

Local Illumination

230302 19101188 고은수

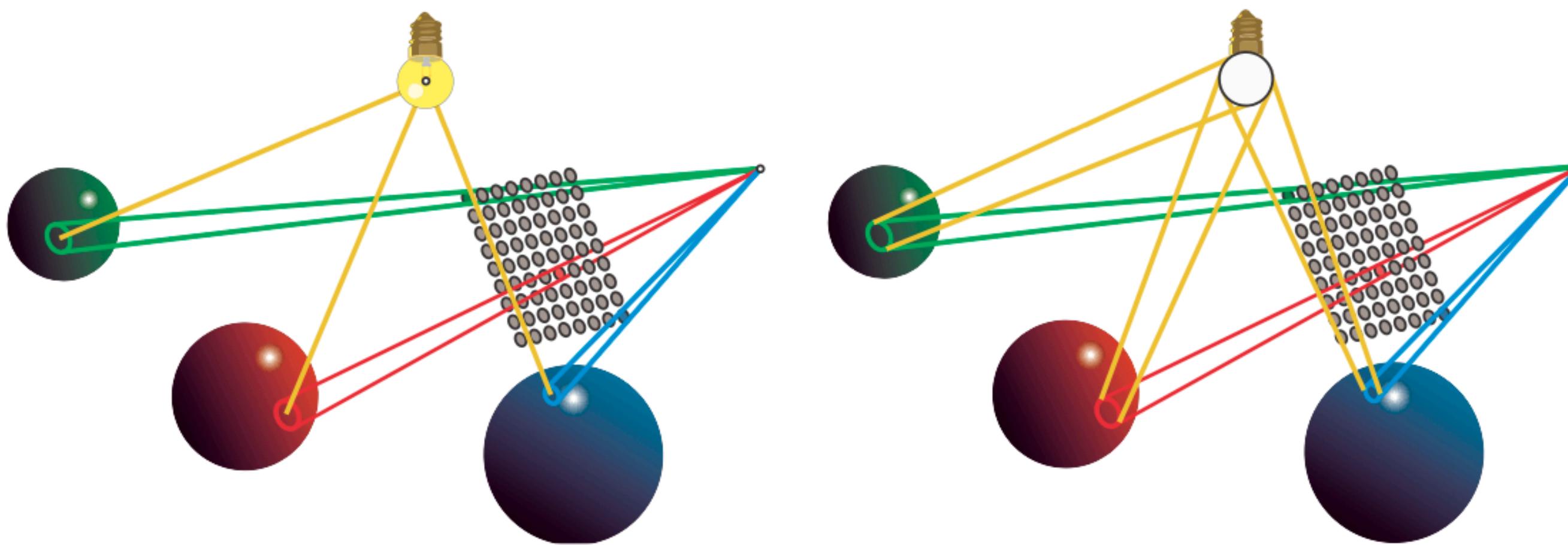
Contents

1. Area Light Sources
2. Environment Lighting
3. Spherical and Hemispherical Functions
4. Environment Mapping
5. Specular Image-Based Lighting
6. Irradiance Environment Mapping
7. Sources of Error

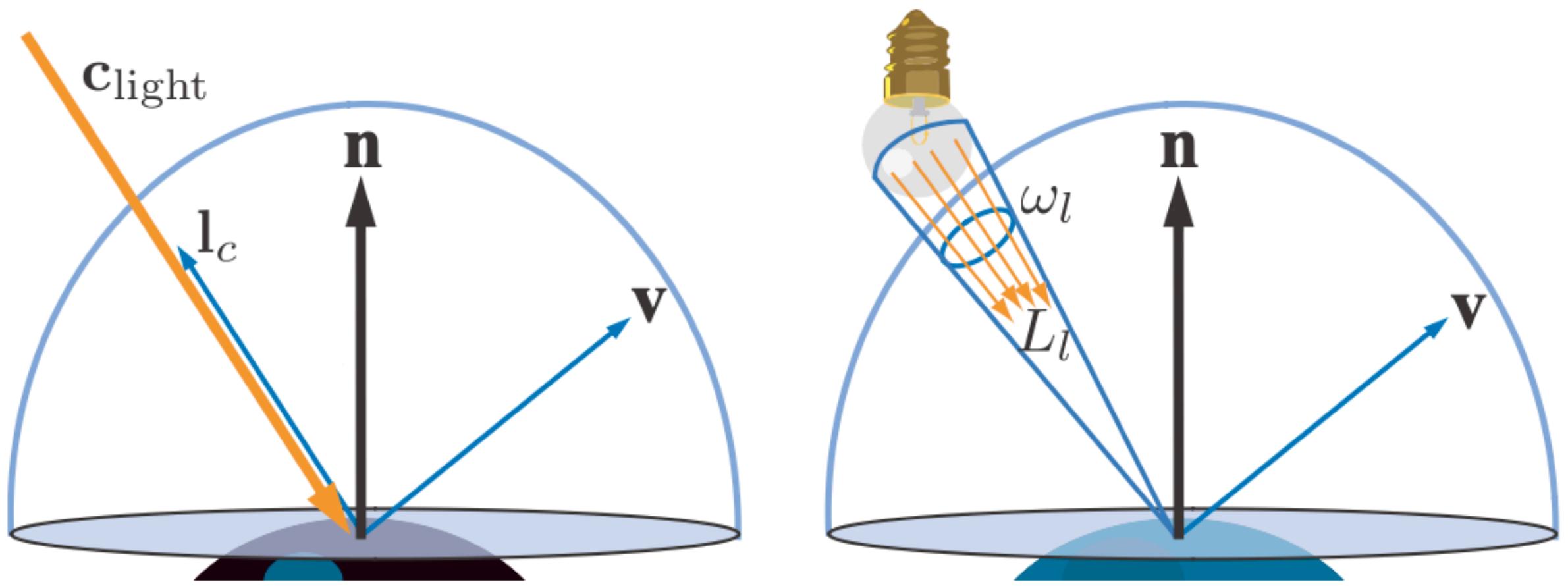
Local Illumination

이전까지는 소수의 이산 방향으로부터 빛을 받는 표면을 제한하는 점 및 방향 광원의 효과만 제시되었다. 실제 조명은 punctual 하지 않다.

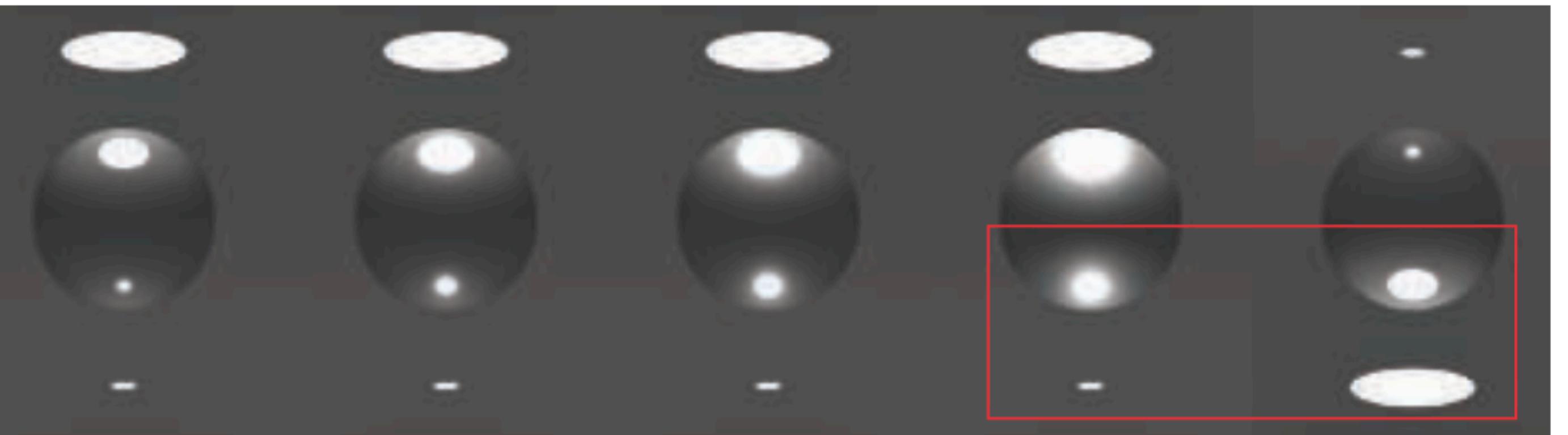
보다 현실적인 조명 모델을 형성하기 위해 BRDF를 계산하여 쉐이딩 모델을 확장하고 경제적인 솔루션을 찾기 위해 light emitter와 BRDF에 대한 근사치를 필요로 한다.



Area Light Sources



$$L_o(\mathbf{v}) = \int_{\mathbf{l} \in \omega_l} f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_l(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})^+ d\mathbf{l} \approx \pi f(\mathbf{l}_c, \mathbf{v}) \mathbf{c}_{\text{light}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_c)^+.$$



Area Light Sources

영역 조명의 하이라이트는 punctual lights를 사용하고 표면 거칠기를 증가시킴으로써 근사치를 얻을 수 있다. 이는 면적 광 적분에 대한 근사치를 도출하는데 유용하지만 조명 시나리오를 변경할 때 material 특성과 특정 조명 설정을 결합하기 때문에 작성된 내용이 올바르게 표시되지 않는다.

Lambert surface(모든 방향에서 보아도 똑같은 밝기로 보이는 표면)의 특수한 경우 영역 조명에 점광을 사용하는 것이 정확할 수 있다.

$$L_o(\mathbf{v}) = \frac{\rho_{ss}}{\pi} E,$$

$$E = \int_{\mathbf{l} \in \omega_l} L_l (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})^+ d\mathbf{l} \approx \pi \mathbf{c}_{light} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_c)^+$$

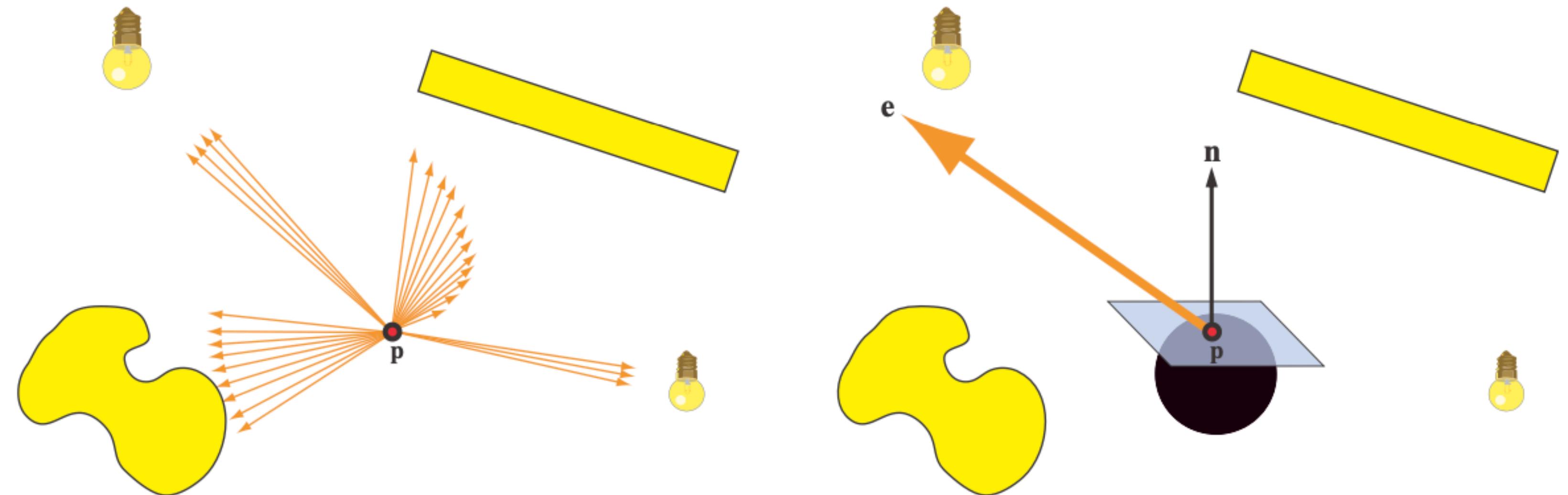
Area Light Sources

Vector irradiance의 개념은 영역 광원이 있는 상태에서 irradiance가 어떻게 작동하는지 이해하는데 유용하다.
Vector irradiance를 이용하면 임의의 면적 광원을 정확하게 점 또는 방향 광원으로 변환 할 수 있다.

$$\mathbf{e}(\mathbf{p}) = \int_{\mathbf{l} \in \Theta} L_i(\mathbf{p}, \mathbf{l}) \mathbf{l} d\mathbf{l},$$

$$E(\mathbf{p}, \mathbf{n}) - E(\mathbf{p}, -\mathbf{n}) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}(\mathbf{p}),$$

$$E(\mathbf{p}, \mathbf{n}) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}(\mathbf{p}).$$



Area Light Sources

단일 영역 광원의 vector irradiance 는 n 이 영역 광원의 어떤 부분으로부터 90도 이상 떨어져 향하지 않는 한 임의의 정상 n 으로 램버트 표면을 조명하기 위해 방정식 $E(p, n) = n \cdot e(p)$. 과 함께 사용할 수 있다.

만약 L_i 가 파장 독립적이라는 가정이 유지되지 않는다면, 일반적인 경우에 우리는 더 이상 단일 벡터 e 를 정의할 수 없다. 그러나 색광은 종종 모든 지점에서 동일한 상대 스펙트럼 분포를 가지며 방향 광원의 조사 조도를 계산하는 데 사용되는 것과 동일한 방정식을 얻을 수 있다.

$$l_c = \frac{e(p)}{\|e(p)\|},$$

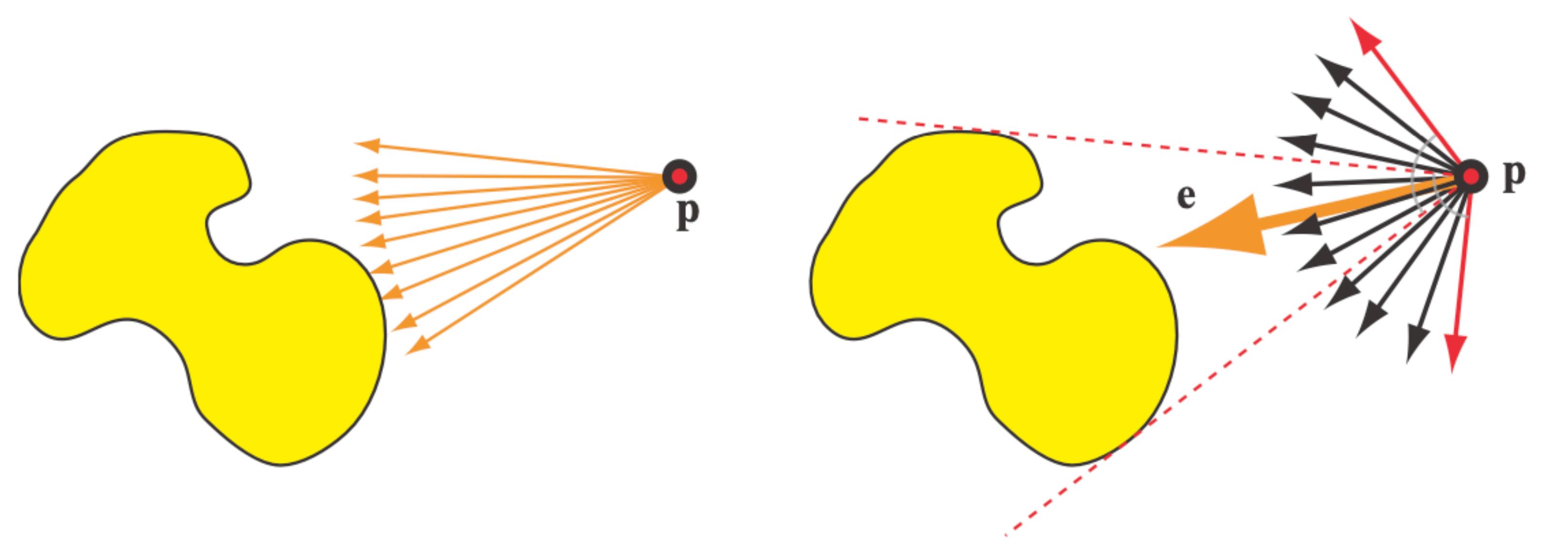
$$c_{\text{light}} = c' \frac{\|e(p)\|}{\pi}.$$

$$l_c = \frac{p_l - p}{\|p_l - p\|},$$

$$c_{\text{light}} = \frac{r_l^2}{\|p_l - p\|^2} L_l.$$

$$E = \pi c_{\text{light}} \left(\frac{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) + k_{\text{wrap}}}{1 + k_{\text{wrap}}} \right)^+$$

$$E = \pi c_{\text{light}} \left(\frac{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) + 1}{2} \right)^2$$

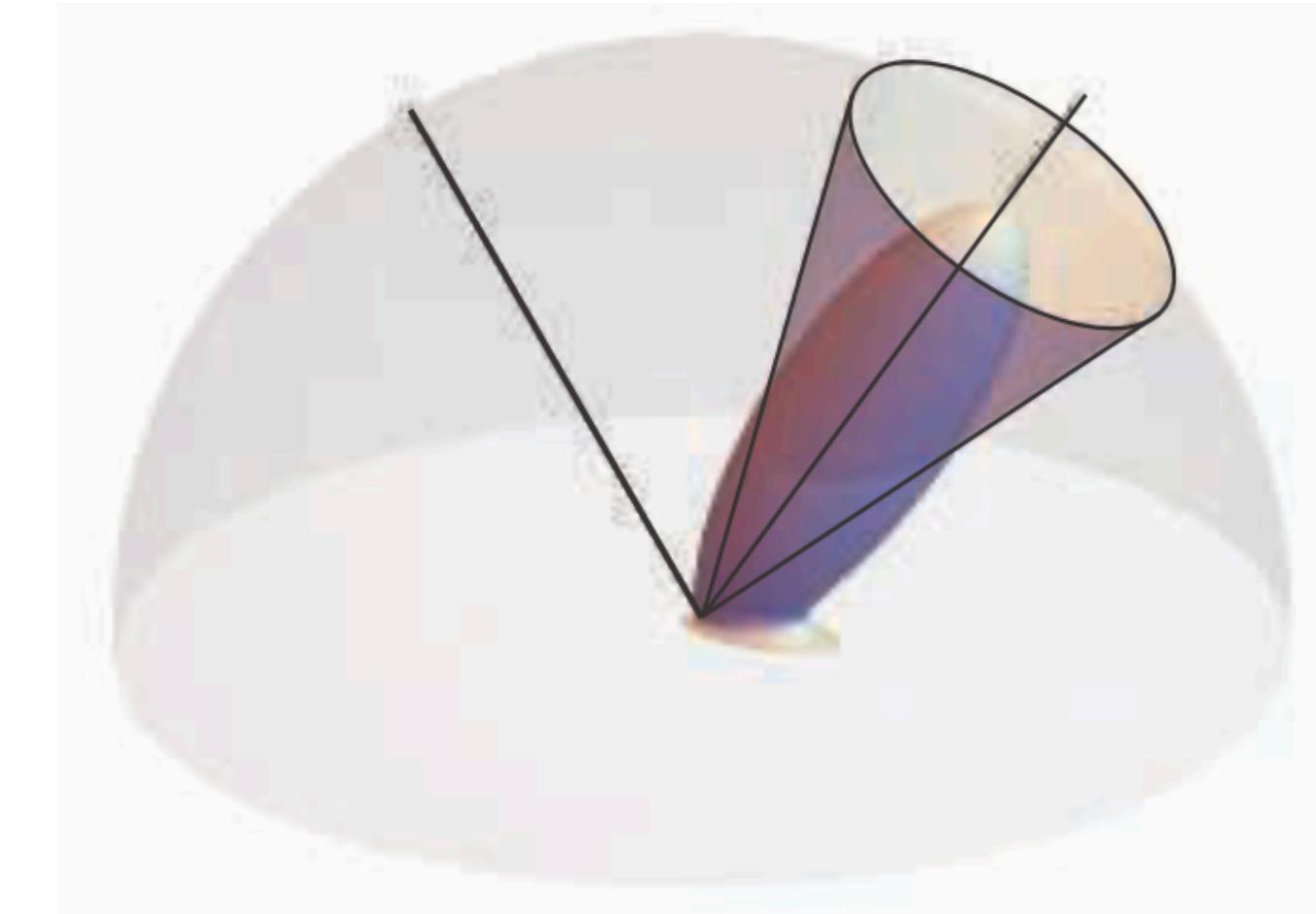


Area Light Sources

Glossy Materials

Glossy material의 표면에 대한 영역 조명의 주요 시각적 효과는 하이라이트이다. 하이라이트 계산의 결과를 수정하여 큰 평평한 하이라이트 영역을 생성하는 컷오프 임계값을 통합할 수 있다.

실시간 렌더링을 위한 영역 조명 효과의 대부분의 실제 근사치는 무한하지 않은 광원의 효과를 모방할 수 있는 동등한 시간 조명 설정을 shading 지점별로 찾는 아이디어에 기초한다.

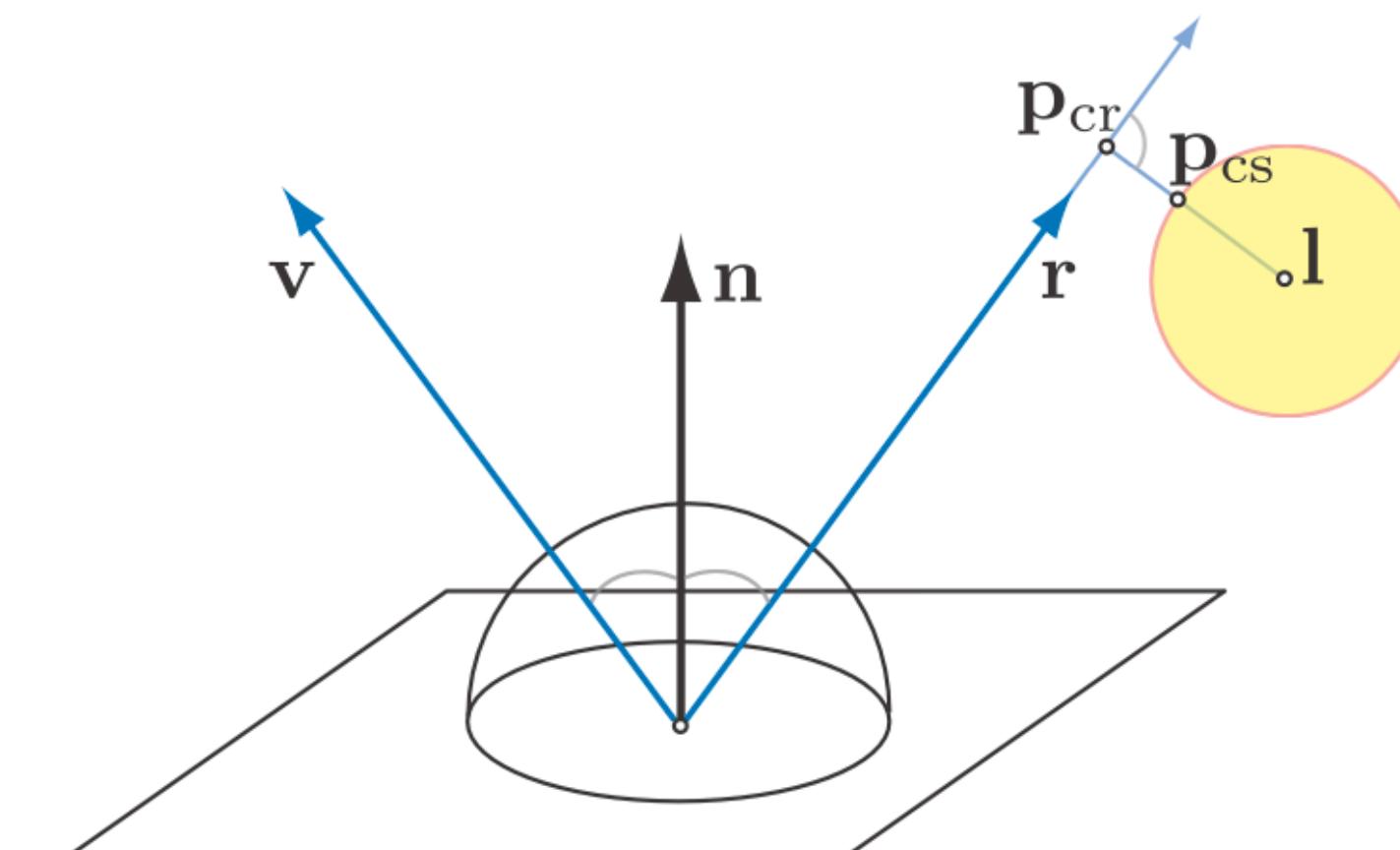


$$\alpha'_g = \left(\alpha_g + \frac{r_l}{2\|\mathbf{p}_l - \mathbf{p}\|} \right)^+$$

Area Light Sources

0과 1 사이의 클램핑에 대한 x_2 표기법의 사용에서 이 근사치는 광택이 나는 material에 대해서는 적용되지 않는다. 또한 대부분의 마이크로페이스 BRDF 모델은 compact(국소화) 하지 않지만 넓은 낙하(specular tail)를 나타내는 lobe을 가지고 있어 거칠기 재맵핑의 효과가 적다.

material의 거칠기를 변화시키는 대신에, 다른 아이디어는 shading 처리되는 점에 따라 변화하는 빛의 방향으로 영역 조명의 소스를 표현하는 것이다. 빛 벡터를 수정하여 shading 처리된 표면을 향해 가장 큰 에너지 기여를 생성하는 영역 빛 표면의 점 방향으로 한다.



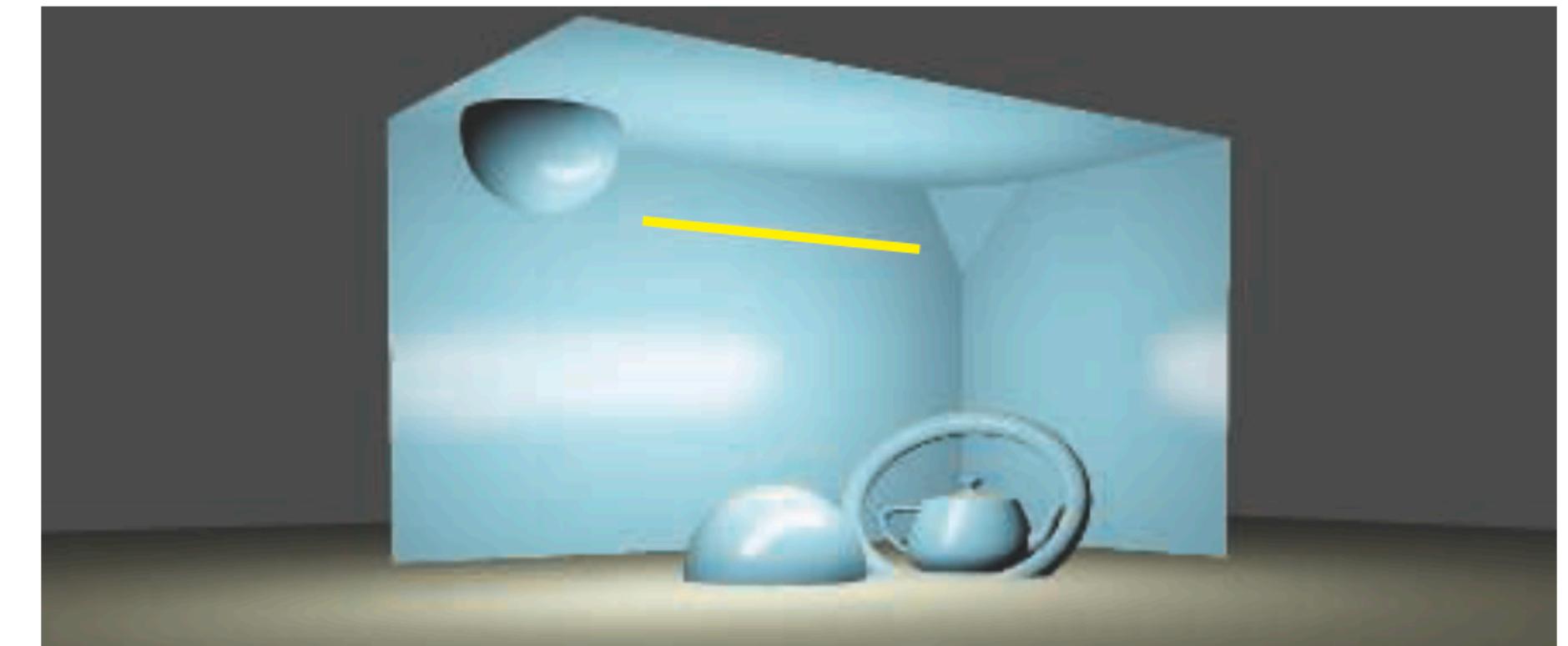
$$\int_D f(x)dx = f(c) \int_D 1.$$

Area Light Sources

General Light Shapes

실제 빛은 보통 구체가 아니며 완벽한 균일한 방출체가 될 수 없다. 구형 광원은 일반적으로 대부분의 실제 조명 기구가 상대적으로 작은 경우에만 좋은 근사체이다.

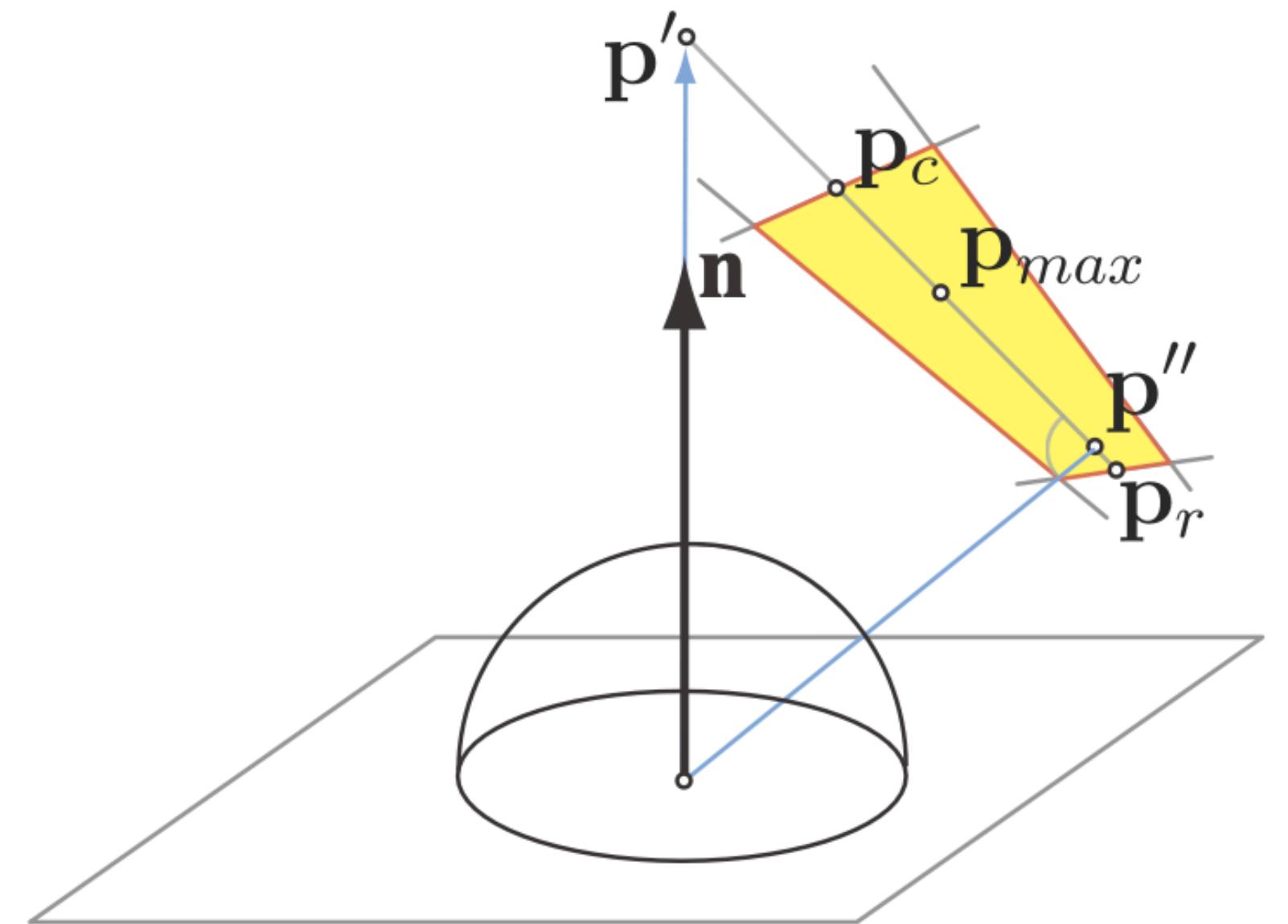
일반적으로 가정을 단순화하는 더 쉬운 문제에 대한 정확한 해결책을 생성하거나 현실을 더 깊게 모델링하는 더 일반적인 문제에 대한 대략적인 해결책을 도출 할 수 있다. (구형 조명에 대한 가장 간단한 확장 중 하나인 튜브조명)



$$\int_{\mathbf{p}_0}^{\mathbf{p}_1} \left(\mathbf{n} \cdot \frac{\mathbf{x}}{\|\mathbf{x}\|} \right) \frac{1}{\|\mathbf{x}\|^2} d\mathbf{x} = \frac{\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}_0}{\|\mathbf{p}_0\|^2} + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}_1}{\|\mathbf{p}_1\|^2}}{\|\mathbf{p}_0\| \|\mathbf{p}_1\| + (\mathbf{p}_0 \cdot \mathbf{p}_1)},$$

Area Light Sources

직사각형(카드 조명)과 같은 원시 요소들은 훨씬 더 복잡한 조명 기구의 조리개를 모델링하거나 장면의 벽과 같은 다른 큰 표면에서 반사되는 조명을 표현하는데 사용될 수 있다. 카드 조명에 대한 최초의 실용적인 근사치는 Drobot에 의해 도출되었다.



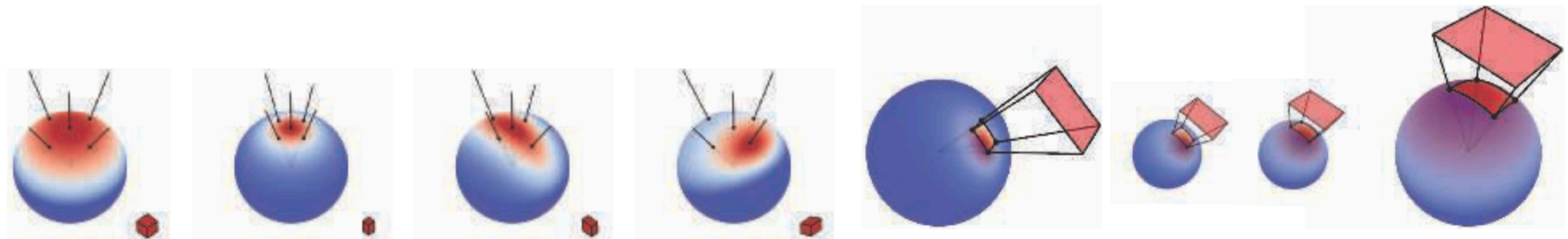
$$L_l \int_{l \in \omega_l} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})^+ \frac{1}{r_1^2} d\mathbf{l},$$

Area Light Sources

Drobot, Mittring, Arvo 등이 설명한 모든 실용적인 실시간 영역 조명 방법은 분석 구성 및 근사치의 도출이 결과 적분을 처리할 수 있도록 특정 단순화 과정을 모두 사용한다.

Heitz는 선형 변환 코사인(LTC)으로 다른 접근 방식을 취한다. 3x3 변환 행렬을 사용하여 간단한 코사인 로브를 쉽게 스케일링하고 확장하고 왜곡할 수 있다.

LTC와 구형 다각형 도메인이 주어지면 LTC행렬의 역으로 둘 다 변환하여 간단한 코사인 로브와 새로운 도메인을 얻을 수 있다. 선형 변환 코사인 기반 솔루션은 일반적인 질감의 다각형 영역 광원과 카드, 디스크 및 라인 조명과 같은 특수하고 계산하기 저렴한 모양 모두에 대해 도출된다. 대표적인 포인트 솔루션보다 더 비쌀 수 있지만 훨씬 정확하다.



Environment Lighting

원칙적으로 반사율은 광원에서 직접 도달하는 빛과 하늘에서 산란된 간접적인 빛 또는 장면의 물체를 구분하지 않는다. 그러나 실제로 직사광선은 일반적으로 고휘도 값을 가진 상대적으로 작은 입체각으로 구별되며, 간접광은 중간에서 저휘도 값을 가진 나머지 반구를 확산적으로 덮는 경향이 있다.

가능한 모든 들어오는 방향에 대해 다양한 함수에 의해 정의된 방사를 통합해야 한다. Shading 알고리즘이 가지는 유일한 정보는 광원에 관한 것이고, 모든 shading은 로컬에서 수행된다.

많은 표면점들이 들어오는 방향의 일부를 다른 물체나 같은 물체의 다른 부분에 의해 보는 것을 차단시키는 단순화는 일반적으로 사실성을 감소시키고, 폐색을 무시할 때 극도로 평평하게 보이는 조명에서 특히 두드러진다.

$$L_o(\mathbf{v}) = \frac{\rho_{ss}}{\pi} L_A \int_{\mathbf{l} \in \Omega} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l} = \rho_{ss} L_A.$$

$$L_o(\mathbf{v}) = L_A \int_{\mathbf{l} \in \Omega} f(\mathbf{l}, \mathbf{v})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l}.$$



Spherical and Hemispherical Functions

환경 조명을 확장하기 위해, 우리는 어떤 방향에서 물체로 들어오는 방사광을 표현하는 방법이 필요하다. 먼저, 방사광이 표면 위치가 아닌 통합되는 방향의 함수라고 생각한다. 이는 조명 환경이 무한히 멀다는 가정 하에 작동한다. 주어진 지점에 도달하는 방사광은 들어오는 방향에 따라 다를 수 있는데 이는 단위 구면의 표면 또는 R^3 의 방향 공간에 정의된 구면 함수로 나타낼 수 있다.

이러한 표현을 구면 기저라고 부르고 함수를 주어진 표현으로 변환하는 것을 투영, 주어진 표현에서 함수의 값을 평가하는 것을 재구성이라고 한다.

Spherical and Hemispherical Functions

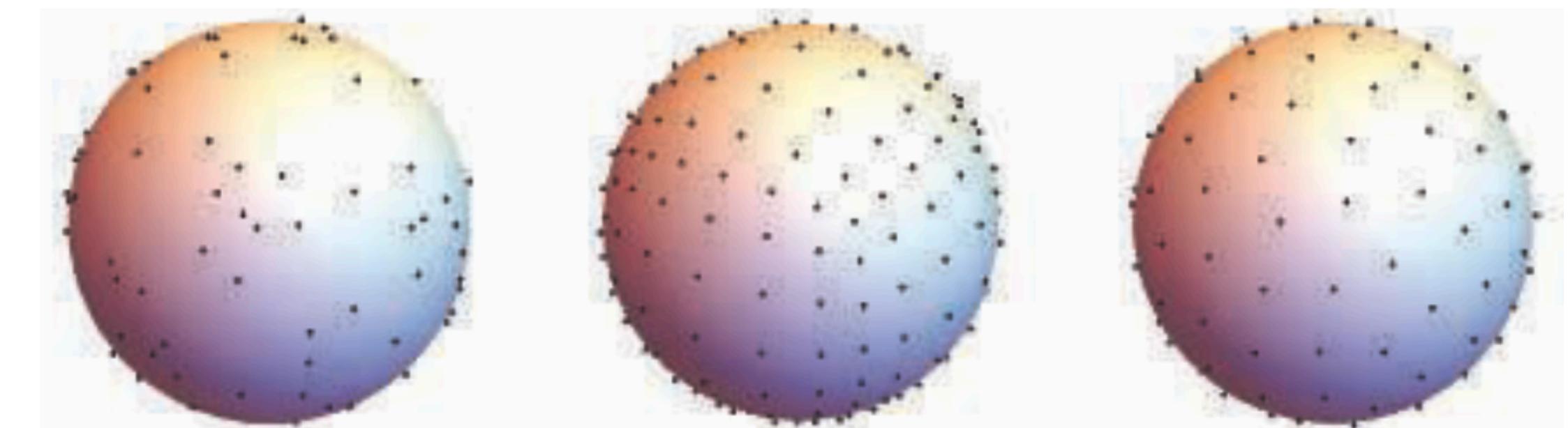
Simple Tabulated Forms

구면 함수를 표현하는 가장 간단한 방법은 여러 방향을 선택하고 각각의 값을 저장하는 것이다. 가장 일반적인 기술은 먼저 구를 직사각형 영역으로 푼 다음 점들의 격자로 영역을 샘플링하는 것이다.

Tabulated form의 단점은 낮은 해상도에서 하드웨어 필터링에 의해 제공되는 품질은 종종 허용되지 않는다는 점이다. 조명을 다룰 때 convolution 계산의 계산 복잡성은 샘플의 수에 비례하여 금지될 수 있다. 또한 회전 하에서 투영은 불변하지 않으며 이는 특정 분야에서 문제가 될 수 있다.

일반적으로 많은 데이터 포인트를 낮은 오류로 인코딩 해야 하는 복잡하고 고주파 함수를 저장해야 할 때 tabulated form이 사용된다. Ambient cube는 주요 축을 따라 방향을 맞춘 6개의 정사각형 코사인 로브로 구성된 가장 간단한 tabulated form이다.

$$F_{AC}(\mathbf{d}) = \mathbf{d} \cdot \mathbf{d} \cdot \text{sel}_+(\mathbf{c}_+, \mathbf{c}_-, \mathbf{d}),$$



Spherical and Hemispherical Functions

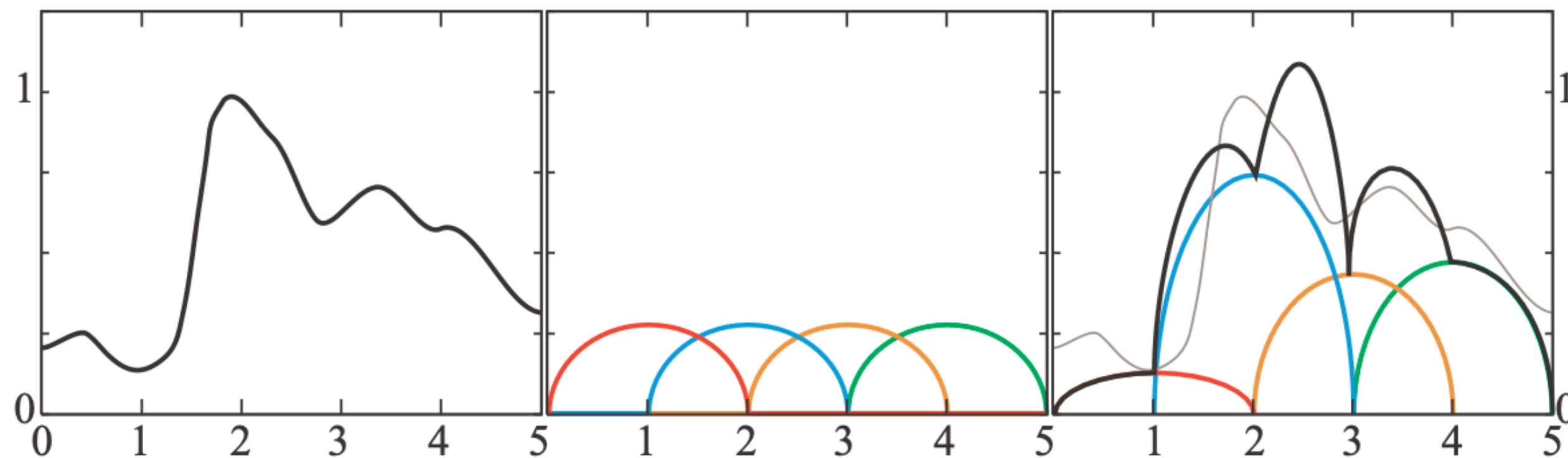
Spherical Bases

우리가 필요한 것은 변경할 수 있는 몇 가지 매개 변수를 가진 구면 영역에 걸친 수학적 표현이다. 그런 다음 오류를 최소화 하는 매개 변수의 값을 찾아 원하는 모든 함수를 근사화 할 수 있다.

$$F_c(\theta, \phi) = c \cdot 1.$$

$$F_{\text{hemi}}(\theta, \phi) = a + \frac{\cos(\theta) + 1}{2}(b - a),$$

일반적으로 우리가 함수 공간의 기초에 대해 이야기 할 때 우리는 주어진 영역에 걸쳐 다른 함수들을 나타내기 위해 선형 결합이 사용될 수 있는 함수들의 집합을 가지고 있다.



Spherical and Hemispherical Functions

구면의 함수를 근사화하는 데 사용할 수 있는 몇 가지 기본 옵션이 있다.

Spherical Radial Basis Functions

GPU 하드웨어 필터링을 사용하는 tabulated form의 낮은 재구성 품질은 적어도 어느 정도 샘플을 보간하는데 사용되는 이중 선형 모양 함수에 의해 발생한다. 더 높은 품질의 결과를 생성하기 위해 사용되는 함수 중 하나는 spherical radial basis function(SRBF) 이다. 기저는 구에 걸쳐 퍼져있는 lobe 의해 형성되고 함수의 표현은 각 lobe에 대한 매개 변수 집합으로 구성된다. 주어진 방향에 대한 모든 lobe를 평가하고 결과를 합산하여 재구성을 수행한다.

Spherical and Hemispherical Functions

Spherical Gaussians

SRBF lobe에 대한 일반적인 선택 중 하나는 방향 통계에서 von Mises-Fisher 분포라고도 하는 Sperical Gaussian(SG) 이다. 단일 lobe는 다음과 같이 정의된다.

$$G(\mathbf{v}, \mathbf{d}, \lambda) = e^{\lambda(\mathbf{v} \cdot \mathbf{d} - 1)},$$

구면 기저를 구성하기 위해, 주어진 숫자의 선형 조합을 사용한다. 구면 가우스의 경우:

$$F_G(\mathbf{v}) = \sum_k w_k G(\mathbf{v}, \mathbf{d}_k, \lambda_k).$$

이 표현에 구면 함수를 투영하는 작업을 수행하기 위해 재구성 오류를 최소화하는 매개변수 집합을 찾아야하고 이는 수치 최적화에 의해 수행된다. 전체 영역이 잘 덮이도록 고정된 lobe 세트를 선택하고 가중치 w_k 만 적합하여 투영을 수행할 때만 적절한 기준이 얻어진다. 이 사례의 경우 lobe 방향과 선명도가 변화하도록 허용하는 것은 매개변수가 매우 비선형적이기 때문에 좋지 않다.

Spherical and Hemispherical Functions

이 표현의 강점은 SG에 대한 많은 작업이 단순하고 분석적인 형태를 가지고 있다는 것이다. 두 구면 가우스의 합은 또 다른 구면 가우스이다.

$$G_1 G_2 = G \left(\mathbf{v}, \frac{\mathbf{d}'}{\|\mathbf{d}'\|}, \lambda' \right)$$

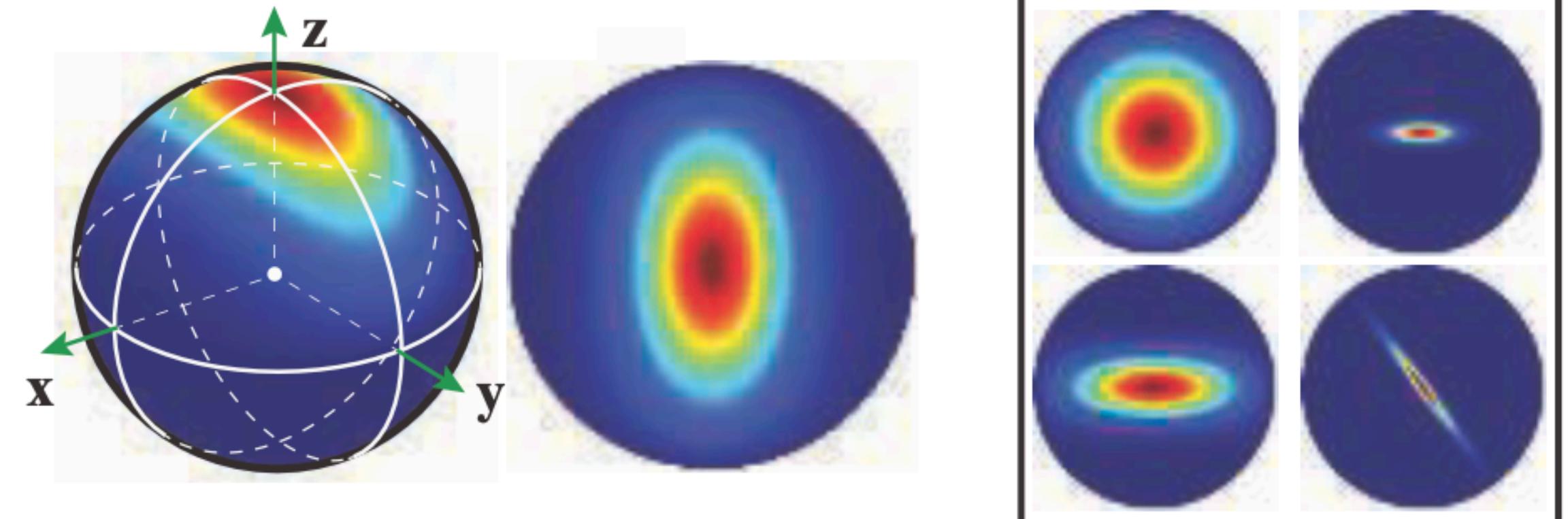
$$\mathbf{d}' = \frac{\lambda_1 \mathbf{d}_1 + \lambda_2 \mathbf{d}_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad \lambda' = (\lambda_1 + \lambda_2) \|\mathbf{d}'\|$$

$$\int_{\Omega} G(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = 2\pi \frac{1 - e^{2\lambda}}{\lambda},$$

만일 우리가 빛의 방사광을 구형 가우스로 표현할 수 있다면 우리는 그것을 제품의 동일한 표현으로 인코딩된 BRDF와 통합하여 조명 계산을 수행할 수 있다.

평면의 가우스 분포는 이방성을 허용할 수 있다.

$$G(\mathbf{v}, [\mathbf{d}, \mathbf{t}, \mathbf{b}], [\lambda, \mu]) = S(\mathbf{v}, \mathbf{d}) e^{-\lambda(\mathbf{v} \cdot \mathbf{t})^2 - \mu(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b})^2},$$



Spherical and Hemispherical Functions

Spherical Harmonics

Spherical Harmonics(SH)는 구면에 대한 직교 기저 함수 집합이다. 직교 기저 함수들의 집합은 집합으로부터 다른 두 함수의 내적이 0이 되는 집합이다. 함수들의 적분을 함께 곱함으로써 두 함수에 대한 내부 곱의 정의를 비슷하게 도출 할 수 있다.

$$\langle f_i(x), f_j(x) \rangle \equiv \int f_i(x) f_j(x) dx,$$

적분은 관련 도메인을 통해 수행된다.

$$\langle f_i(\mathbf{n}), f_j(\mathbf{n}) \rangle \equiv \int_{\mathbf{n} \in \Theta} f_i(\mathbf{n}) f_j(\mathbf{n}) d\mathbf{n},$$

함수 집합 $\{f_j()\}$ 가 직교하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\langle f_i(), f_j() \rangle = \begin{cases} 0, & \text{where } i \neq j, \\ 1, & \text{where } i = j. \end{cases}$$

Spherical and Hemispherical Functions

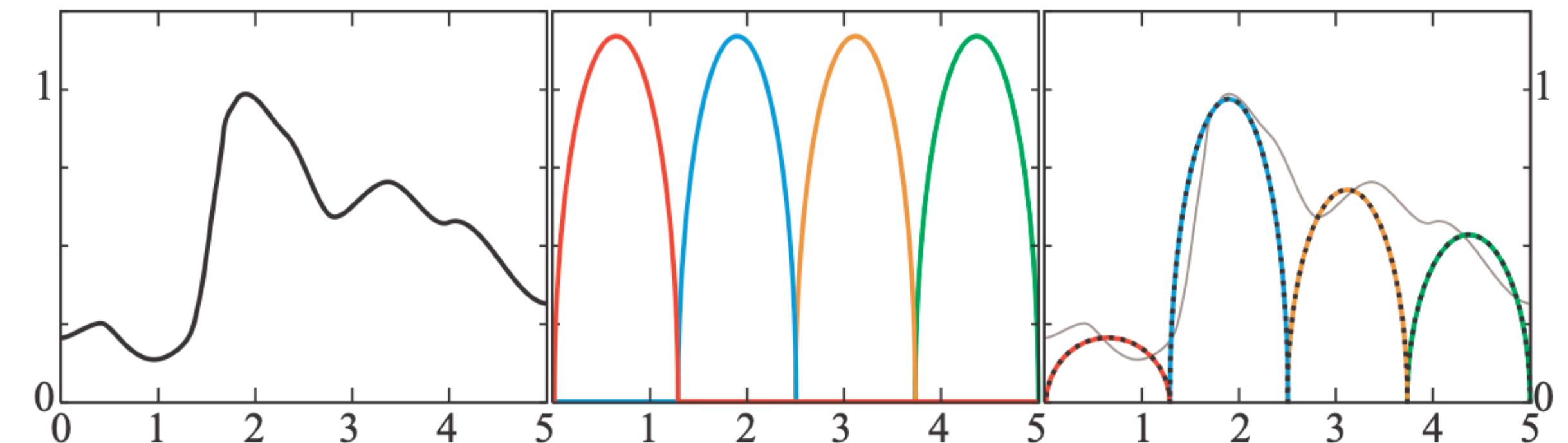
직교 기저의 장점은 목표 함수에 가장 가까운 근사치를 찾는 과정이 간단하다는 것이다. 투영을 수행하기 위해 각 기저함수의 계수는 적절한 기저 함수를 갖는 대상 함수 `ftarget()`의 내적이다.

$$k_j = \langle f_{\text{target}}(), f_j() \rangle,$$

$$f_{\text{target}}() \approx \sum_{j=1}^n k_j f_j().$$

벡터의 표준 기저와의 중요한 차이점은 표준 기저가 모든 점을 정확하게 재현하는 반면, 유한한 기저 함수의 집합은 목표 함수에 근접할 뿐이라는 것이다. 표준 기저는 3차원 공간을 나타내기 위해 3개의 기저 벡터를 사용하기 때문에 결과는 결코 정확할 수 없다.

Spherical harmonics는 orthogonal하고 orthonormal하며 회전 불변이고 SH 기저 함수는 평가하기에 비용이 적게 듈다. 그러나 spherical gaussians와 같이 글로벌 지원을 받고 있으므로 재구성 중에 모든 기본 함수를 평가해야 한다.

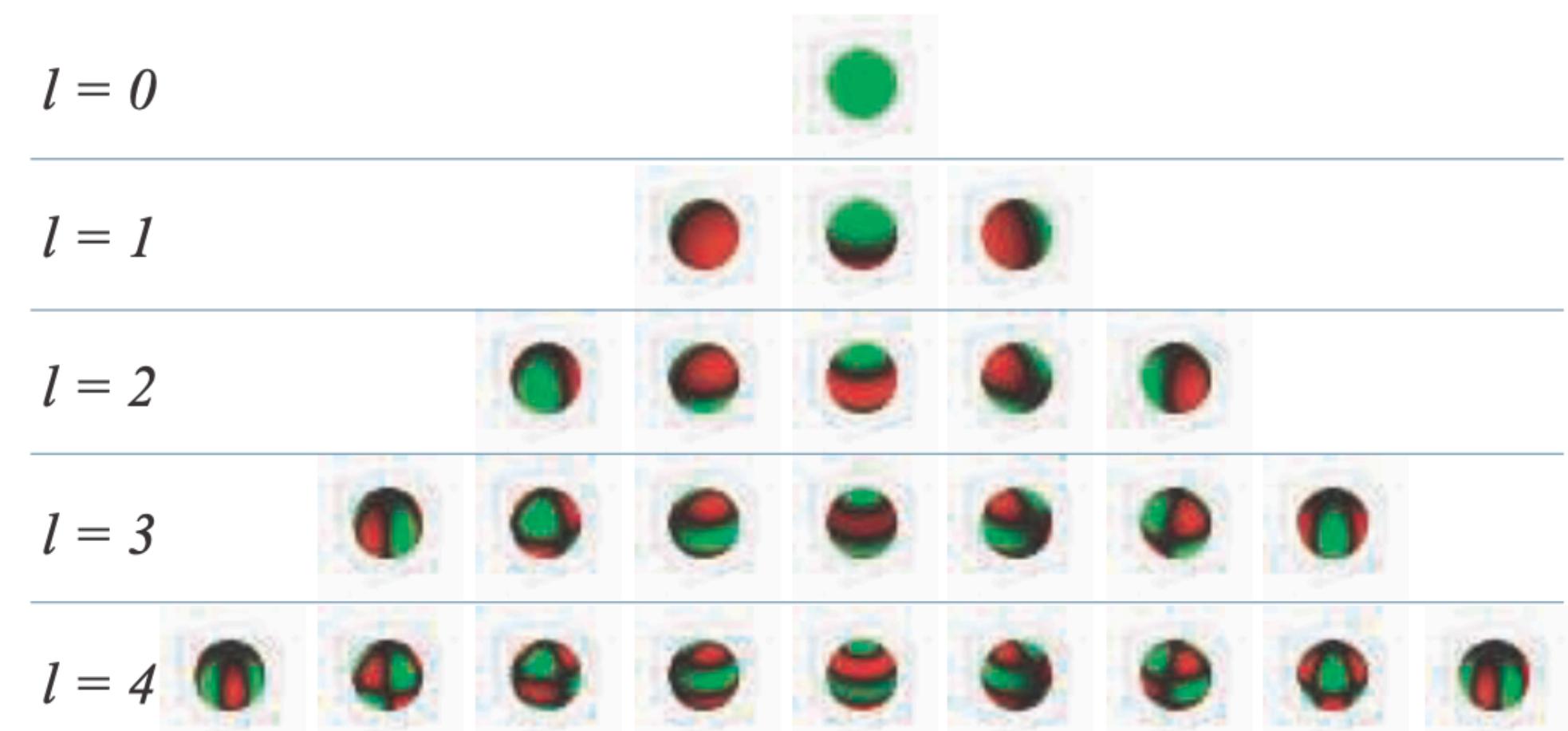


Spherical and Hemispherical Functions

SH 기본 성능은 주파수 대역으로 배열된다. 첫 번째 기저 함수는 상수이고 다음 세 개는 구 위에서 천천히 변화하는 선형 함수이며 다음 다섯 개는 약간 더 빠르게 변화하는 이차함수를 나타낸다. 방사조도 값과 같이 저주파인 기능은 상대적으로 적은 수의 SH계수로 정확하게 표현된다.

SH에 투영할 때, 결과 계수는 투영된 함수의 다양한 주파수의 진폭, 즉 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 이 스펙트럼 영역에서 두 함수의 곱의 적분은 함수 투영 계수의 내적과 같다.

SH와 H-basis와 같은 스펙트럼 변화의 일반적인 문제는 ringing(Gibbs phenomenon)이라는 시각적 인공물을 나타낼 수 있다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 다양한 사전 필터링 방법을 사용 할 수 있다.



Spherical and Hemispherical Functions

Other Spherical Representations

다른 많은 표현들은 유한한 수의 계수들을 사용하여 구형 함수들을 인코딩 하는 것이 가능하다.

Linearly transformed cosines은 구의 다각형 섹션에서 쉽게 통합할 수 있는 특성을 가지면서 BRDF 함수를 효율적으로 근사할 수 있는 표현의 한 예이다.

Spherical wavelets은 공간과 주파수의 국소성을 균형 있게 조정하는 기초로서 고주파 함수의 압축된 표현을 가능하게 한다.

Spherical piecewise constant basis functions와 biclustering approximations도 환경 조명에 사용되었다.

Spherical and Hemispherical Functions

Hemispherical Bases

위에서 다룬 내용들이 반구형 기능을 나타내는 데 사용될 수 있지만 절반이 항상 0과 같아 낭비적이다.

Ambient/Highlight/Direction

간단한 표현 중 하나는 신호가 반구에서 가장 강한 상수 함수와 단일 방향의 조합이다. 일반적으로 AHD 기반이라고 하며 일반적으로 복사 조도를 저장한다. AHD basis는 일반적으로 8개의 매개 변수를 저장하는데 방향벡터에는 두 개의 각도가 사용되고 주변 및 방향 광 각도에는 두개의 RGB색상이 사용된다.

비선형적이기 때문에 주어진 입력에 근접한 최적의 매개 변수를 찾는 것은 계산 비용이 많이 들기 때문에 이 표현에 대한 투영은 다소 까다롭다. 실제로는 heuristics가 대신 사용된다. 신호는 먼저 SH에 투영되고 최적의 선형 방향은 코사인 로브의 방향을 정하는 데 사용된다. 방향이 주어지면 최소 제곱 최소화를 사용하여 주변 및 강조 표시 값을 계산할 수 있다.

Spherical and Hemispherical Functions

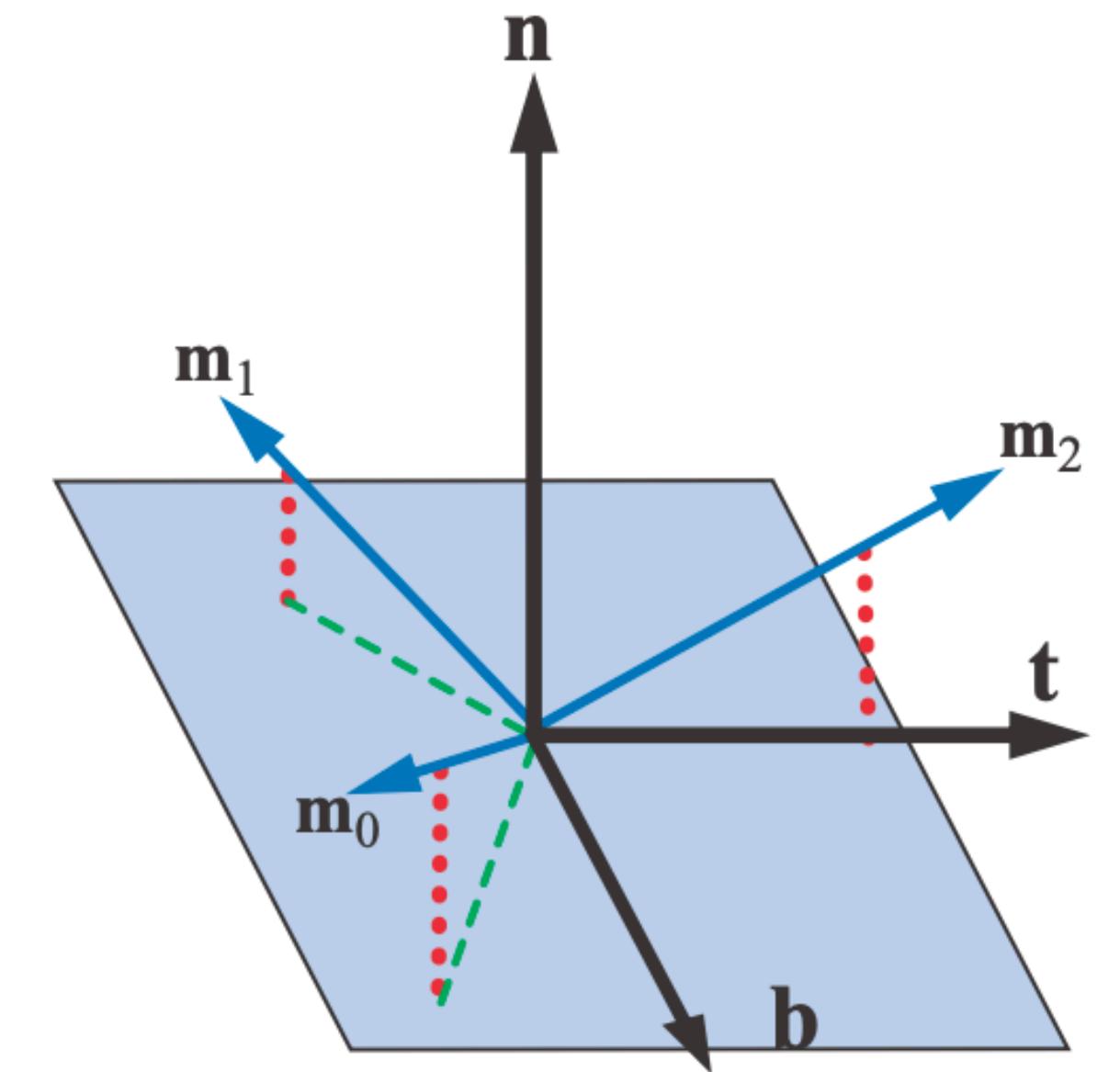
Radiosity Normal Mapping/Half-Life 2 Basis

Valve는 하프라이트2에서 무선성 정규 맵핑의 맥락에서 방향 방사조도를 나타내는 새로운 표현을 사용한다. 접선 공간에서 세 방향을 샘플링하여 표면의 반구 함수를 나타낸다.

$$\mathbf{m}_0 = \left(\frac{-1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right), \quad \mathbf{m}_1 = \left(\frac{-1}{\sqrt{6}}, \frac{-1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right), \quad \mathbf{m}_2 = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}, 0, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$$

재구성을 위해 접선-공간 방향 d 가 주어졌을 때 우리는 E_0, E_1, E_2 의 값들을 세 개의 기저 벡터들을 따라 보간 할 수 있다.

$$E(\mathbf{n}) = \frac{\sum_{k=0}^2 \max(\mathbf{m}_k \cdot \mathbf{n}, 0)^2 E_k}{\sum_{k=0}^2 \max(\mathbf{m}_k \cdot \mathbf{n}, 0)^2}. \quad d_k = \frac{\max(\mathbf{m}_k \cdot \mathbf{n}, 0)^2}{\sum_{k=0}^2 \max(\mathbf{m}_k \cdot \mathbf{n}, 0)^2}, \quad E(\mathbf{n}) = \sum_{k=0}^2 d_k E_k.$$



Spherical and Hemispherical Functions

Hemispherical Harmonics/H-Basis

SH를 반구 영역에 전문화 하여 이를 hemispherical harmonics(HSH)라고 한다. 이를 수행하기 위해 다양한 방법이 가능하다.

Zernike 방정식은 SH와 같은 직교 함수이지만 단위 원반에 정의된다. SH와 마찬가지로 주파수 영역의 함수를 변환하는 데 사용될 수 있으며 이는 많은 편리한 특성을 산출한다. 그러나 이를 사용하여 재구성을 수행하는 데는 비용이 상당히 많이 드는데, Gautron 등의 솔루션은 더 경제적이고 계수 벡터에 대한 행렬 곱셈에 의해 상대적으로 빠른 회전을 허용한다.

HSH basis는 구면의 음극을 반구의 바깥쪽 가장자리로 이동하여 구성되기 때문에 SH보다 여전히 평가 비용이 더 많이 듈다. 특히 SH 대역만 사용되는 경우 가장자리 근처에서 근사 오차가 상당 할 수 있다.

Habel은 세로 매개변수화를 위한 SH기반의 일부와 위도를 위한 HSH의 일부를 취하는 H-basis를 도입했다. 이는 여전히 직교하는 반면 효율적인 평가를 가능하게 했다.

Environment Mapping

하나 이상의 이미지에 구면 함수를 기록하는 것을 환경 매핑이라고 하는데 일반적으로 텍스처 매핑을 사용하여 테이블의 룩업을 구현하기 때문이다. 다른 구형 표현에 비해 더 많은 메모리를 소비하지만 실시간으로 디코딩하는 것은 간단하고 빠르다. 또한 임의로 높은 주파수의 구형 신호를 표현할 수 있고 어떠한 범위의 환경 방사도 정확하게 포착할 수 있다.

그런 정확성에는 대가가 따른다. 일반적으로 사용되는 다른 텍스처에 저장된 색상과 셰이더 속성과는 달리 환경 맵에 저장된 광도 값은 일반적으로 높은 동적 범위를 갖는다. 텍셀당 비트 수가 많을수록 환경 맵은 다른 텍스처 보다 더 많은 공간을 차지하는 경향이 있으며 액세스 속도가 느릴 수 있다.

환경 매핑에 의존하는 shading 기법은 일반적으로 환경 조명을 표현하는 능력이 아니라 주어진 material과 얼마나 잘 결합할 수 있는지에 의해 특정지어진다.



Environment Mapping

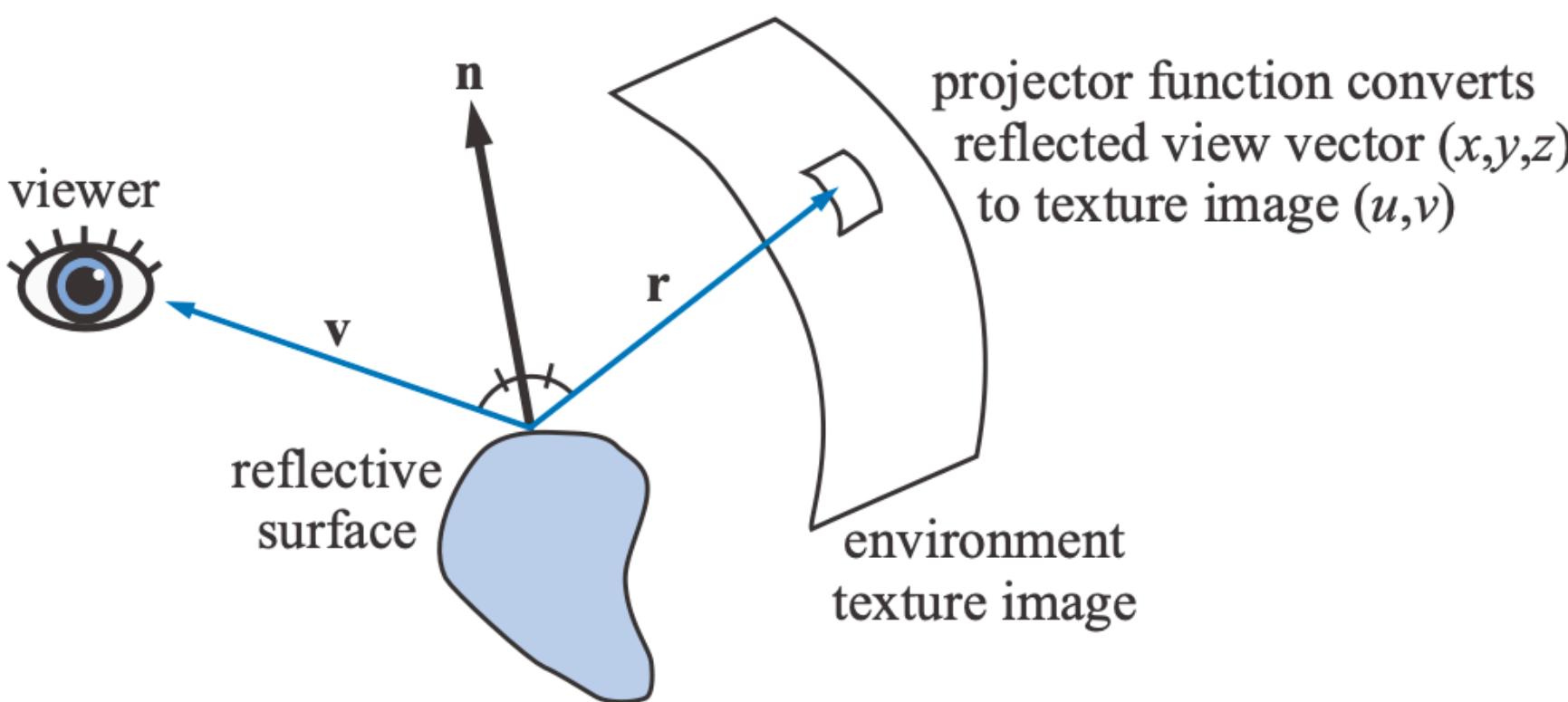
나가는 방사광은 반사된 뷰 벡터로부터 들어오는 방사광을 포함하고 이 벡터는 다음과 같은 방법으로 계산된다.

$$\mathbf{r} = 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})\mathbf{n} - \mathbf{v}.$$

$$L_o(\mathbf{v}) = F(\mathbf{n}, \mathbf{r})L_i(\mathbf{r}),$$

입사광도를 2차원 표에 저장하면 임의의 들어오는 방사 분포로 모든 형상의 거울 같은 표면을 효율적으로 조명 할 수 있다.

일반적으로 환경 매핑을 사용할 때 평평한 표면이 잘 작동하지 않는다. 평평한 표면의 문제는 반사되는 광선이 보통 몇 도 이상 차이나지 않는다는 것인데 이러한 긴밀한 클러스터링으로 인해 환경 테이블의 작은 부분이 비교적 큰 표면에 매핑된다. 일반 매핑과 환경 매핑을 함께 사용하는 것은 특히 효과적이며 풍부한 시각 자료를 산출한다.



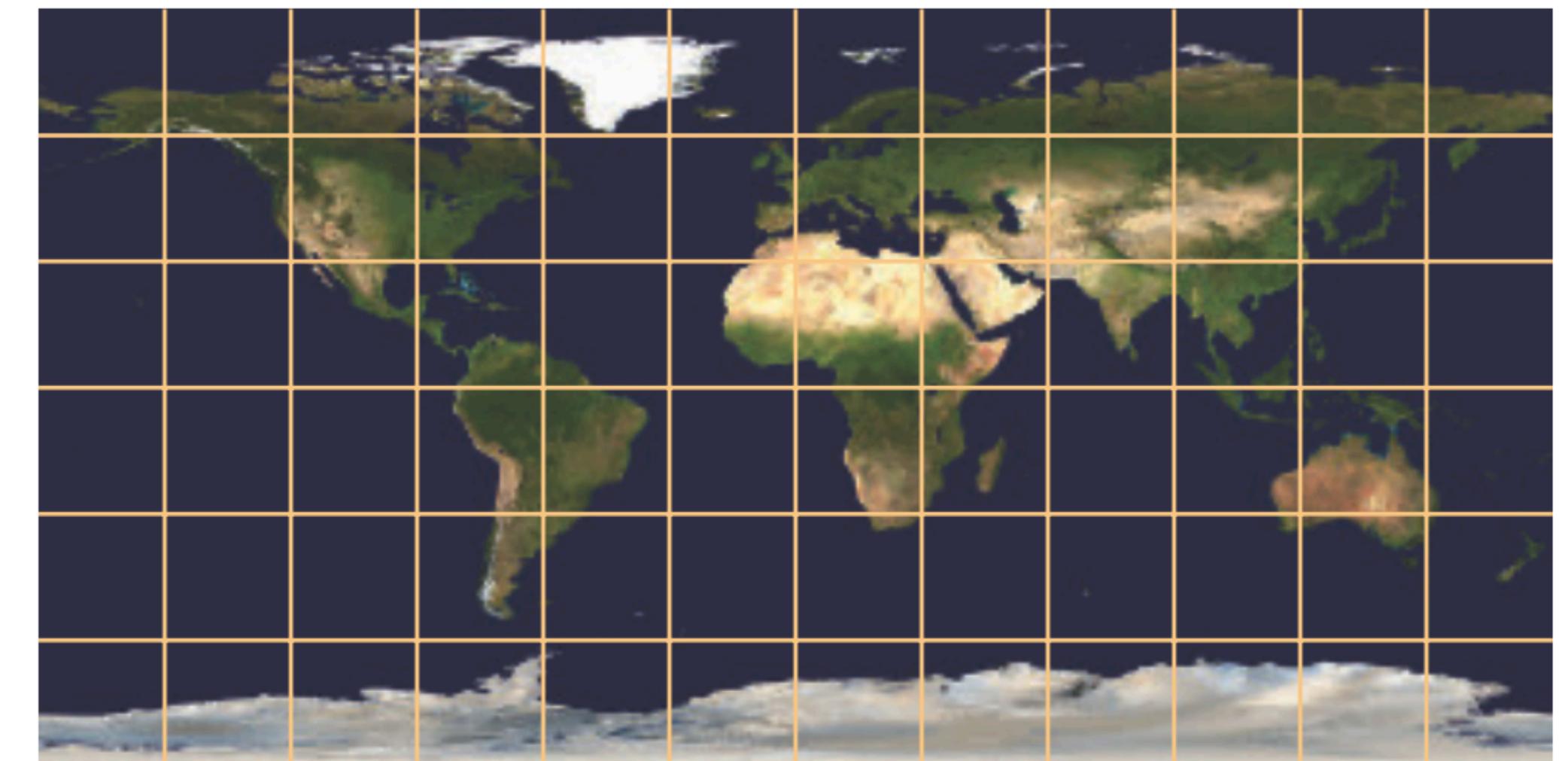
Environment Mapping

Latitude-Longitude Mapping

1976년 Blinn과 Newell이 개발한 최초의 환경 맵 알고리즘이다. 지구의 정보를 투영 맵에 평평하게 만들 수 있는 것처럼 우주의 한 점을 둘러싼 환경은 텍스처에 맵핑될 수 있다.

$$\rho = \arccos(r_z) \quad \text{and} \quad \phi = \text{atan2}(r_y, r_x).$$

이 맵핑의 한 가지 문제는 정보의 밀도가 거의 균일하지 않는 것이다. 이러한 왜곡은 가장 효율적인 인코딩을 초래하지 않을 뿐만 아니라 하드웨어 텍스처 필터링을 사용할 때 아티팩트를 초래할 수 있다.



Environment Mapping

Sphere Mapping

텍스쳐 이미지는 완벽하게 반사되는 구에서 직교적으로 본 환경의 모습에서 파생되기 때문에 이 텍스쳐를 구면 맵이라고 한다. 결과적으로 생성된 원형 이미지는 light probe라고도 부르며 구면 프로브를 촬영하는 것은 런타임에 다른 인코딩을 사용하더라도 이미지 기반 조명을 캡처하는 효과적인 방법이 될 수 있다.

반사구는 구의 전면에 있는 전체 환경을 보여주고 반사된 각 뷰 방향을 이 구의 2차원 이미지에 있는 점에 매핑한다.

$$\mathbf{n} = \left(\frac{r_x}{m}, \frac{r_y}{m}, \frac{r_z + 1}{m} \right), \quad \text{where } m = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + (r_z + 1)^2}.$$

$$m = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + (r_z + 1)^2}, \quad u = \frac{r_x}{2m} + 0.5, \quad \text{and} \quad v = \frac{r_y}{2m} + 0.5.$$



Environment Mapping

위도-경도 맵핑과 달리 구 맵핑은 계산하기 훨씬 간단하고 이미지 원의 가장자리 주변에 위치한 하나의 특이점을 보여준다.

단점은 구면 맵 텍스처가 단일 뷰 방향에만 유효한 환경의 뷰를 캡처한다는 것이다. 이 텍스처는 전체 환경을 캡처하므로 새로운 뷰 방향에 대한 텍스처 좌표를 계산 할 수 있다. 그러나 새로운 뷰로 인해 구면 맵의 작은 부분이 확대되고 시각적 아티팩트가 발생할 수 있다.

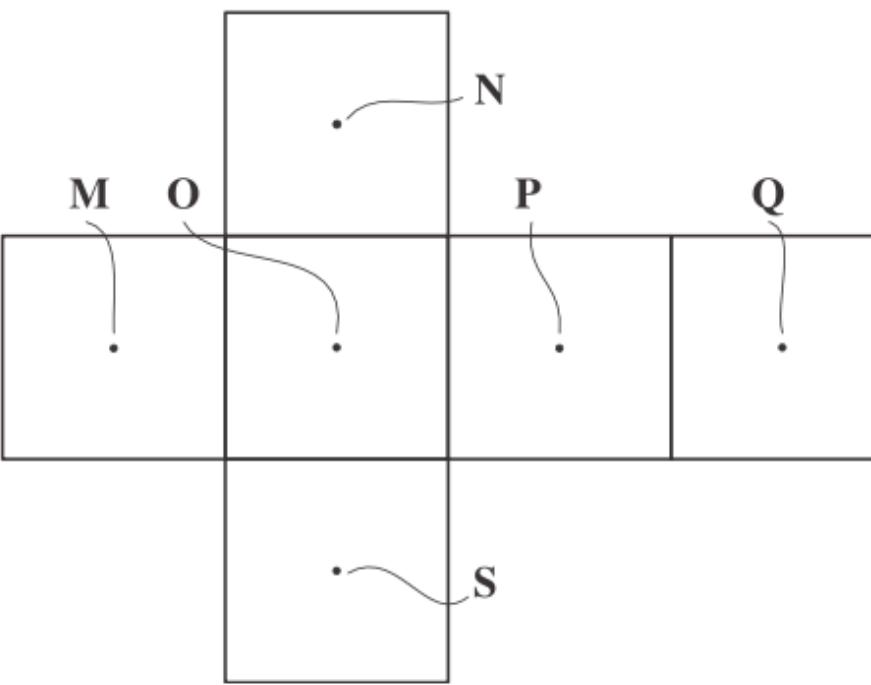
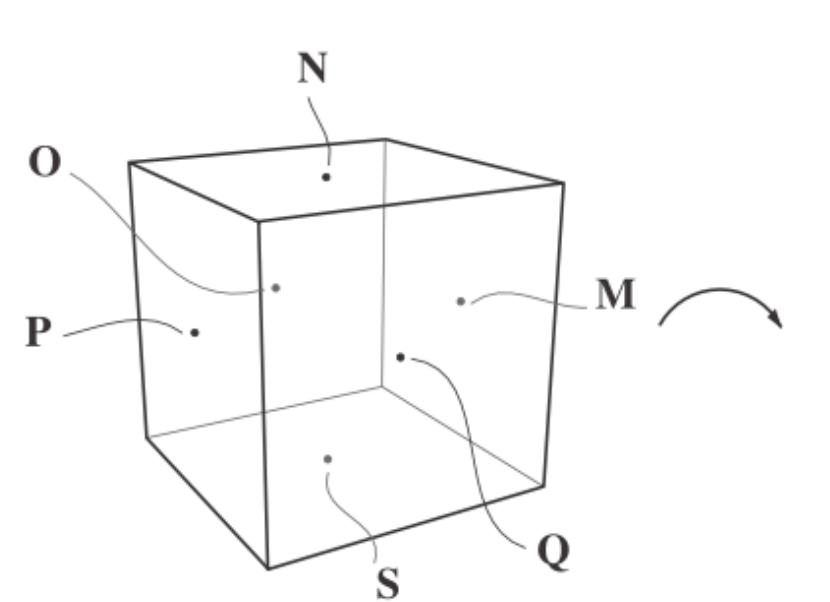
구면 맵은 고정된 뷰 방향에 대해 정의되므로 각 점은 원칙적으로 반사 방향뿐만 아니라 표면 법선도 정의한다. 반사 벡터와 표면 정규 분포를 사용하여 두 개의 구면 지도를 인덱싱하여 반사 및 확산 환경 효과를 시뮬레이션 할 수도 있다.



Environment Mapping

Cube Mapping

큐브 매핑은 가장 널리 사용되는 방법이며 현대 GPU 하드웨어에서 직접 구현된다. 큐브 맵은 카메라 위치에 중심이 위치한 큐브의 면에 환경을 투영하여 생성된다. 큐브 맵은 공간 낭비가 없고 구명 매핑과 달리 뷰에 독립적이다. 또한 적도에비해 극점을 오버샘플링하는 위도-경도 매핑보다 훨씬 균일한 샘플링 특성을 가지고있다.



Environment Mapping

Other Projections

Heidrich와 Seidel은 이중 포물선 환경 매핑을 수행하기 위해 두 가지 텍스처를 사용할 것을 제안한다. 이 아이디어는 구면 매핑과 비슷하지만 구면에서 환경의 반사를 기록하여 텍스처를 생성하는 대신 두 개의 포물선 투영이 사용된다. 포물선 맵은 구면 맵, 큐브 맵과 비교하여 환경에 대해 더 균일한 텍셀 샘플링을 가지지만 두 투영 사이의 seam에서 적절한 샘플링 및 보간을 위해 주의해야 하고 비용이 더 많이든다.

$$u = \frac{r_x}{2(1 + r_z)} + 0.5, \quad v = \frac{r_y}{2(1 + r_z)} + 0.5$$

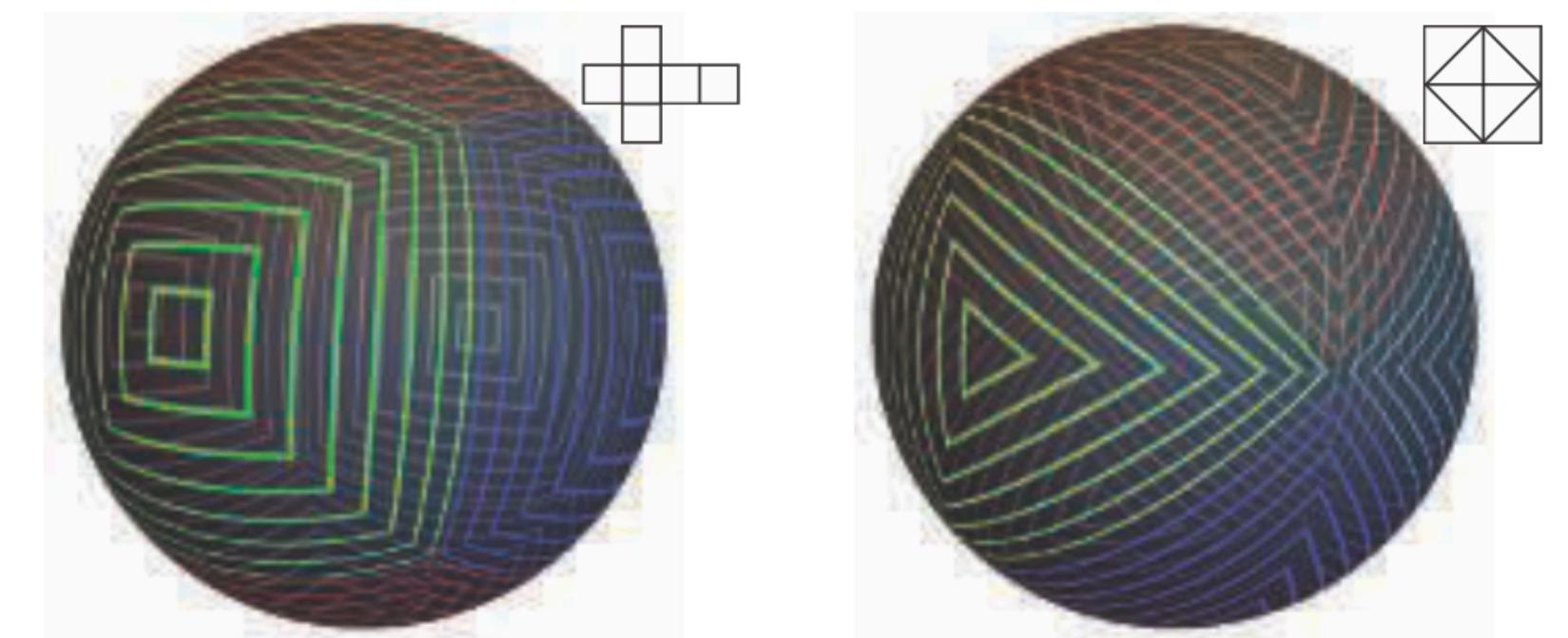
팔면체 매핑은 주변 구를 정육면체에 매핑하는 대신 정팔면체에 매핑한다.

$$\mathbf{r}' = \frac{\mathbf{r}}{|r_x| + |r_y| + |r_z|}.$$

$$u = r'_x \cdot 0.5 + 0.5, \quad v = r'_y \cdot 0.5 + 0.5.$$

$$u = (1 - |r'_z|) \cdot \text{sign}(r'_x) \cdot 0.5 + 0.5, \quad v = (1 - |r'_x|) \cdot \text{sign}(r'_z) \cdot 0.5 + 0.5.$$

팔면체 매핑은 이중 포물선 매핑의 필터링 문제를 겪지 않는다. 또한 압축 수단으로 두 개의 좌표만을 사용하여 3차원 방향을 표현하는 용도로 사용할 수 있다.

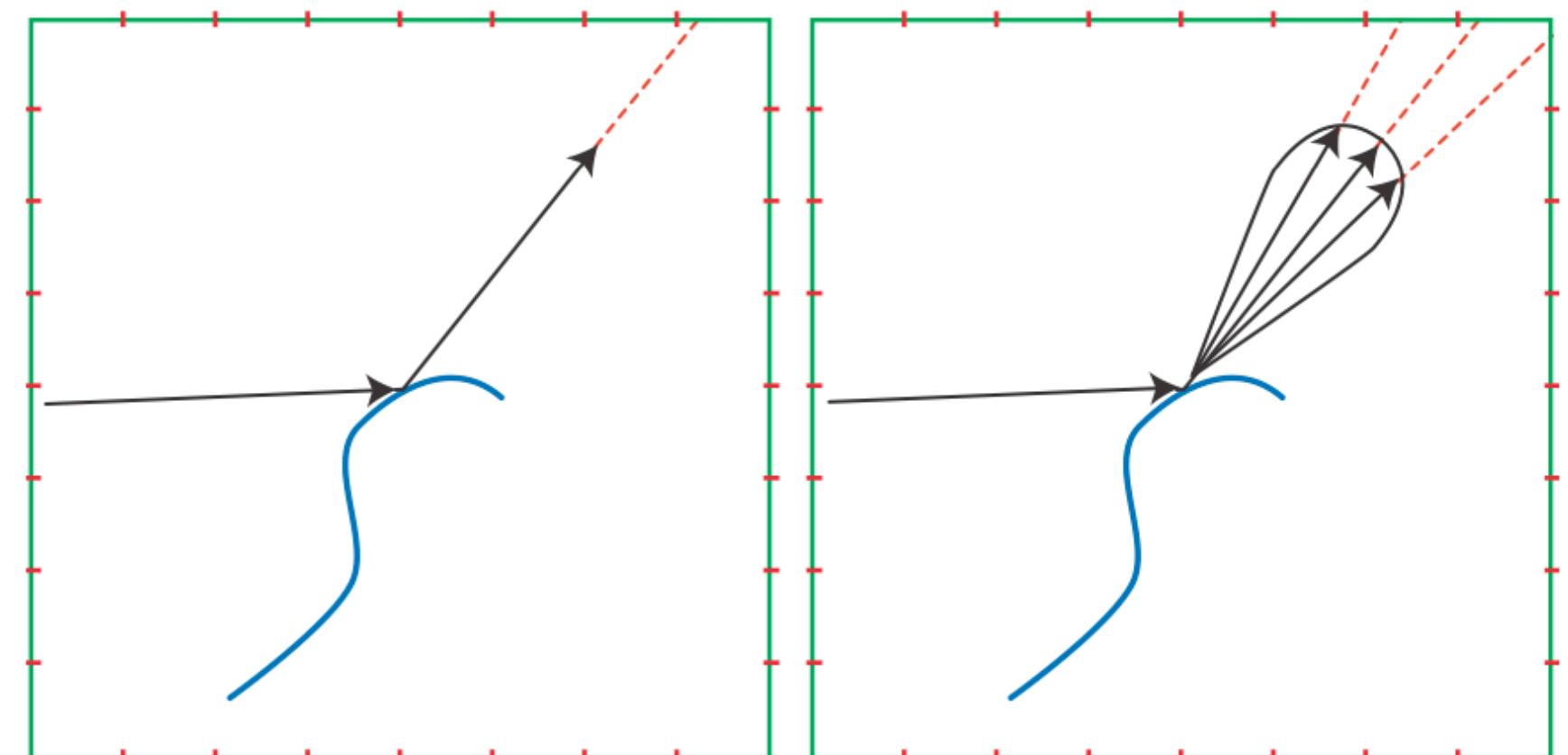


Specular Image-Based Lighting

환경 맵핑은 원래 거울같은 표면을 렌더링하는 기술로 개발되었지만, 광택반사로도 확장 될 수 있다. 반사광 probe는 장면의 주어진 지점에서 모든 방향의 방사광을 포착하고 그 정보를 순수 거울이나 램버트 표면의 제한된 경우뿐만 아니라 일반적인 BRDF를 평가하는 데 사용된다.

환경 맵 텍스처를 흐리게 함으로써 완벽한 거울과 같은 반사보다 거칠어 보이는 specular 반사를 제시할 수 있다.

거친 표면의 모양에 경험적으로 접근하는 동안 환경 맵을 흐리게 하는 것은 실제 BRDF와 관련이 없다. 원칙적인 방법은 주어진 표면 법선과 뷰 방향을 고려할 때 BRDF 함수가 구체에서 취하는 모양을 고려한 후 이 분포를 사용하여 환경 맵을 필터링한다.

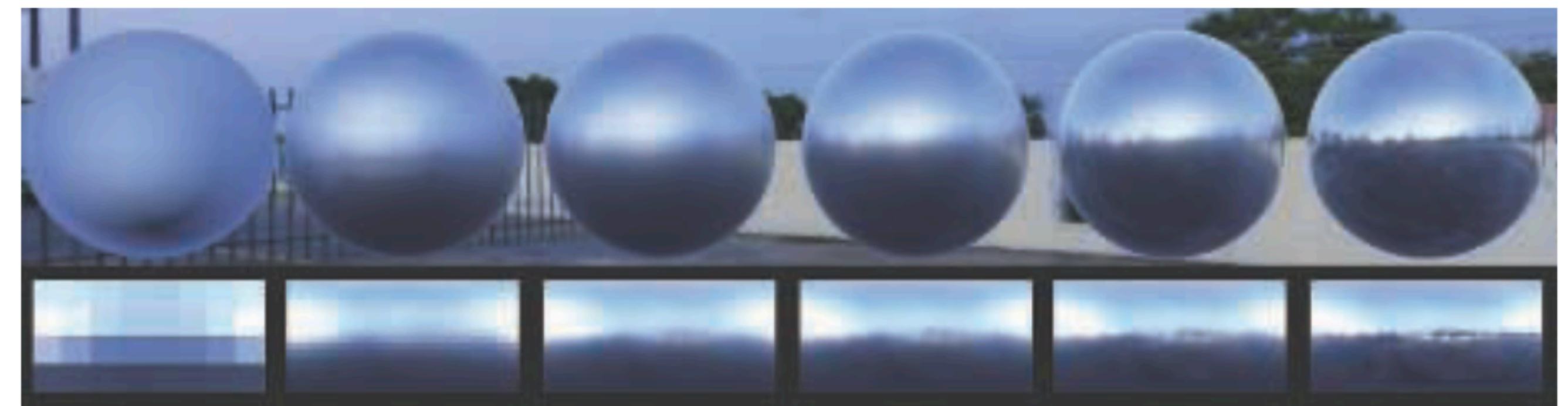
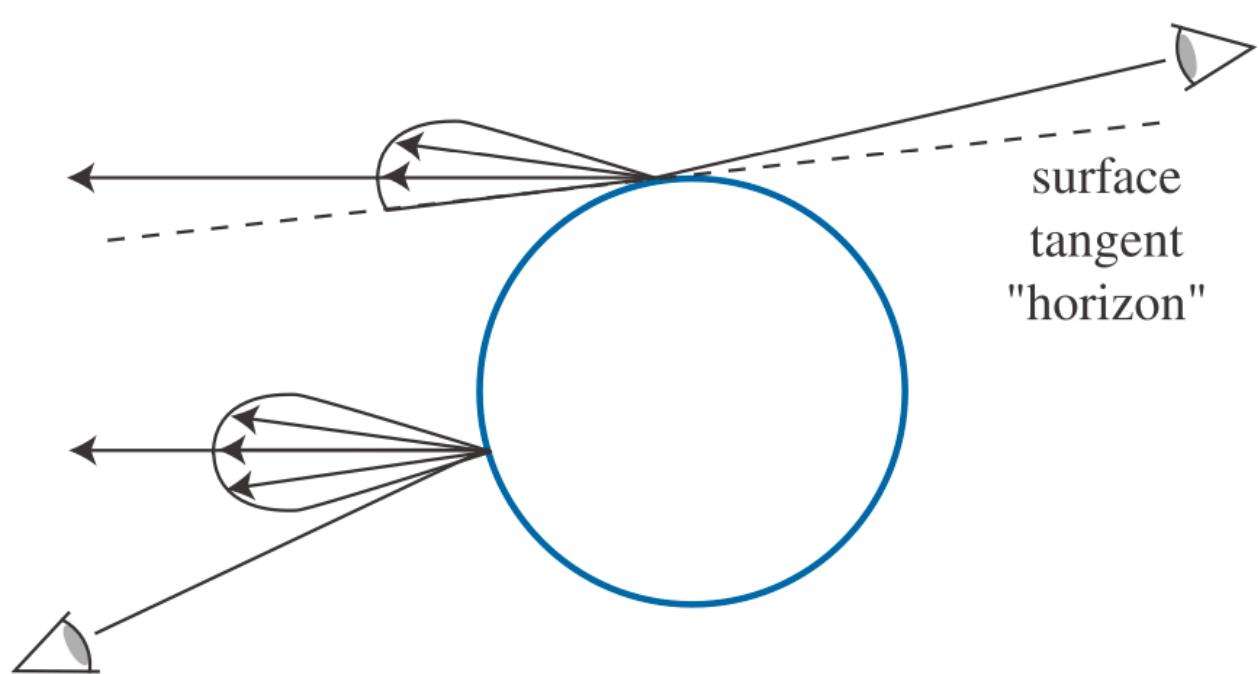


Specular Image-Based Lighting

Prefiltered Environment Mapping

Glossy material에 적용되는 환경 조명을 위한 prefiltering의 실용적인 구현은 결과 텍스처가 뷰 및 정상 벡터와 무관하도록 사용되는 BRDF와 근사치를 요구한다. BRDF의 형상 변화를 material 광택으로만 제한하면 거칠기 매개 변수의 다양한 선택에 해당하는 몇 가지 환경 맵을 계산하고 저장할 수 있으며 런타임에 사용할 적절한 맵을 선택할 수 있다.

방사상으로 대칭인 specular lobe을 가진 우리가 수용할 수 없는 유일한 효과는 수평선 자르기이다. 구체의 실루엣 근처의 표면을 보는 것은 수평선 아래에서 오는 빛이 눈에 직접 닿지 않게 lobe의 일부를 잘라내야 한다. 이러한 방식으로 단일 반사 맵을 사용하여 표면의 흐릿함을 시뮬레이션한다. 다양한 거칠기 수준을 수용하기 위해 환경 큐브 맵의 mip맵을 사용하는 것이 일반적이다. 더 높은 mip레벨은 더 거친 표면을 저장한다.



Specular Image-Based Lighting

Convolving the Environment Map

사전 필터링된 환경 맵을 생성한다는 것은 환경 방사와 specular의 적분이다.

$$\int_{\Omega} D(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{l}) d\mathbf{l}.$$

$$\int_{\Omega} D(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{l}) d\mathbf{l} \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{D(\mathbf{l}_k, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{l}_k)}{p(\mathbf{l}_k, \mathbf{v})}$$

이 방법은 간단하고 정확하지만 적분의 수치 값으로 수렴하기 위해 많은 수의 샘플이 필요할 수 있으며 이는 오프라인 프로세스에서도 느릴 수 있다. 우리가 계산해야 할 더 많은 텍스처가 있을 뿐만 아니라 완벽한 방사 방향에 가깝지 않은 방향에 대해서는 lobe가 거의 0일 수 있다.

이러한 현상을 피하기 위해 중요 샘플링을 사용할 수 있는데 여기서 specular lobe의 모양과 일치하는 확률 분포로 방향을 생성한다. 더 효율적인 샘플링 계획을 위해 환경 지도의 방사광 분포를 specular lobe의 모양과 함께 고려할 수 있다.

샘플링 분산을 더욱 줄이기 위해 샘플간의 거리를 측정하고 단일 방향 대신 원뿔의 합을 사용하여 통합하거나 영역 샘플을 활용할 수 있다. 고속 convolution 기술을 사용하면 미리 필터링된 큐브 맵을 실시간으로 업데이트 할 수 있으며 이는 필터링할 환경 맵이 동적으로 렌더링 될 때 필요하다.

Specular Image-Based Lighting

Split-Integral Approximation for Microfacet BRDFs

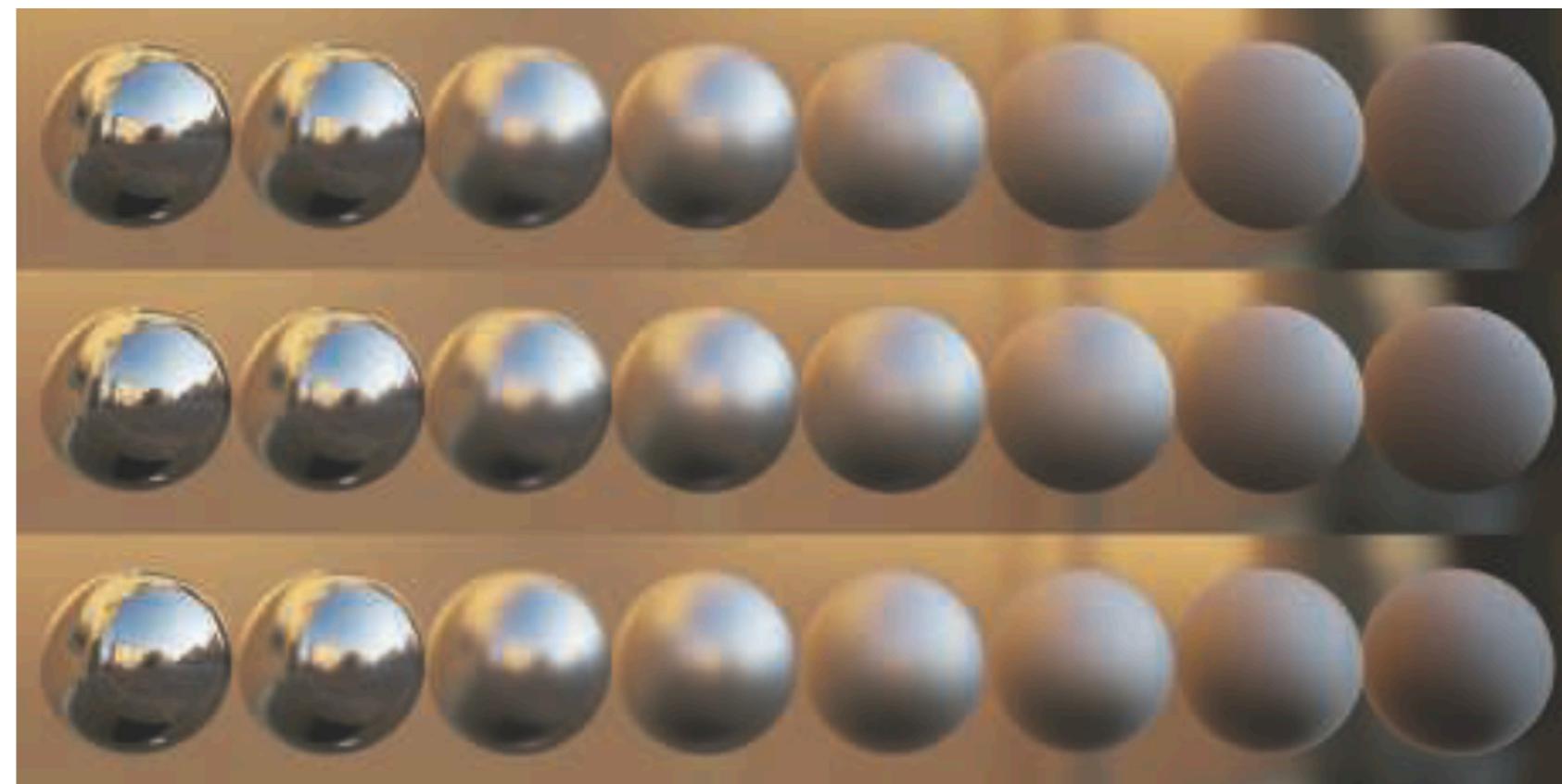
환경조명은 매우 유용해서 큐브맵 사전 필터링에 내재된 BRDF 근사문제를 줄이기 위한 기술들이 개발되었다.

$$\int_{\mathbf{l} \in \Omega} f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l} \approx F(\mathbf{n}, \mathbf{v}) \int_{\mathbf{l} \in \Omega} D_{\text{Phong}}(\mathbf{r}) L_i(\mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l},$$

$$f_{\text{smf}}(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{h}, \mathbf{l}) G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h}) D(\mathbf{h})}{4|\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}| |\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}|},$$

$$\int_{\mathbf{l} \in \Omega} f_{\text{smf}}(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l} \approx \int_{\mathbf{l} \in \Omega} D(\mathbf{r}) L_i(\mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l} \int_{\mathbf{l} \in \Omega} f_{\text{smf}}(\mathbf{l}, \mathbf{v})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l}.$$

이 솔루션은 분할적분이라고 불리며 일정한 환경 맵에 정확하다. 큐브 맵 파트는 균일한 조명에서 정확한 BRDF 적분인 specular 반사율을 스케일링하는 조명 강도를 제공한다. 경험적으로 특히 야외 장면에서 드물지 않은 주파수 함량이 상대적으로 낮은 경우 일반 환경 지도에서도 근사치가 유지된다고 관찰된다.

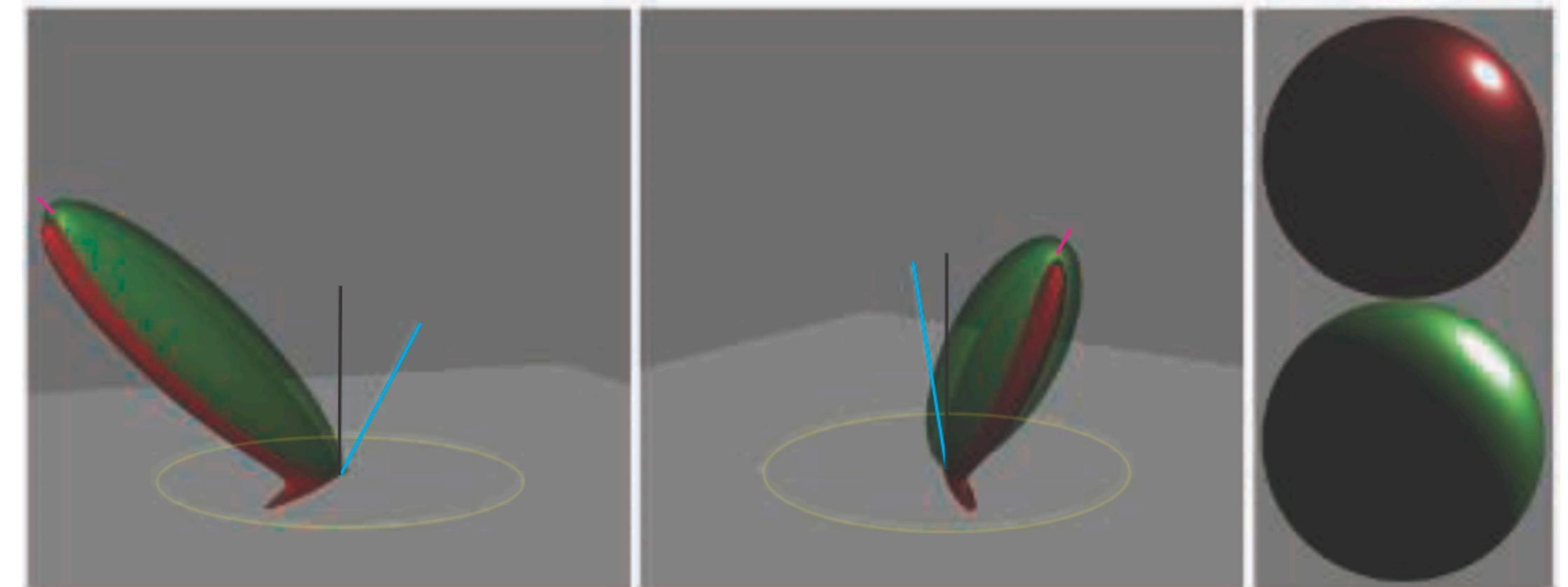


Specular Image-Based Lighting

Asymmetric and Anisotropic Lobes

지금까지 본 해결책은 모두 등방성인 specular lobe로 제한되는데 이는 들어오는 방향과 나가는 방향이 표면 법선을 중심으로 대칭적이라는 것을 의미한다. 마이크로페이스 BRDF 로브는 등방성의 경우에도 우리가 필요로 하는 대칭성을 갖지 않는다. 원래의 반원형 공식과 specular highlight의 크기를 일치시키기 위해 일정한 거칠기 보정 계수를 도출하는데 이러한 가정은 상당한 오차의 원인이 된다.

Kautz와 McCool은 사전 필터링된 환경 맵에 저장된 방사형 대칭 로브에서 더 나은 샘플링 방식을 사용하여 사전 통합을 개선한다. 첫번째는 단일 샘플을 사용하지만 일정한 보정 계수에 의존하는 대신 현재 뷰 방향으로 BRDF를 근사할 수 있는 최적의 로브를 찾는 것이고 두번째는 서로 다른 로브에서 여러 샘플을 평균화한다.



Specular Image-Based Lighting

최근 Iwanicki와 Pesce는 Nelder-Mead minimization이라는 방법을 사용하여 GGX BRDF와 환경 큐브 맵에 대한 유사한 근사치를 도출했다.

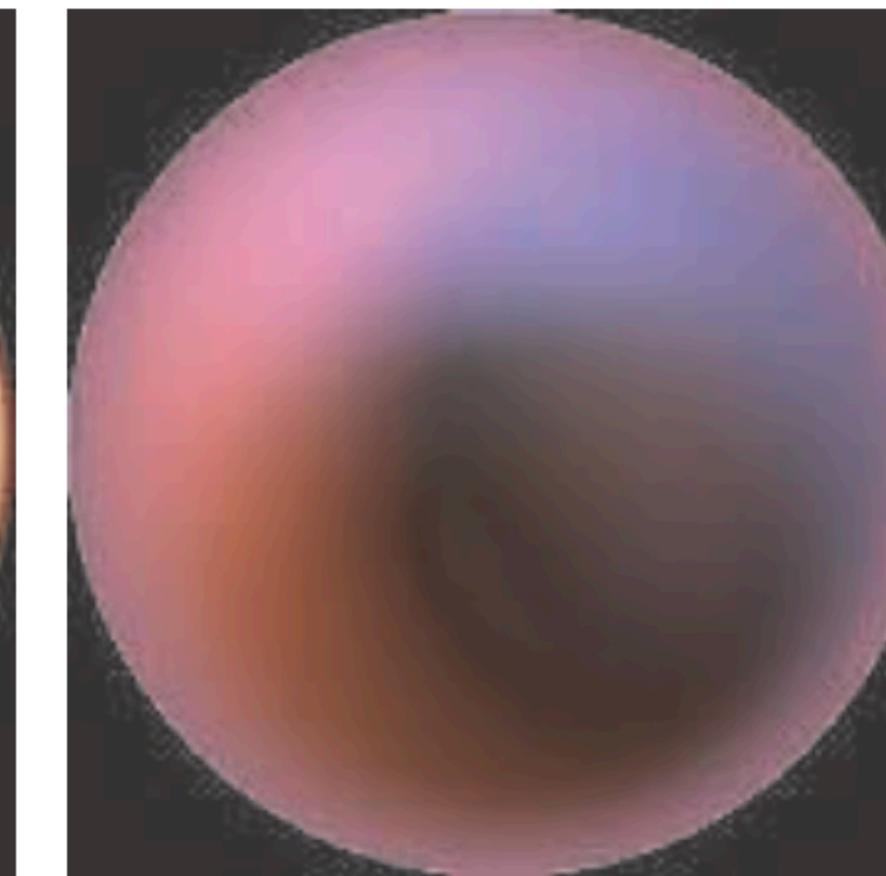
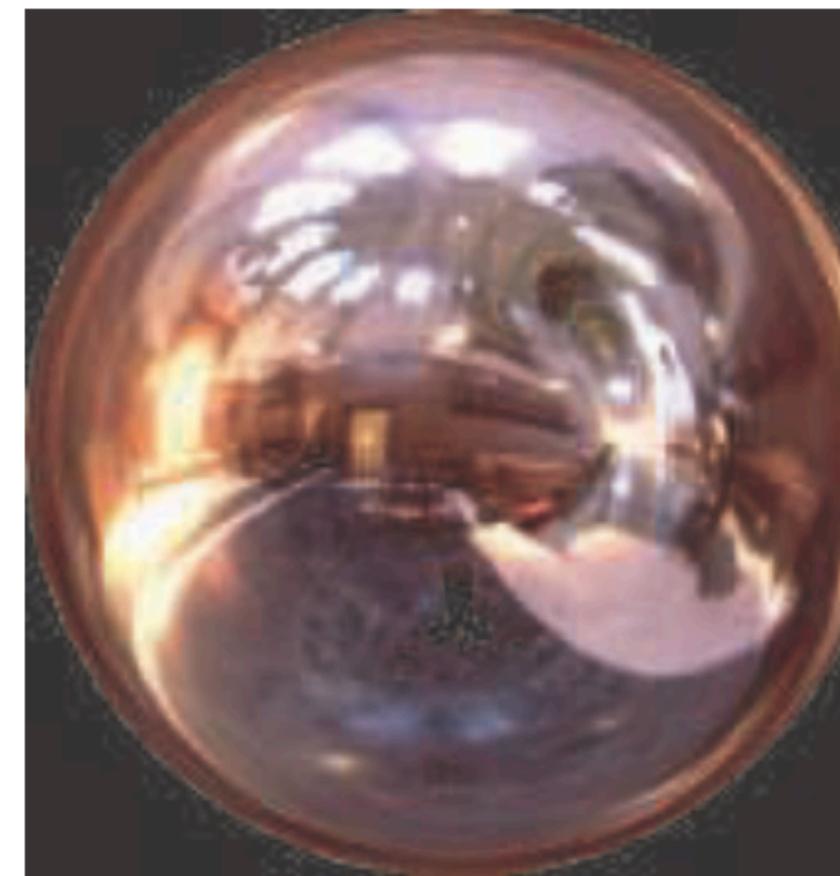
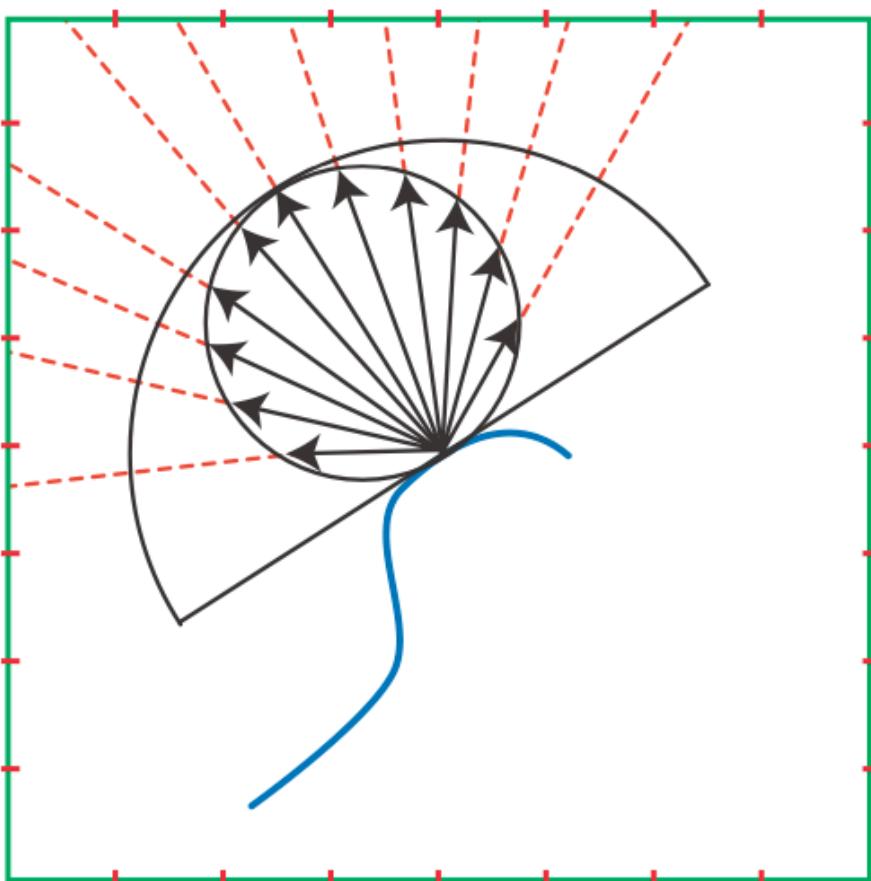
Revie의 사전 필터링된 큐브 맵에서 단일 샘플을 사용하지만 그 위치를 더 복잡한 specular BRDF의 정점에 적용하는 아이디어는 deferred shading과 결합된 모피 렌더링에 사용된다.

McAllister는 Lafortune BRDF의 특성을 이용하여 이방성 및 역반사를 포함한 다양한 효과의 렌더링을 가능하게 하는 기술을 개발했다.

Irradiance Environment Mapping

이전 섹션에서는 specular reflection을 위해 필터링된 환경 맵을 사용하는 방법에 대해 설명했다. 이러한 맵은 diffuse reflection에도 사용될 수 있다. 거울 반사를 위한 환경 맵은 거울 반사에 사용하든, 광택 반사에 사용하든 몇 가지 공통적인 특성을 가지고 있다. 두 경우 모두 specular 환경 맵은 반사된 뷰 벡터를 사용하여 인덱싱되고 radiance value를 포함한다. 필터링되지 않은 환경 맵에는 수신 조도 값이 포함되고 필터링된 환경 맵에는 송신 조도 값이 포함된다. 반대로 diffuse reflection을 위한 환경 맵은 표면 법선 n만으로 인덱싱되며 이들은 방사조도 값을 포함한다.

지도의 각 텍셀에 대해 주어진 정상 방향으로 향하는 표면에 영향을 미치는 모든 조명의 코사인 가중 기여를 요약해야 한다. 방사조도 환경 맵은 가시 반구 전체를 포괄하는 광범위한 필터를 원래 환경 지도에 적용하여 생성되고 필터에는 코사인 인자가 포함된다.

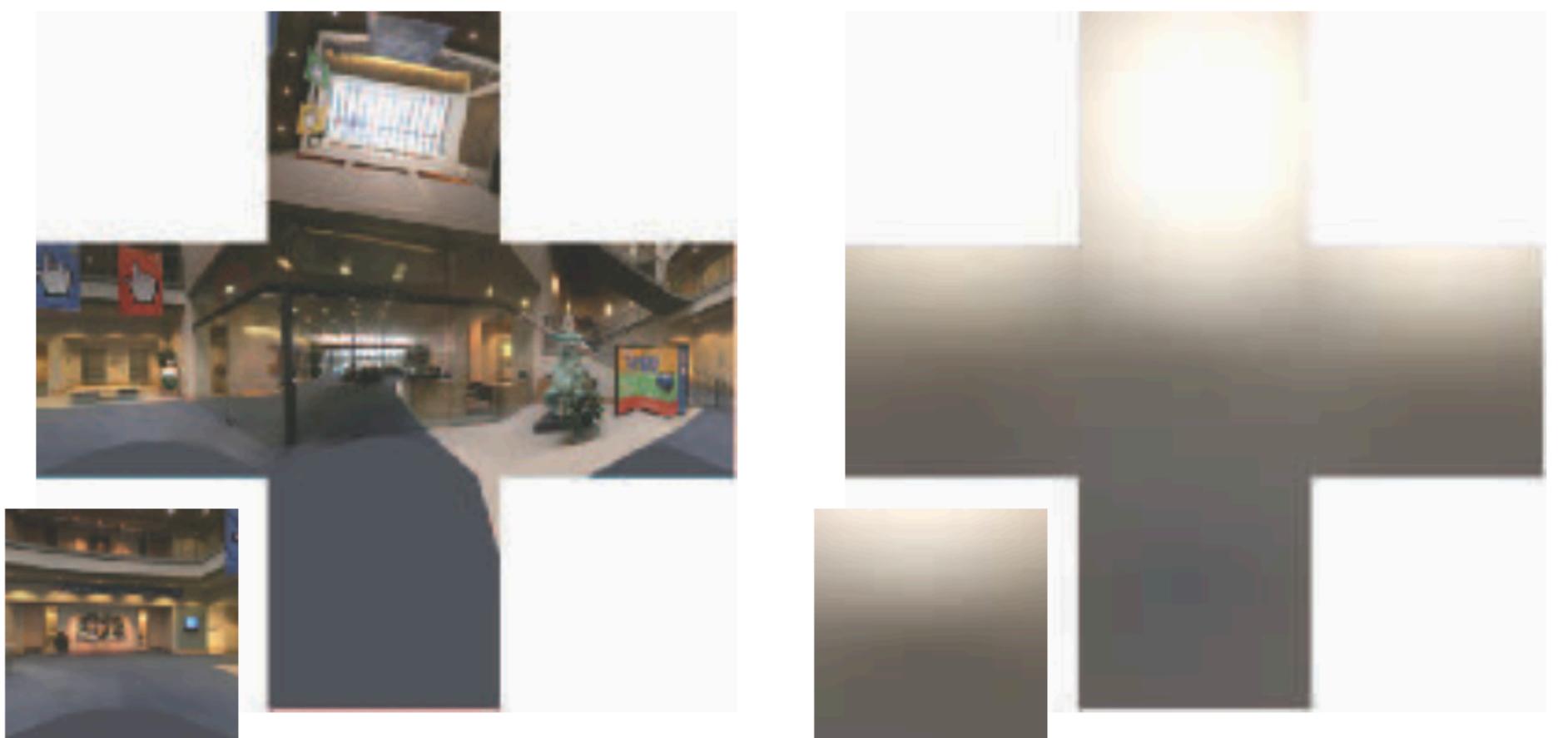


Irradiance Environment Mapping

방사조도 환경 맵은 일반적으로 큐브 맵과 같은 뷰 독립적인 표현으로 specular 환경 또는 반사 맵과 별도로 저장 및 액세스된다. 방사조도 환경 맵은 매우 넓은 필터를 사용하기 때문에 샘플링을 통해 즉시 효율적으로 생성하기 어렵다.

확산 또는 거친 표면에 대한 필터링된 환경 맵은 낮은 해상도로 저장할 수 있지만 64x64 텍셀의 큐브 맵 면과 같은 장면의 비교적 작은 반사 맵에서 생성될 수도 있다. 이 접근법을 이용하면 작은 질감으로 렌더링된 영역 광원이 텍스트 사이에 떨어져 빛이 완전히 깜빡이거나 떨어지도록 할수 있는데, 이 문제를 피하기 위해 동적 환경지도를 렌더링할때 이러한 광원을 큰 카드로 표현할 것을 제안한다.

광택 반사와 마찬가지로 동적 광원을 사전 필터링된 방사조도 환경 맵에 추가할 수 있다.



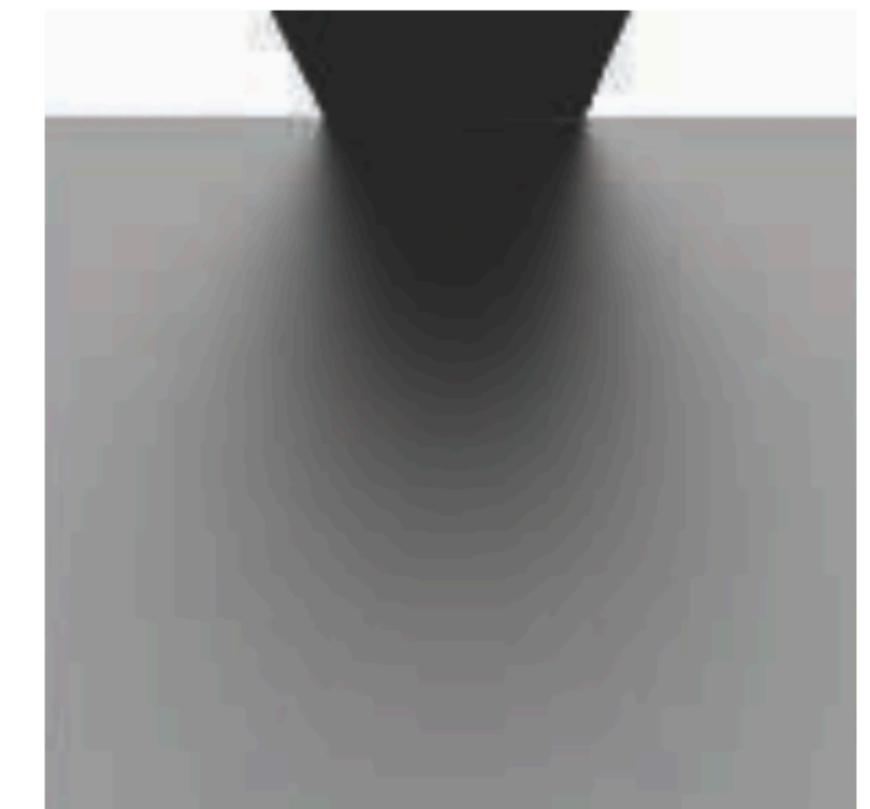
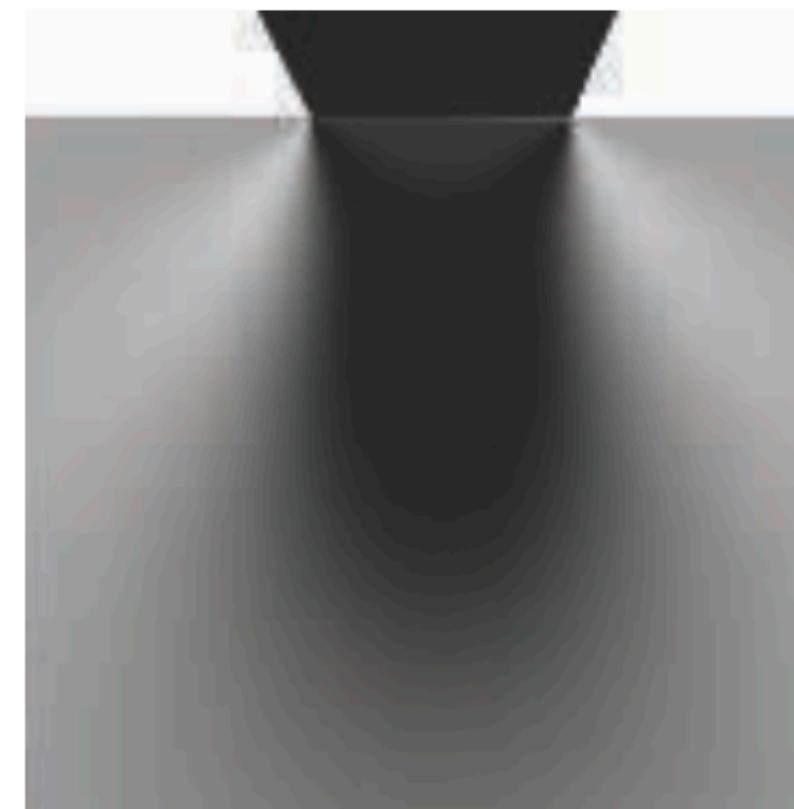
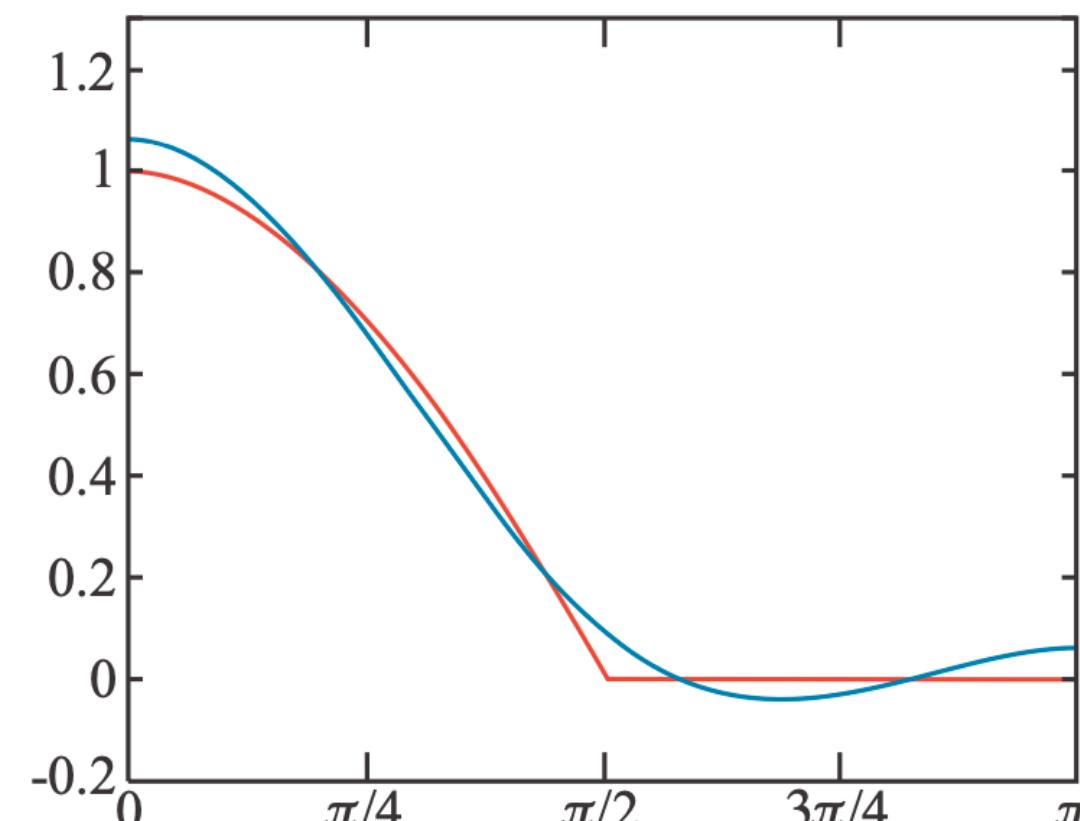
Irradiance Environment Mapping

Spherical Harmonics Irradiance

Spherical harmonics는 환경 조명으로부터의 방사조도가 매끄럽기 때문에 방사조도 환경 맵 표현으로 꽤 인기가 있다. 방사광을 코사인 로브로 변환하면 환경 맵에서 모든 고주파 성분이 제거된다.

모든 방사조도 환경 맵은 구면 함수로 해석될 수 있는데 이 형태는 큐브 또는 포물선 지도보다 더 간결한 표현이며 렌더링하는 동안 텍스처에 액세스하는 대신 일부 간단한 다항식을 평가하여 방사조도를 재구성 할 수 있다. 또한 환경 맵을 방사 조도 환경 맵으로 필터링 할 수 있다. 일반적인 구면 함수와 회전 대칭 함수 사이에 구면 convolution을 수행한 결과는 구면에 대한 또 다른 함수이다.

곡선이 0이어야 할 때 움직이는 것을 신호처리에서 Ringing이라고 하나 근사치는 매우 가깝다. 극단적인 조명 조건에서 색상 이동 또는 사물의 그늘진 면에 있는 밝은 구슬 방사조도 환경 맵이 간접 조명만 저장하는데 사용되는 경우 ringing은 문제가 되지 않는다.



Irradiance Environment Mapping

동적으로 렌더링된 큐브 환경 맵은 SH basis에 투영할 수 있다. 큐브 환경 맵은 들어오는 방사 함수의 이산 표현이므로 구 위의 적분은 큐브 맵 텍셀 위의 합이 된다.

$$k_{Lj} = \sum_t f_j(\mathbf{r}[t]) L[t] d\omega[t],$$

$$k_{Ej} = k'_{\cos^+ j} k_{Lj} = k'_{\cos^+ j} \sum_t f_j(\mathbf{r}[t]) L[t] d\omega[t],$$

일반적인 분석 광원을 SH에 투영하는 용이성은 환경 조명이 멀리 있거나 강도가 낮은 광원을 위해 사용되는 경우 많기 때문에 중요하다. 렌더링에서 이러한 광원은 장면의 간접적인 빛, 즉 표면에서 반사되는 빛을 시뮬레이션하기 위해 배치된다. 특히 이러한 조명은 shading 처리된 물체에 비해 물리적으로 크고 장면의 다른 조명 소스에 비해 상대적으로 어두울 수 있기 때문에 specular 기여는 종종 fill light에 대해 계산되지 않는다. 이러한 요인들은 specular highlight를 더 넓게 만들고 덜 눈에 띄게 만든다. 이러한 유형의 빛은 물리적 채광 조명이 종종 그림자에 조명을 추가하는 데 사용되는 필름 및 비디오 조명과 유사하다.

Irradiance Environment Mapping

Other Representations

많은 방사조도 환경 맵에는 위쪽의 하늘 색상과 아래쪽의 지면 색상의 두 가지 주요 색상이 있는데 이 관찰에 의해 단 두가지 색상을 사용하는 반구 조명 모델을 제시한다.

$$E = \begin{cases} \pi \left(\left(1 - \frac{1}{2} \sin \theta\right) L_{\text{sky}} + \frac{1}{2} \sin \theta L_{\text{ground}} \right), & \text{where } \theta < 90^\circ, \\ \pi \left(\frac{1}{2} \sin \theta L_{\text{sky}} + \left(1 - \frac{1}{2} \sin \theta\right) L_{\text{ground}} \right), & \text{where } \theta \geq 90^\circ, \end{cases}$$

$$E = \pi \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} L_{\text{sky}} + \frac{1 - \cos \theta}{2} L_{\text{ground}} \right)$$



Forsyth는 특별한 경우로 방향, 양방향, 반구형 및 랩 조명을 포함하는 3중 조명이라고 불리는 저렴하고 유연한 조명 모델을 제시한다.

밸브는 원래 방사조도를 위해 주변 입방체 표현을 도입했다.

Harr 웨이블릿을 사용하여 모델 자체 shading에 대한 방사조도 환경 매핑을 일반화 하는 것을 보여준다.

Sources of Error

shading을 올바르게 수행하려면 non-punctual한 광원에 대한 적분을 평가해야 한다. 실시간 엔진은 몇 가지 중요한 조명을 분석적으로 모델링하며 조명 영역의 적분을 근사하고 그림자 맵을 통해 폐색을 계산한다. 멀리 떨어진 조명, 하늘, 채움 등 표면에 반사되는 빛과 같은 다른 모든 광원은 종종 specular 구성 요소에 대한 환경 큐브 맵과 diffuse 방사조도에 대한 구형 베이스로 표현된다.

실시간 shading 모델을 개발할 때 고려해야 할 중요한 측면은 다른 형태의 조명 사이의 불일치가 명확하지 않도록 하는 것이다. 서로 다른 표현의 일관된 빛 결과를 갖는 것은 시각적으로 각각이 저지르는 절대 근사 오차보다 훨씬 더 중요할 수 있다. 빛이 없는 것보다 빛이 새는 것이 더 눈에 띄기 때문에 폐색 또한 중요하다.

꽤 발전된 조명 모델을 봤더라도 이것들이 실제 조명 소스의 정확한 표현이 아니라는 것을 기억하는 것이 중요하다. 오류는 항상 지각적이고 결과 지향적인 프레임워크에서 평가되어야 한다.

