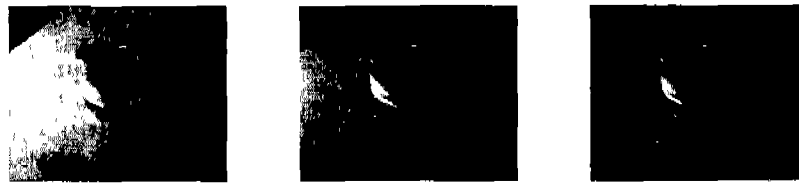


그림 10 광원의 위치에 따른 영상의 복원



(a) BLUE성분을 점차로 가미한 광원에 대한 영상 복원



(b) RED성분을 점차로 가미한 광원에 대한 영상 복원

그림 11 다른 성분의 광원에 대한 영상 복원

5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 시스템은 Windows NT에서 Microsoft Visual C++6.0 을 사용하여 구현하였다. 또한 디지털 카메라를 고정시키고 광원을 수평방향으로 0~90도, 수직방향으로 0~30도까지를 각각 10도씩 간격으로 입력 영상을 획득한 후, 각 광원의 위치마다 노출시간을 다르게 하여 획득한 10개의 영상으로부터 라디안스 맵을 샘플링하여 실험에 이용하였다.

그림 10은 광원의 위치에 따라 복원된 결과 영상을 보여준다. (a) 및 (b), (c) 영상은 광원의 위치를 수직으로 0도를 유지하고, 수평으로 0도 및 30도, 90도에서 각각 복원한 영상이다.

그림 11의 (a)와 (b)영상은 각각 광원에 BLUE성분과 RED성분을 추가하여 복원한 영상이다. 실험에서 보여 주듯이 본 논문에서 제시한 방법을 통하여 임의의 위치에 있는 광원에 대해 영상을 복원할 수 있을 뿐만 아니라, 광원의 색깔까지도 변화시킬 수 있다.

그림 12는 광원의 위치와 세기가 고정되어 있을 때, 노출시간을 달리한 영상을 복원한 결과를 보여준다.

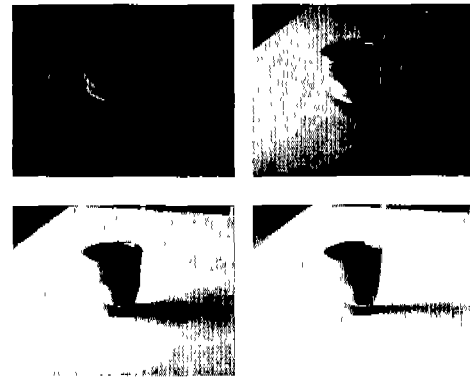


그림 12 노출시간에 따른 복원 영상

6. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 기하학적인 정보 없이 광원에 대해 미리 샘플링한 영상으로부터 광원의 위치 및 카메라의 노출시간에 따른 영상 복원이 가능한 광원 모델링 방법을 제시하였다.

Wong의 실험에서 합성영상(synthetic image)에 대해서 각 픽셀을 표면 요소로 보고, 이를 표면의 반사 특성을 나타내는 라디안스 값으로 생각하였으나, 본 논문에서는 카메라의 노출시간을 달리한 실제 영상(real image)으로부터 얻은 라디안스 정보를 이용하여 표면의 반사 특성을 구하였다.

또한 상당량의 BRDF를 spherical harmonics 압축 기법을 이용하여 효율적으로 BRDF를 표현하였기 때문에 임의의 위치에서의 광원에 대해 빠르게 영상을 복원할 수 있다. 실험결과에서 보여주듯이 광원에 대한 다양한 조각이 가능하기 때문에, 위치가 다른 몇 개의 광원에 대하여도 영상을 재구성(reconstruction)할 수 있을 뿐만 아니라, 구해진 라디안스 맵을 이용하여 노출시간을 조절할 수 있다는 특징을 가진다.

향후 연구과제로는 웨이블릿(wavelet)이나 DCT를 이용한 압축 기법을 통한 BRDF를 저장 방법에 관한 연구가 남아있고, 광원 모델링의 객체를 물체(object)에만 한정하는 것이 아니라, 일반적인 환경 맵(environment map)에 BRDF를 적용해보는 시도가 필요하다. 또한 실제로 라디안스를 구하는 장비를 이용하여 측정된 값과 영상으로부터 얻은 라디안스 값의 비교 분석도 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] G. J. Ward, "Measuring and Modeling Anisotropic Reflection," In SIGGRAPH '92, pp. 65-76, July 1992.
- [2] X. D. He, K. E. Torrance, F. Sillion and D. P. Greenberg, "A Comprehensive Physical Model for Light Reflection," In SIGGRAPH '91, August 1991.
- [3] M. Oren and S. K. Nayar, "Generalization of Lambert's Reflectance Model," In SIGGRAPH '94, pp. 239-246, 1994.
- [4] E. P. E. Lafortune, S. Foo, K. E. Torrance and D. P. Greenberg, "Non-Linear Approximation of Reflectance Functions," In SIGGRAPH '97, pp. 117-126, 1997.
- [5] K. F. Karner, H. Mayer and M. Gervautz, "An Image Based Measurement System for Anisotropic Reflectance," In EUROGRAPHICS Annual Conference Proceedings, 1996.
- [6] P. E. Debevec and M. Jitendra, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," In SIGGRAPH '97, pp. 369-378, August 1997.
- [7] T. T. Wong, P. A. Heng, S. H. Or and W. Y. Ng, "Image-Based Rendering with Controllable Illumination," In 8th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering, pp. 13-22, June 1997.
- [8] P. E. Debevec, "Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography," In SIGGRAPH '98, pp. 189-198, July 1998.
- [9] B. Cabral, M. Nelson and S. Rebecca, "Bidirectional Reflection Functions from Surface Bump Maps," In SIGGRAPH '87, vol. 21, pp. 273-281, July 1987.
- [10] G. J. Ward, H. Rushmeier and C. Piatko, "A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes," Technical Report, LBNL-39882, Lawrence Berkely National Laboratory, March 1997.



김 모 곤

1998년 경일대학교 전자계산학과 졸업(학사). 2000년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(석사). 2000년 ~ 현재 경북대학교 컴퓨터공학과 박사 과정 재학중. 관심분야는 Image-Based Modeling and Rendering, Computer Vision, Computer Graphics, Virtual Reality



김 성 진

1999년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사). 2001년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 (주)에이알비전 재직중. 관심분야는 Image-Based Modeling and Rendering, Motion Capture, Multimedia Streaming, Computer Graphics.



정 순 기

1990년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사). 1992년 한국과학기술원 전산학과 졸업(석사). 1997년 한국과학기술원 전산학과 졸업(박사). 1997년 ~ 1998년 University of Maryland, Visiting Researcher. 1998년 ~ 현재 경북대학교 컴퓨터공학과 조교수. 관심분야는 Virtual Reality, Artificial Intelligence, Computer Vision, Image Processing, Computer Graphics.