



高等计算机图形学

胡事民

清华大学计算机科学与技术系



今天的课程内容

- 双向反射分布函数 (**BRDF**: Bidirectional Reflectance Distribution Function)
 - 描述的是物体表面对光的反射性质
- 预备知识
- BRDF 的定义与性质
- BRDF 模型
- BRDF 的度量与评价
- 进阶: BSSRDF

引入



大千世界，物质材料多种多样，如何形式化描述这些物体的表面属性？如何真实地绘制渲染？



今天的主题： 一个关于光线如何被表面反射的物理描述，也就是**BRDF**



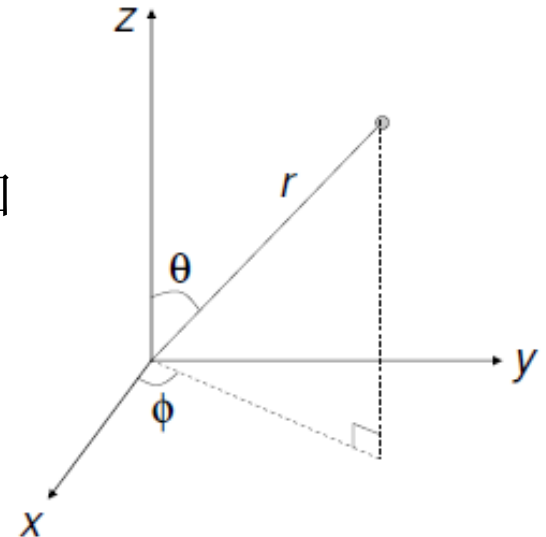
一些预备知识

- 球面坐标 (Spherical Coordinate)
- 立体角 (Solid Angle)
- 投影面积 (Foreshortened Area)
- 光能 (Radiant Energy)
- 光通量 (Radiant Flux)
- 发光强度 (Intensity)
- 光亮度 (Radiance)
- 辉度 (Irradiance)



球面坐标 (Spherical Coordinate)

- 光线主要通过方向来描述，通常来说用球面坐标表达比用笛卡尔坐标更方便
- 如图所示，球面坐标系中的方向向量可以用下面三个分量指定：
 - r 表示向量的长度
 - θ 表示向量和 z 轴正方向的夹角
 - ϕ 表示向量在 x - y 平面上的投影和 x 轴正方向的夹角





球面坐标 (Spherical Coordinate)

- 三维笛卡尔坐标 $C(x, y, z)$ 和球坐标 $S(r, \theta, \phi)$ 存在如下的对应关系:

- $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

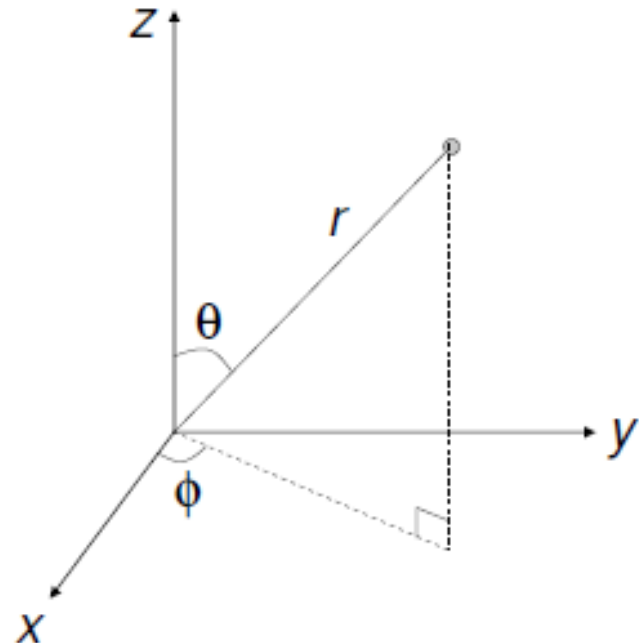
- $\theta = \arccos(z/r)$

- $\phi = \arctan(y/x)$

- $z = r \cos(\theta)$

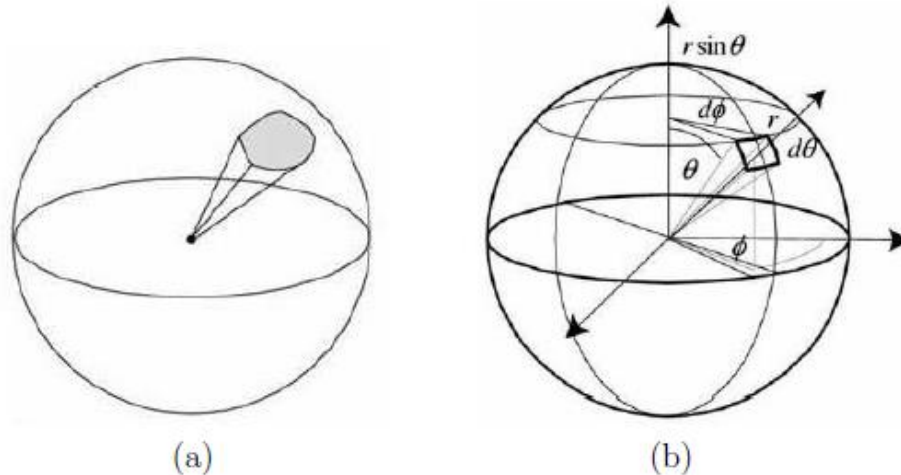
- $y = r \sin(\theta) \sin(\phi)$

- $x = r \sin(\theta) \cos(\phi)$



立体角 (Solid Angle)

- 立体角描述了一个圆锥体在以其顶点为球心，半径为1的球面上所张成的视野大小，是平面角在三维的自然推广
- 立体角的最大值为全角： 4π ，该最大值可以在区域为整个球面时取到





立体角 (Solid Angle)

- 立体角 ω 具有如下微分形式:

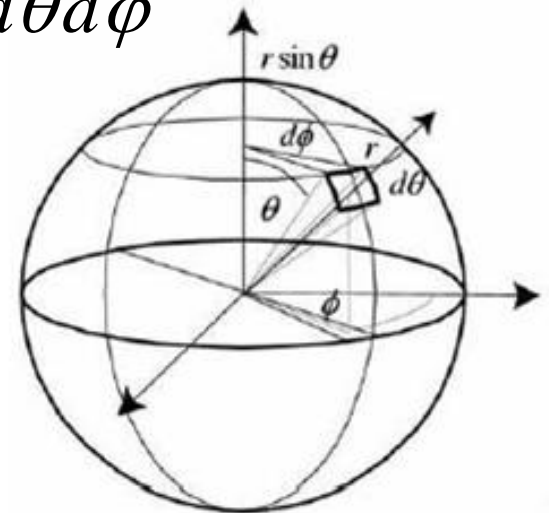
$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \quad \begin{array}{l} \text{面积微元} \\ \text{半径平方} \end{array}$$

- 由于面积微元在球面坐标系下可以写成:

$$dA = (rd\theta)(r \sin \theta d\varphi) = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

- 因此:

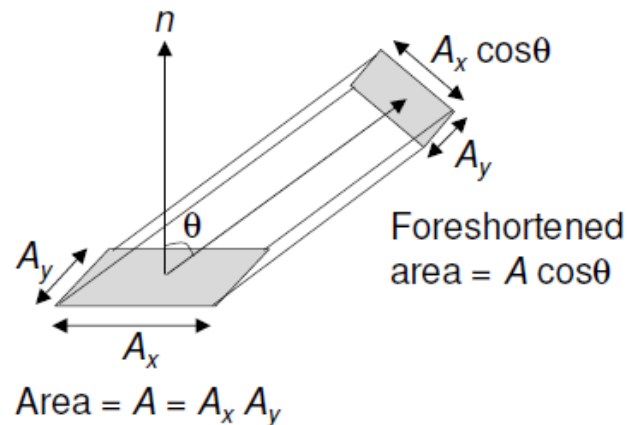
$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\varphi$$





投影面积 (Foreshortened Area)

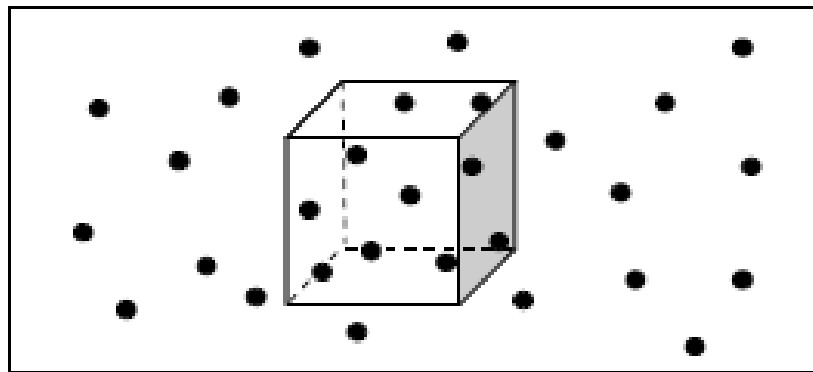
- 投影面积描述了物体表面相对于某个视线方向下的可见面积
- 对于面积微元 dA ，其沿着与法向夹角为 θ 方向的可见面积为： $dA \cos \theta$





光能 (Radiant Energy)

- 光能表示的是 (一个区域中) 光子能量的总和
- 光能通常使用符号 Q 来表示，其单位是焦耳 (J)



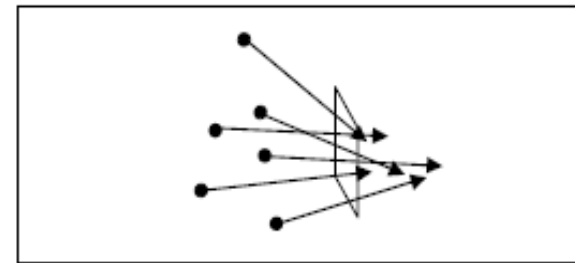
Radiant energy Q



光通量 (Radiant Flux)

- 光能并不会停留和储存在某个位置，而是在始终不断运动着的
- 光通量描述的是在单位时间穿过截面的光能：

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$



Radiant flux Φ

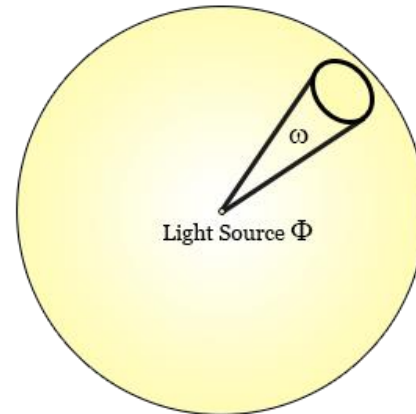
– 通常使用符号 Φ 来表示，单位是瓦特 (W)



发光强度 (Intensity)

- 对于一个点 (例如点光源) 来说, 发光强度表示单位立体角上的光通量:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

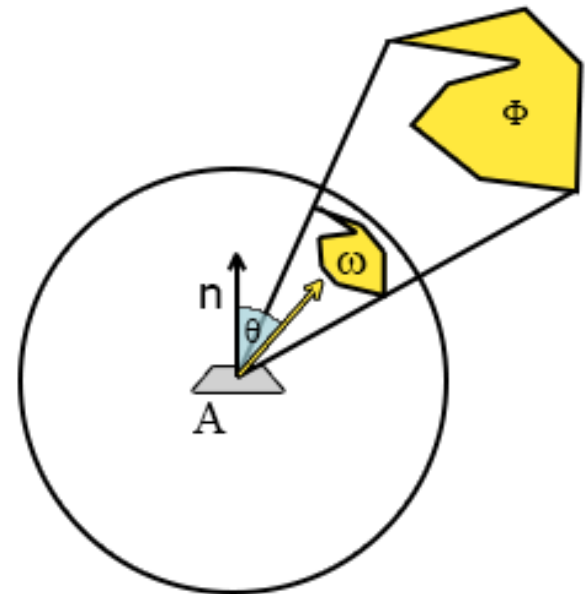


- 简称光强, 使用符号 **I** 来表示, 单位是**W**



光亮度 (Radiance)

- 光亮度表示物体表面沿某一方向的明亮程度，它等于单位投影面积和单位立体角上的光通量，使用符号 **L** 来表示，单位是 **W/m²**
- Radiance描述了渲染中“一条光线”的性质，即来自于某一方向的光线在物体表面单位面积上的光通量





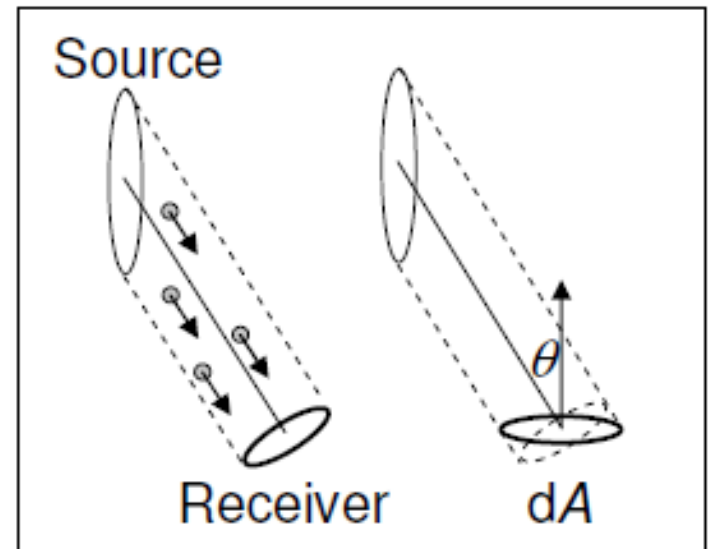
光亮度 (Radiance)

- 光亮度的微分形式:

$$L = \frac{d^2\Phi}{\boxed{dA \cos \theta} d\omega}$$

投影面积

光亮度 L 是发光强度
 I 在投影面积上的微分



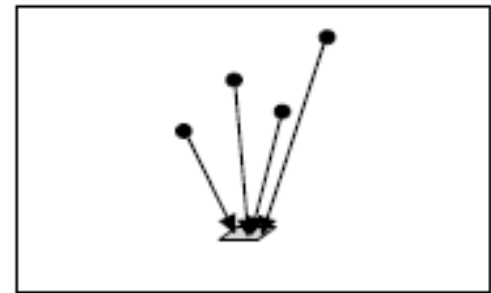
Foreshortening



辉度 (Irradiance)

- 来自各个方向的入射光线的光亮度 (Radiance) 作用于物体表面，形成光能对该表面的总影响程度——辉度。辉度等于单位面积上的光通量：

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$



Irradiance E

- 通常使用符号 **E** 来表示，单位是 **W/m²**
- 单位时间通过单位面积的光能

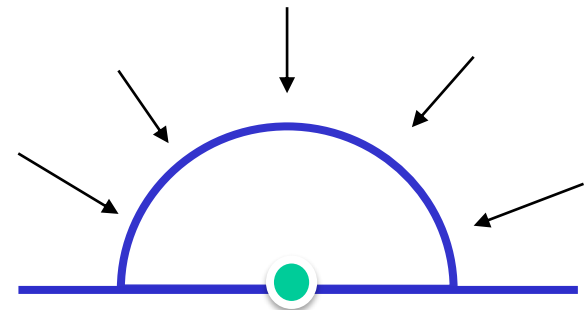


辉度与光亮度的关系

- 只要光线的方向与物体表面法向的夹角大于90度，该光线就会对物体表面的辉度产生贡献
- 所有可能产生贡献的入射光线方向构成了一个完整的半球面，因此辉度Irradiance可以写成光亮度Radiance在入射光所形成的半球上的积分：

$$\frac{d\Phi}{dA} = E = \int_{\Omega} L(\omega) \cos \theta d\omega$$

- Ω 是入射光所形成的半球
- $L(\omega)$ 是沿 ω 方向的光亮度





空间立体角的最大度数是

- ☐ A 2π
- ☐ B π
- ☐ C 6π
- ☒ D 4π

提交



BRDF 的定义与性质

- BRDF 的定义
- BRDF 的性质
 - 可逆性 (Reciprocity)
 - 能量守恒性质
 - 基于 BRDF 的渲染方程 (Rendering Equation)



BRDF 的定义

- 双向反射分布函数 (**BRDF**: Bidirectional Reflectance Distribution Function)
- BRDF 描述的是物体表面将光能从任何一个入射方向反射到任何一个视点方向的反射特性
- BRDF 模型是绝大多数图形学算法中用于描述光反射现象的基本模型



BRDF 的定义

- BRDF 是关于入射光方向和反射光方向的**四维实值**函数，它等于反射方向的光亮度和沿入射方向的入射光的辉度之比：

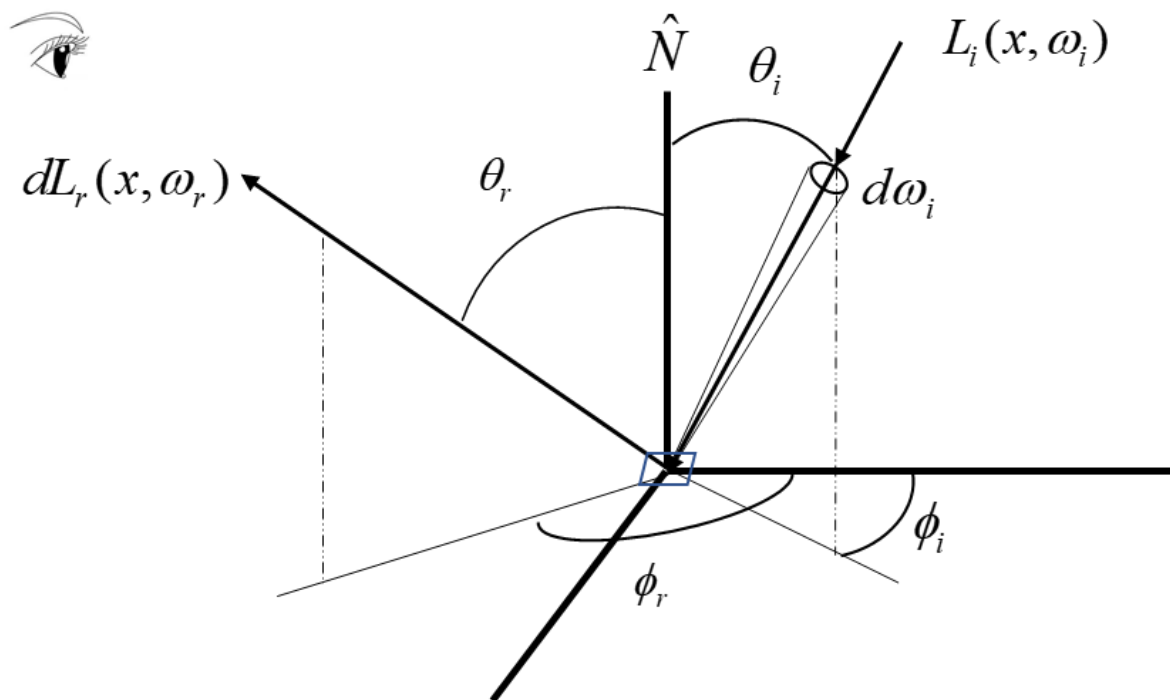
$$f(\omega_i \rightarrow \omega_r) = \frac{dL_r(\omega_r)}{dE_i}$$

- 可以写成关于入射光的光亮度的形式：

$$f(\omega_i \rightarrow \omega_r) = \frac{dL_r(\omega_r)}{L_i(\omega_i) \cos \omega_i d\omega_i}$$



BRDF 的定义





BRDF 的可逆性

- 可逆性 (Reciprocity)

- BRDF 的可逆性源自于 Helmholtz 光路可逆性 (Helmholtz Reciprocity Rule)
- BRDF 的可逆性是说：交换入射光与反射光的角色，并不会改变 BRDF 的值：

$$f(\omega_i \rightarrow \omega_r) = f(\omega_r \rightarrow \omega_i)$$



能量守恒性质

- BRDF 需要遵循的另一个物理定律是能量守恒定律，能量守恒定律指出：入射光的能量与出射光的总能量应该相等
- 能量守恒方程如下：

$$Q_{incoming} = Q_{reflected} + Q_{absorb} + Q_{transmitted}$$

- 由此我们知道：

$$Q_{reflected} \leq Q_{incoming}$$



能量守恒性质

- 因此 BRDF 必须满足如下的积分不等式，也就是所谓的能量守恒性质：

$$\int_{\Omega} f(\omega_i \rightarrow \omega_r) \cos \omega_r d\omega_r \leq 1$$

$$Q_{reflected} \leq Q_{incoming}$$



渲染方程 (Rendering Equation)

- 渲染方程 (Rendering Equation)

用于计算环境光照明下的反射光的光亮度，
它可以写成不同角度下入射光的光亮度
乘以 BRDF 的积分：

$$L_r = \int_{\Omega} f(\omega_i \rightarrow \omega_r) L(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$



渲染方程之父：Jim Kajiya

- Jim Kajiya在渲染和计算机图形硬件设计领域有着诸多贡献，获得Steven Anson Coons奖。
- 他最为著名的工作就是1986年在SIGGRAPH以独立作者身份发表的论文：The Rendering Equation。

THE RENDERING EQUATION

James T. Kajiya
California Institute of Technology
Pasadena, Ca. 91125



小插曲



- 1993年Jim Kajiya当选SIGGRAPH'93的Technical Program主席，并大幅修改了SIGGRAPH的审稿流程，一直沿用至今。此外，他还写了一篇名为“**How to get your SIGGRAPH Paper rejected.**”的文章，到现在还常常为人所拜读和喜欢。

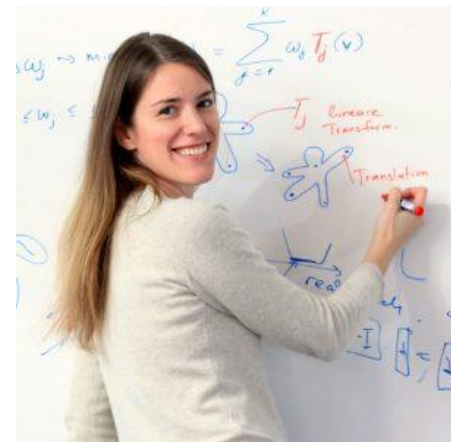
– 审稿：例子

Papers_0626

3.0, 2.2, 3.4, 3.6, 3.8 Tertiary average 3.6

Average 3.2

2019开始 -2, -1, 0, 1, 2 Olga Sorkine





BRDF 模型

- 为了方便和高效地使用 BRDF 数据，它们往往被组织成为参数化的数值模型
- BRDF 的数值模型具有如下三类：
 - 经验模型 (Empirical Models)
 - 基于物理的模型 (Physical-based Models)
 - 数据表达的模型 (Data-driven Models)



BRDF 模型

- **经验模型 (Empirical Models)**
 - 使用基于实验提出的公式对 BRDF 做快速估计
- **基于物理的模型 (Physical-based Models)**
 - 根据物体表面材料的几何以及光学属性建立反射方程，从而计算 BRDF
- **数据表达的模型 (Data-driven Models)**
 - 将 BRDF 按照实测数据建立查找表，以便快速的查找和计算



经验模型 (Empirical Models)

- 经验模型提供简洁的公式以便于反射光线的快速计算
- 经验模型不考虑材质特性，仅提供一个反射光的粗糙近似
- 经验模型不一定满足物理定律，如 Helmholtz 可逆性或能量守恒性质等
- 经验模型因为其简洁和高效性被广泛运用

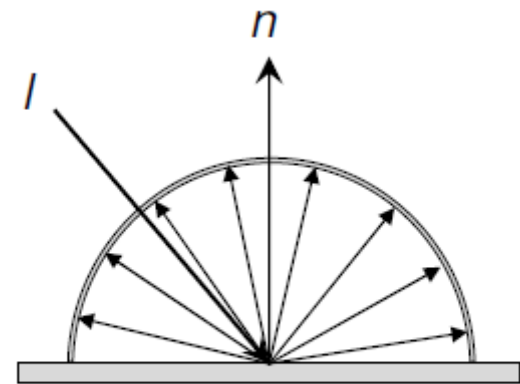


经验模型1: Lambertian

- **Lambertian模型**是最基本的反射模型:
 - 入射光线被均匀地反射到各个方向
 - 沿不同方向的 BRDF 是一个常数 $f(l \rightarrow v) \equiv \rho_d$
- **反射率 (Albedo): ρ**
 - 反射率是反射光能与入射光能之比

$$L_r(\omega_r) = \int_{\Omega} \rho_d L_i(\omega_i) \cos \omega_i d\omega_i = \rho_d \int_{\Omega} L_i(\omega_i) \cos \omega_i d\omega_i = \rho_d E_i$$

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\int_{\Omega} L_r(\omega_r) \cos \omega_r d\omega_r}{\int_{\Omega} L_i(\omega_i) \cos \omega_i d\omega_i} = \frac{\rho_d E_i \pi}{E_i} = \pi \rho_d$$

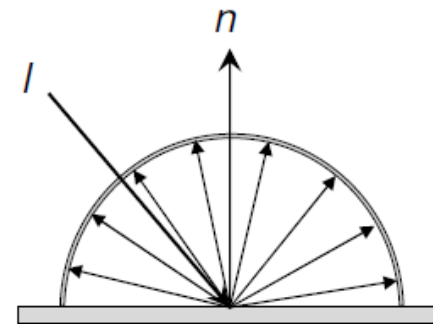


Lambertian



Lambert 漫反射模型

- Lambert 漫反射模型能够很好地用于描述那些包含纯粹漫反射的物体 (例如: 纸张)
- Lambert 漫反射模型不能表现出材质的镜面反射效果, 而镜面反射对于金属材料非常重要
- 由于 Lambert 模型的简洁以及对漫反射良好的描述特性, 它常常在其他的经验模型 (例如: Phong 模型) 中作为分量的形式被包含



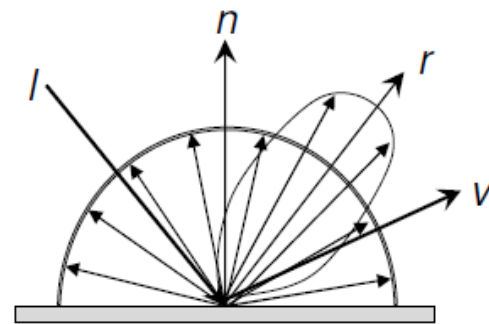
Lambertian



Phong 模型

- **Phong 模型**是在 Lambert 漫反射模型的基础上，添加了一项镜面反射项，以表达在反射角上的镜面反射效果：

$$f(l \rightarrow v) = \rho_d + \rho_s \frac{(r \cdot v)^s}{(n \cdot l)}$$



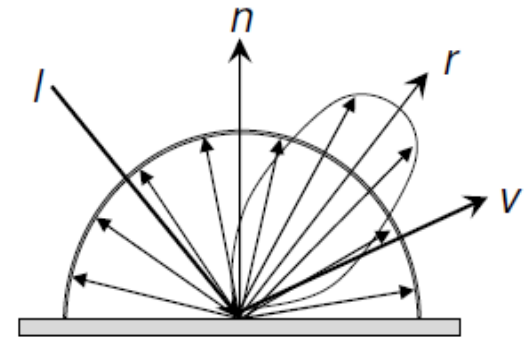
其中， ρ_d 和 ρ_s 分别表示漫射光和镜面反射光线的反射率，s 表示发光指数，用于描述镜面反射的锐利度（shininess）



Phong 模型

- **Phong 模型**是在 Lambert 漫反射模型的基础上，添加了一项镜面反射项，以表达在反射角上的镜面反射效果：

$$f(l \rightarrow v) = \rho_d + \rho_s \frac{(r \cdot v)^s}{(n \cdot l)}$$



Phong

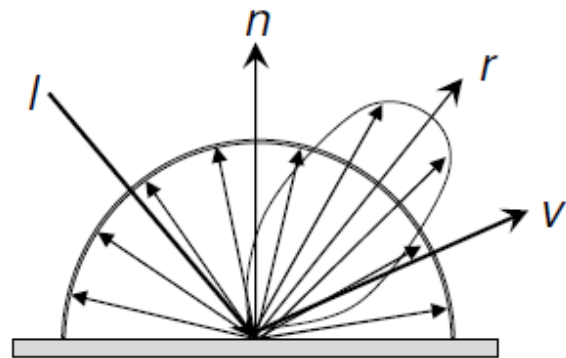
- **Phong 模型不满足可逆性：**

$$f(l \rightarrow v) \neq f(v \rightarrow l)$$



Phong 模型

- 尽管 Phong 模型缺乏物理解释，并且对于某些金属材质，它并不十分准确；但 Phong 模型仍是目前计算机图形学中被最广泛使用的基于经验的反射模型
- Phong 模型的优势在于它的简洁和高效性，以及能够同时表现漫反射和镜面反射的特征



Phong



Phong 模型的扩展

- Phong 模型的大部分扩展是为了实现进一步的加速

- **Blinn-Phong 模型**

- 通过引入入射方向 l 和视线方向 v 的角平分线 h , 使用 h 和法向 n 的点积替代原先 Phong 模型中 r 与 v 的点积, 可以简化运算:

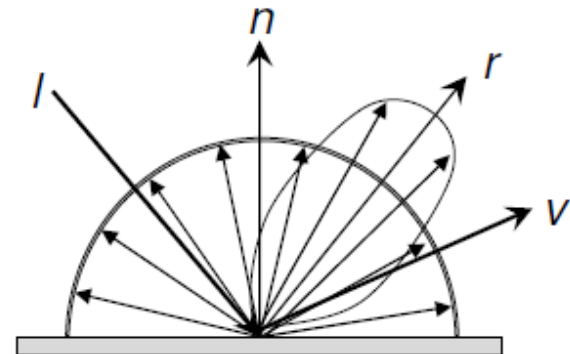
$$f(l \rightarrow v) = \rho_d + \rho_s \frac{(n \cdot h)^s}{(n \cdot l)} \quad \text{where } h = (v + l) / 2$$





Phong 模型的扩展

- 快速 Phong 绘制 (Fast Phong Shading)
- 由 Bishop 和 Weimer 发表在 1986 年的 ACM SIGGRAPH 年会上
- 其核心思想是使用制表和插值的方法对指数项 $(r \cdot v)^s$ 进行快速计算，从而实现绘制的加速



Phong



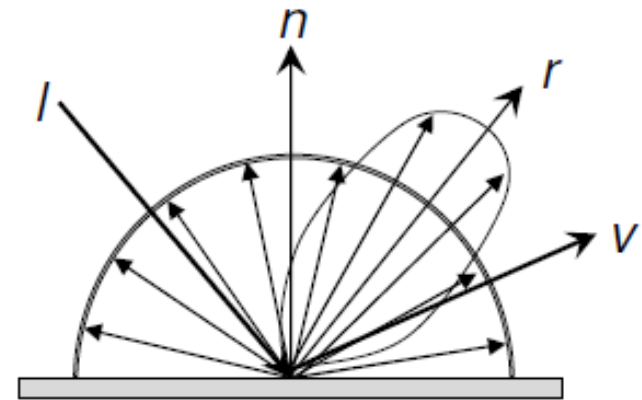
Phong 模型的扩展

- 可逆的 Phong 模型 (Modified Phong Model)

- 通过去掉 Phong 模型中镜面反射分量的分母项，从而使得修改后的 Phong 模型能够满足可逆性：

$$f(l \rightarrow v) = \rho_d + \rho_s (r \cdot v)^s$$

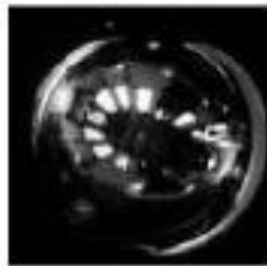
$$f(l \rightarrow v) = f(v \rightarrow l)$$



Phong



Phong 模型的示例效果



Mirror



Diffuse



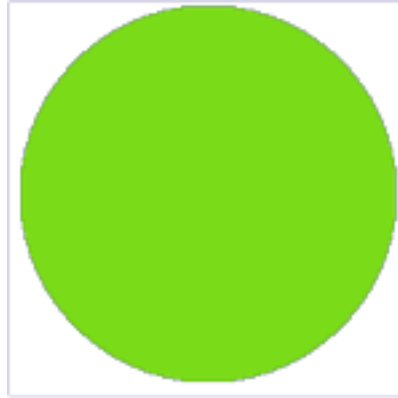


Phong模型示例1



漫射

+



环境光

+



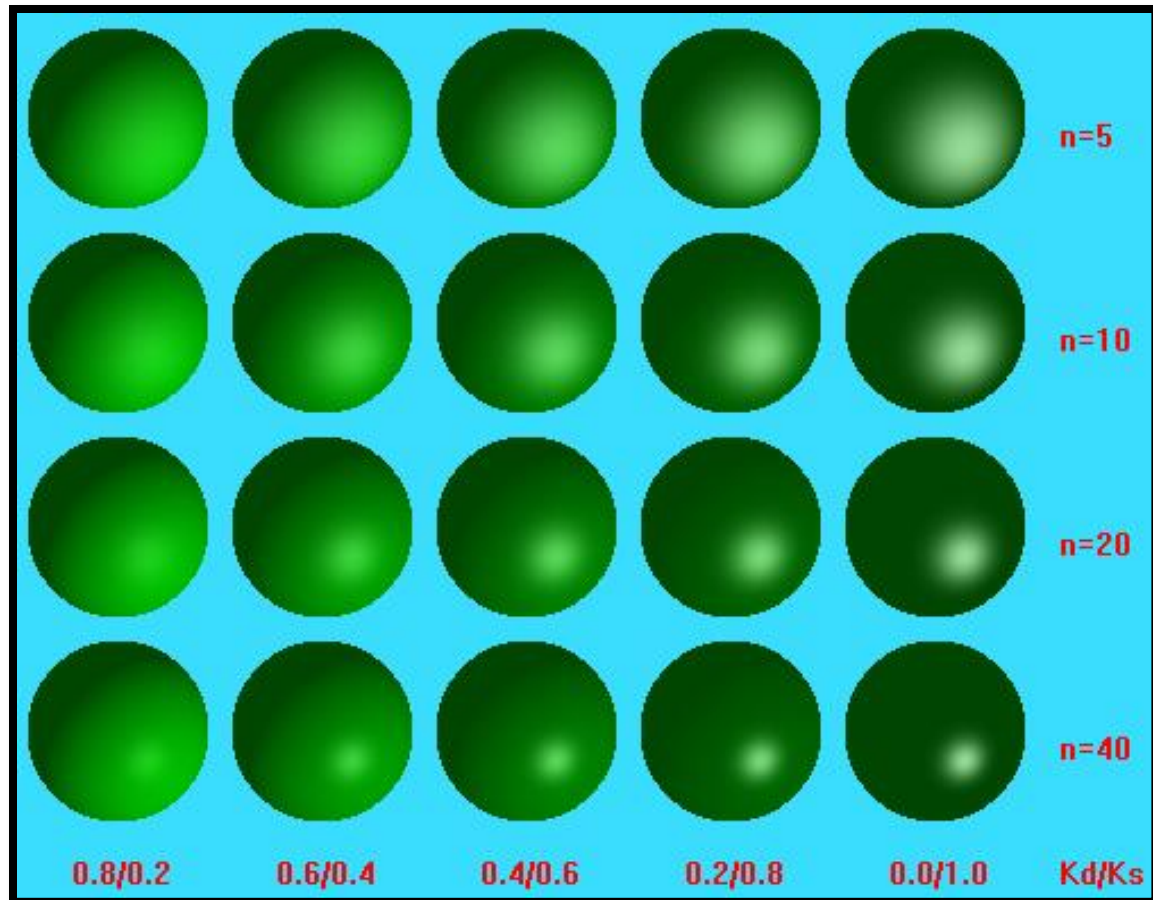
镜面反射

=





Phong模型示例2



物理模型 (Physical-Based Models)



- 物理模型

- 经验模型(empirical models)源于设计者的直觉和实践经验，而物理模型则建立在有关光的相互作用的科学知识上
- 通过包含材料的各种几何及光学性质来尽可能精确的近似现实世界中的材质

物理模型(Physical-Based Models)

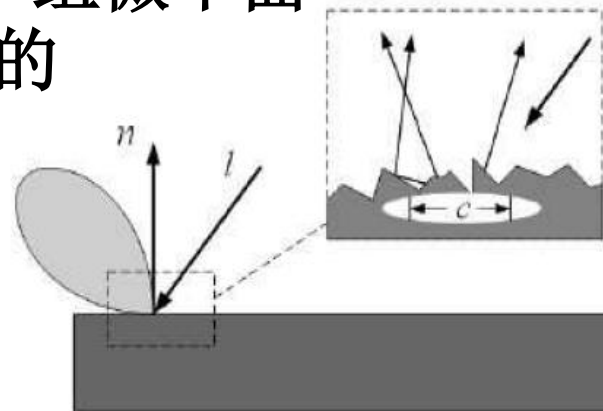


- 物理模型

- 通常建立在被称为表面粗糙度（ **surface roughness** ）的细节几何结构上

- 粗糙度：

- 从微观角度来看，几乎没有完全光滑的表面
 - 微观尺度的表面几何是通过一组微平面（ **microfacets** ）集合来建模的
 - 粗糙度通过微平面法向的统计分布来表达的



物理模型(Physical-Based Models)



- 菲涅尔项 (Fresnel Term)

- 在实际应用中，我们发现，单向反射性在擦地角(grazing angles)附近增大



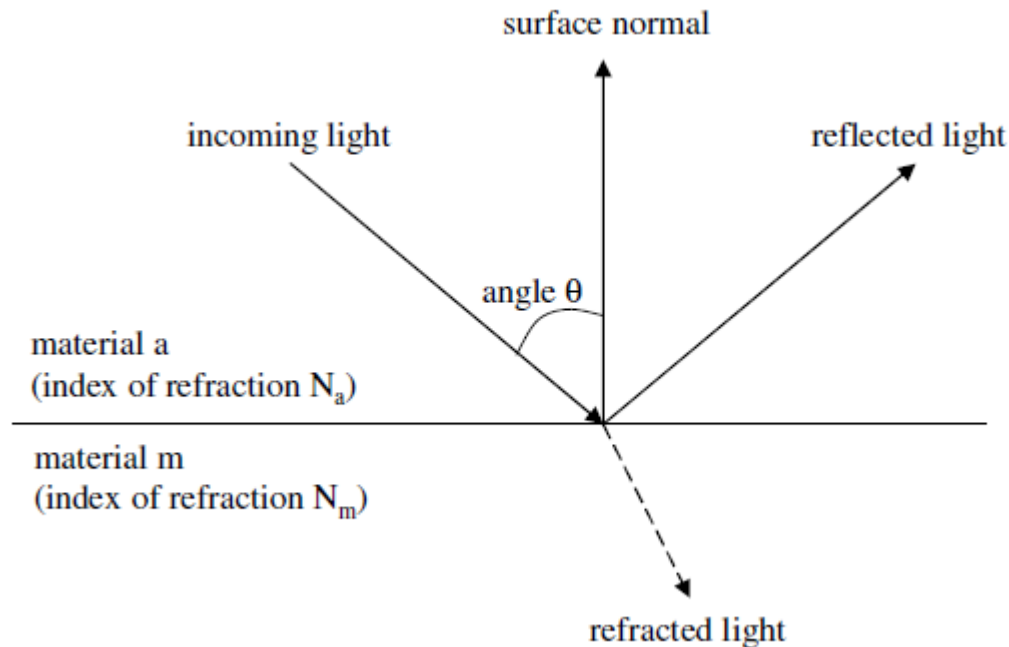
- 入射光的反射率是由从麦克斯韦电磁波方程组中得到的菲涅耳公式计算的

物理模型 (Physical-Based Models)



- 菲涅尔项 (Fresnel Term)

菲涅尔反射几何



物理模型(Physical-Based Models)



- 菲涅尔项 (Fresnel Term)
 - 定义如下:

$$F_s = \frac{a^2 + b^2 - 2a \cos \theta + \cos^2 \theta}{a^2 + b^2 + 2a \cos \theta + \cos^2 \theta}$$
$$F_p = F_s \frac{a^2 + b^2 - 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta}{a^2 + b^2 + 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta}$$

$$2a^2 = \sqrt{(\eta^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4\eta^2 \kappa^2} + (\eta^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta)$$
$$2b^2 = \sqrt{(\eta^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4\eta^2 \kappa^2} - (\eta^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta)$$

$$\eta = \frac{\eta_m \eta_a + \kappa_m \kappa_a}{\eta_a^2 + \kappa_a^2}$$
$$\kappa = \frac{\eta_a \kappa_m - \eta_m \kappa_a}{\eta_a^2 + \kappa_a^2}$$

- 菲涅耳反射率: $F = (F_p + F_s)/2$



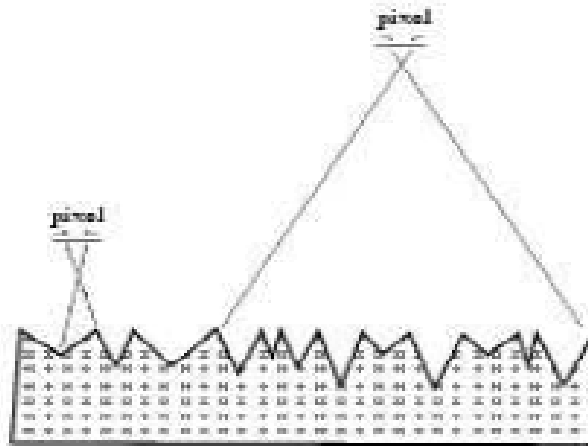
Cook-Torrance模型

- Cook-Torrance模型
 - 由Cook和Torrance提出[*A Reflectance Model for Computer Graphics*, ACM SIGGRAPH, 1981]
 - 在图形学中使用最早的BRDF物理模型
 - 是应用物理学家提出的 Torrance-Sparrow 模型的一个应用版本 [*Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces*, J. Optical Society of America, 1975]

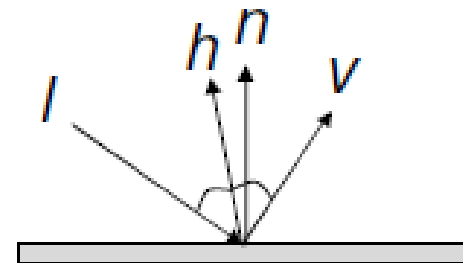


Cook-Torrance模型

- Cook-Torrance模型
 - 假设微平面是镜面反射的
 - 微平面被假定按如图所示V形沟槽排列



V-grooves



Directions



Cook-Torrance 模型

- Cook-Torrance模型

- 结合Lambertian漫射项与微平面反射的镜面反射项:

$$f_{\lambda} = d \frac{\rho_d}{\pi} + s F_{\lambda} \frac{DG}{4\pi(n \cdot l)(n \cdot v)}$$

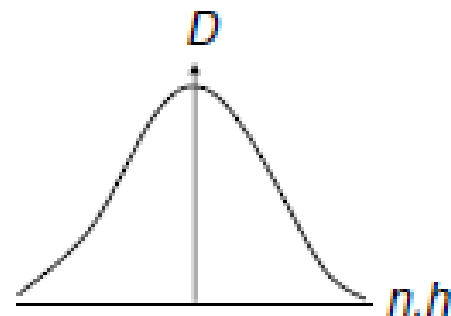
- 这里的 F_{λ} 是菲涅耳因子, D 是微平面法向的分布函数, G 是几何衰减因子, s, d 是镜面反射和漫反射系数



Cook-Torrance模型

- 微平面法向的分布函数 **D**
 - 由于微平面只有镜面反射，只有那些法向沿着平分线方向 \mathbf{h} 的才对镜面反射起作用
 - 采用Bechmann分布来描述:

$$D(h) = \frac{1}{m^2 \cos^4 \beta} e^{-\frac{\tan^2 \beta}{m^2}}$$



depends on roughness of surface

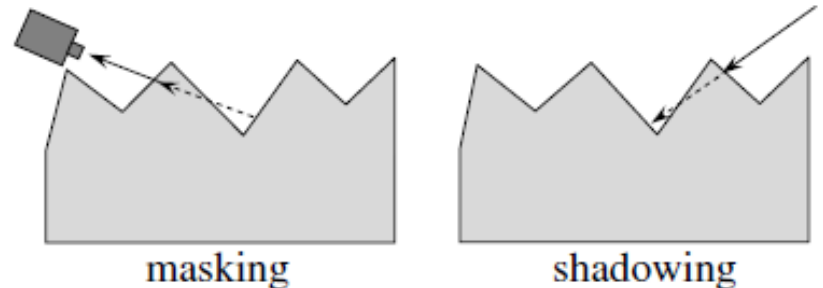
其中， m 是表面的粗糙度值， β 是 \mathbf{n} 和 \mathbf{h} 的夹角



Cook-Torrance模型

- 几何衰减系数 **G** (**Geometric Attenuation Factor**)
 - 考虑来自视角方向的遮挡效果和来自光线方向的阴影效果
 - 用于排除被遮挡的 (**masked**) 和阴影覆盖的 (**shadowing**) 微平面, G定义如下:

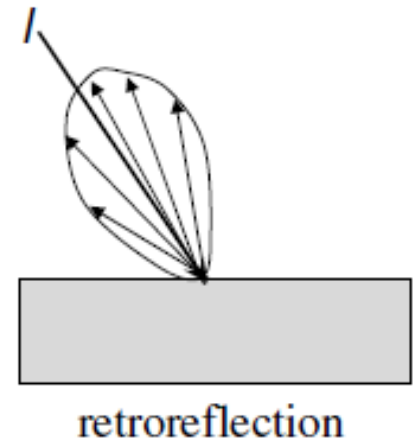
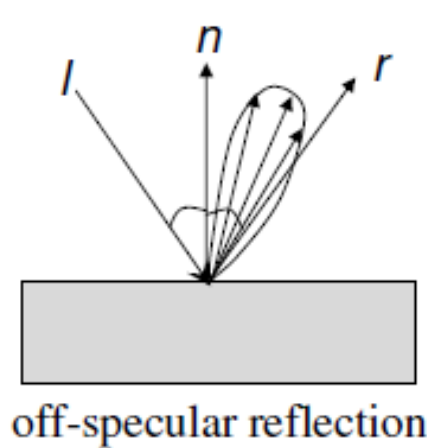
$$G(n, l, v) = \min \left\{ 1, \frac{2(n \cdot h)(n \cdot v)}{(v \cdot h)}, \frac{2(n \cdot h)(n \cdot l)}{(v \cdot h)} \right\}$$





Cook-Torrance模型

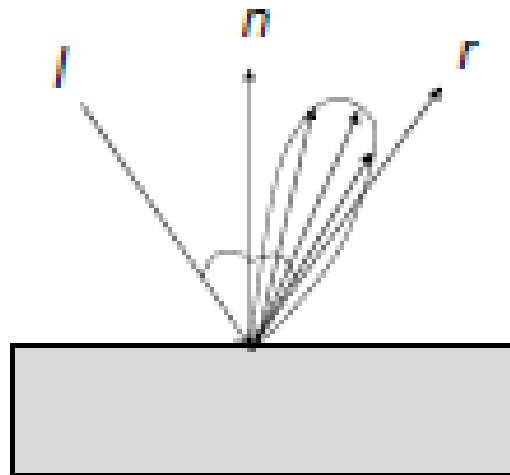
- 几何衰减系数 G (Geometric Attenuation Factor)
 - 这种对微平面遮挡和阴影的考虑使得可以产生某些反射特性
 - 一个是 反射方向不在镜面方向的反射 (off-specular reflection)
 - 另一个是逆反射 (retroreflection)





Cook-Torrance模型

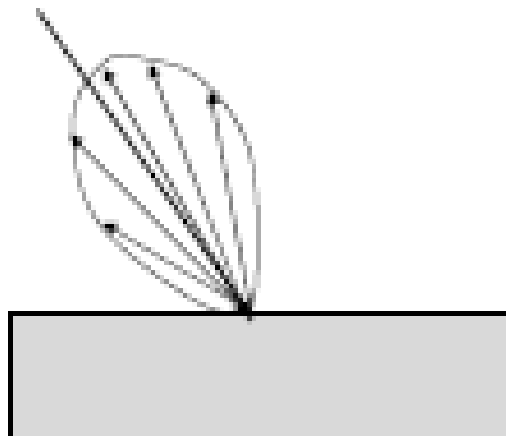
- 反射方向不在镜面方向的反射（off-specular reflection）
 - 反射方向不在镜面反射方向上
 - 这是典型的粗糙表面的特征





Cook-Torrance模型

- 逆反射（**Retroreflection**）
 - 很大一部分光线沿着反方向返回
 - 例如个满月图片，边缘看起来和中心一样明亮



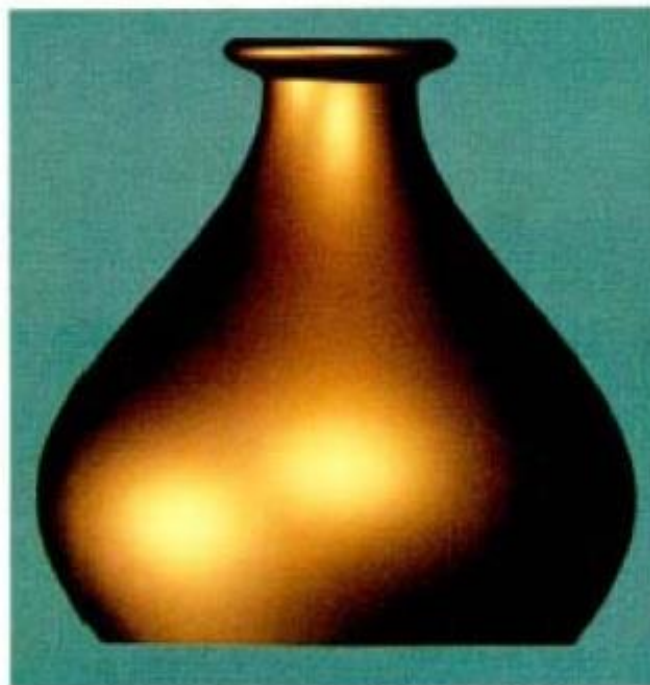
Cook-Torrance模型与Phong模型的结果对比



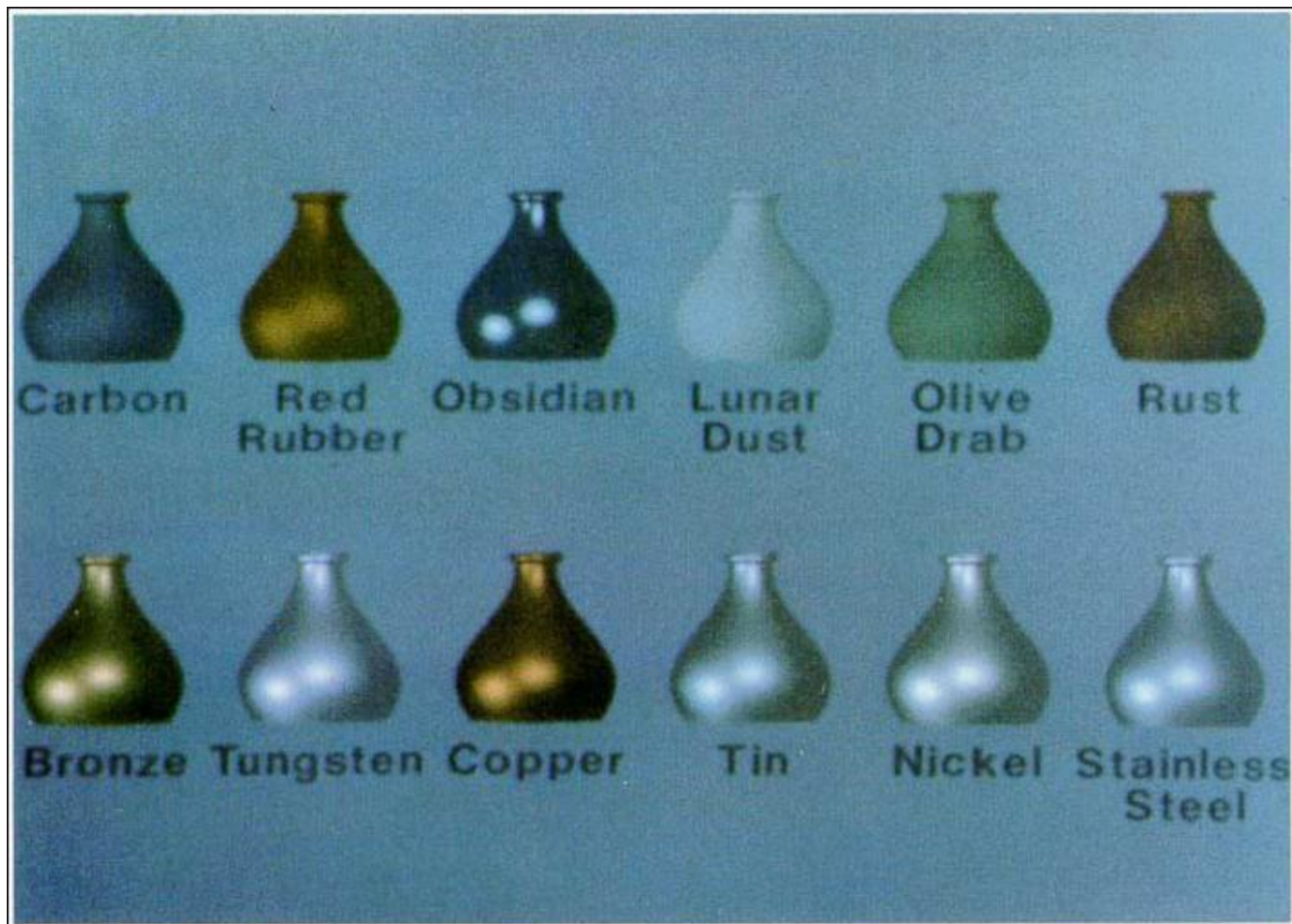
Plastic-looking copper rendered using Phong model

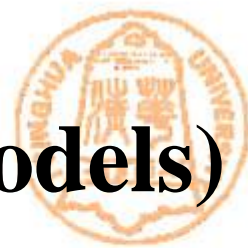


A Copper Vase with a more metallic appearance



更多的Cook-Torrance模型示例结果





其他的物理模型 (Physical-Based Models)

- **BRDF 可以分为两类**

- **各向同性 (Isotropic)**

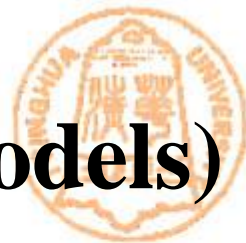
- 随机表面微结构



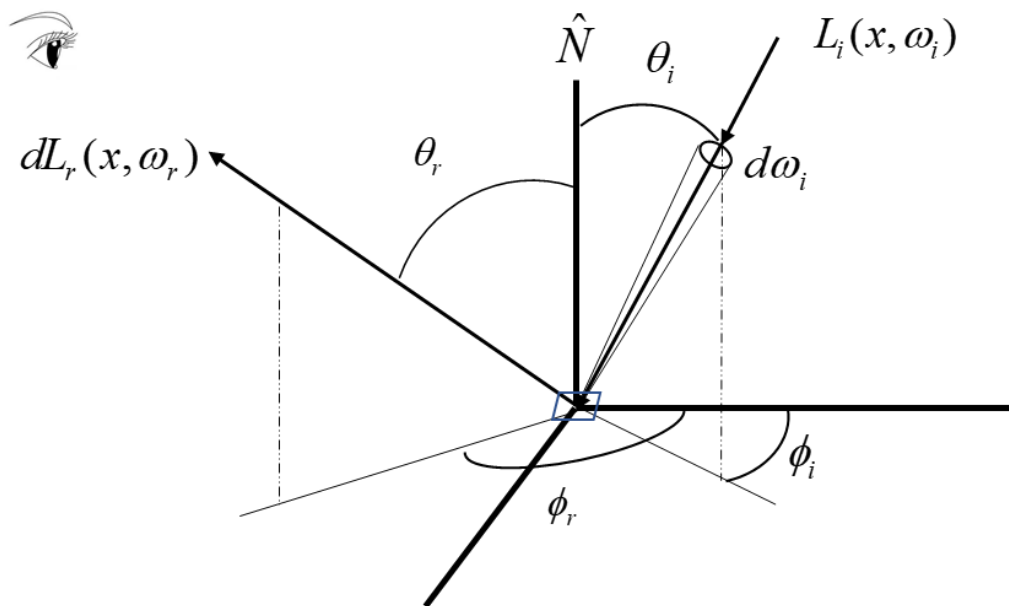
- **各向异性 (Anisotropic)**

- 有规律的表面微结构
 - 金属丝，绸缎，毛发





其他的物理模型 (Physical-Based Models)



各项异性: 当入射方向 ω_i 和出射方向 ω_r 同时绕表面法向 \hat{N} 旋转时, BRDF 值会发生改变。
对于各向同性材质, BRDF 值则会保持不变



Ward模型

- Phong 和 Cook-Torrance BRDF模型都不能处理各项异性的效果
- 现在我们介绍另一种BRDF模型:
Ward模型





Ward模型

- **Ward模型:**
 - 由Ward于 1992年提出[Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, ACM SIGGRAPH, 1992]
 - 介绍了一种更一般的表面法向表达方式：通过椭球体(ellipsoids)这种允许各向异性反射的形式来表达
 - 然而，由于没有考虑菲涅耳因子（Fresnel factor）和几何衰减因子（geometric attenuation factor），该模型更像是一种经验模型



Ward模型

- 各向同性的Ward模型定义为:

$$\rho_{bd \text{ iso}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \cdot \frac{1}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \delta / \alpha^2]}{4\pi\alpha^2}$$

其中:

ρ_d 是漫反射系数

ρ_s 是镜面反射系数

δ 是 \hat{n} 和 \hat{h} 的夹角

α 是表面坡度的标准差

- 将菲涅耳因子和几何衰减因子替换为一个用于保证分布在半球内积分的简单归一化项



Ward模型

- 各向异性的Ward模型定义为:

$$\rho_{\text{bd}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \cdot \frac{1}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \delta (\cos^2 \phi / \alpha_x^2 + \sin^2 \phi / \alpha_y^2)]}{4\pi\alpha_x\alpha_y}$$

其中:

ρ_d 是漫反射系数

ρ_s 是镜面反射系数

δ 是 \hat{n} 和 \hat{h} 的夹角

α_x 是 \hat{x} 方向表面坡度的标准差

α_y 是 \hat{y} 方向表面坡度的标准差

ϕ 是 \hat{h} 投影到表面的方位角



Ward模型示例结果

真实照片

各项同性Ward

各项异性Ward





更多BRDF类模型

- 更多的BRDF模型

- **Oren-Nayar模型** [*Generalization of Lambert's Reflectance Model* ACM SIGGRAPH, 1994]

- 将微平面当做Lambertian反射体而不是镜子

- **Poulin-Fournier模型** [*A Model for Anisotropic Reflection*, ACM SIGGRAPH, 1990]

- 将微平面的法向表示为一组平行的圆柱体，同样处理各项异性的情况



更多BRDF类模型

- 波动光学（Wave optic）相关模型
 - 由波动光学原理发展而来
 - 材料的微平面大小和光的波长相当
 - 基于不同的衍射(diffraction)理论，有两个工作
 - [He, et al., *A Comprehensive Physical Model for Light Reflection*, ACM SIGGRAPH, 1991]
 - [[Stam](#), *Diffraction Shaders*, ACM SIGGRAPH, 1999]
 - 虽然有很强的描述能力，但由于模型本身过于复杂而限制了它们的应用



更多BRDF类模型

- 波动光学相关的模型得到的效果

由方向光源照射CD产生的一幅图像，其中所有的高光自动地出现在了正确的位置





数据驱动的BRDF模型

- 度量一个大的材料集合的BRDF，并将其记录为高维向量
- 利用降维方法从这些数据中计算一个低维流型
- 代表性工作: Matusik et al. [*A Data-Driven Reflectance Model*, ACM SIGGRAPH, 2003]



BRDF模型表达形式的对比

- **经验模型 (Empirical Models):**
 - 计算简单，可以产生视觉上可接受的结果
- **物理模型 (Physical-based Models):**
 - 参数具有物理意义
 - 基于科学知识构建
- **数据驱动模型 (Data-driven Models):**
 - 灵活，对材料属性没有假设限定
 - 很大的数据集，通常需要数据降维方法来压缩数据
 - 需要对数据进行插值，会错失高光部分



一些例子

— 复杂场景的BRDF实时编辑

All-Frequency Real-Time BRDF Editing
in Complex Illumination

PaperID: 0042



一些例子

— 随时间变化的BRDF

Time-Varying BRDFs

**Bo Sun,
Kalyan Sunkavalli,
Ravi Ramamoorthi,
Peter Belhumeur,
Shree Nayar**

Columbia University

[audio]



BRDF度量、评价

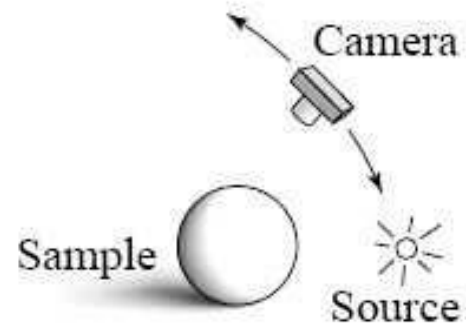
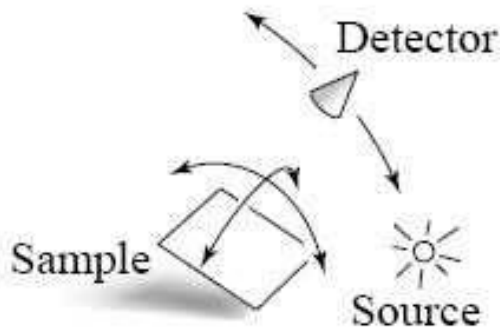
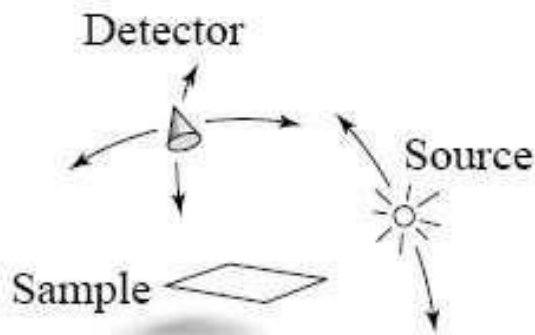
- 动机
 - 对具有未知反射属性的材料进行建模，并生成具有高度真实感的结果
 - 恢复BRDF和其它场景属性的过程有时也被称作逆渲染
 - BRDF度量概述
 - 度量设备
 - 实际获取中的问题



BRDF度量、评价

- 度量设备

- 由于BRDF是一个关于光线和视角的函数，其度量可通过对2D光照空间和2D视角空间进行采样获取

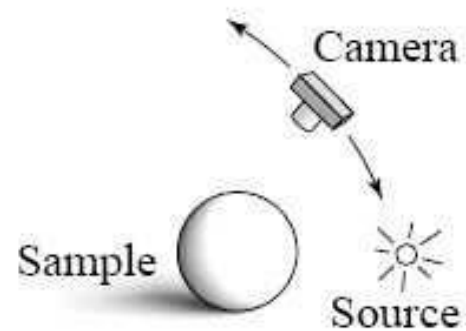
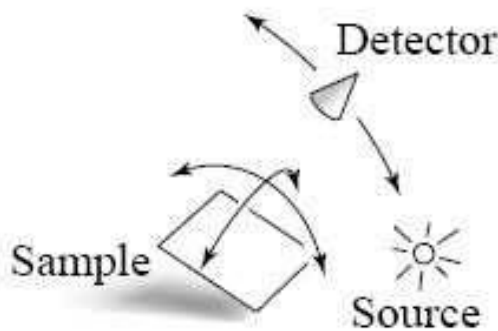
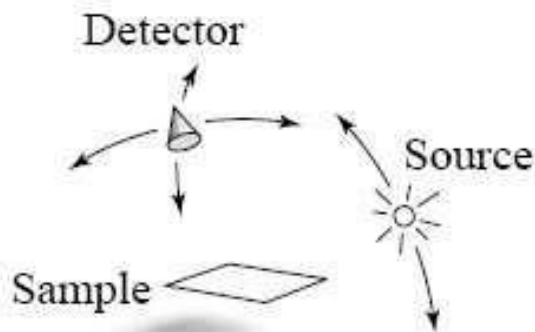




BRDF度量、评价

- 度量设备

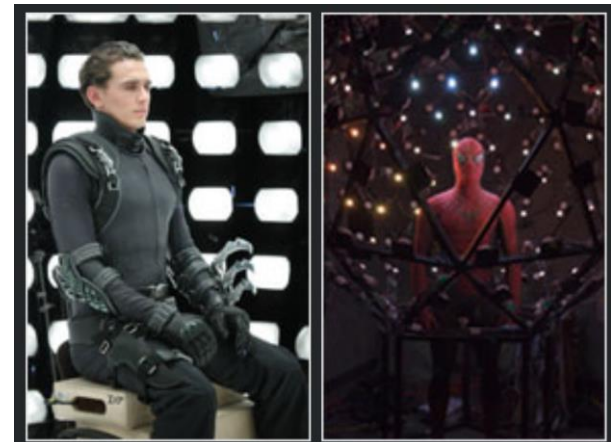
- 固定材料样本，移动光源和相机
- 固定光源，移动相机和样本
- 如果目标物体是由单一材料构成的已知凸几何体，可以固定光源和样本，移动相机





测量设备：Light Stage

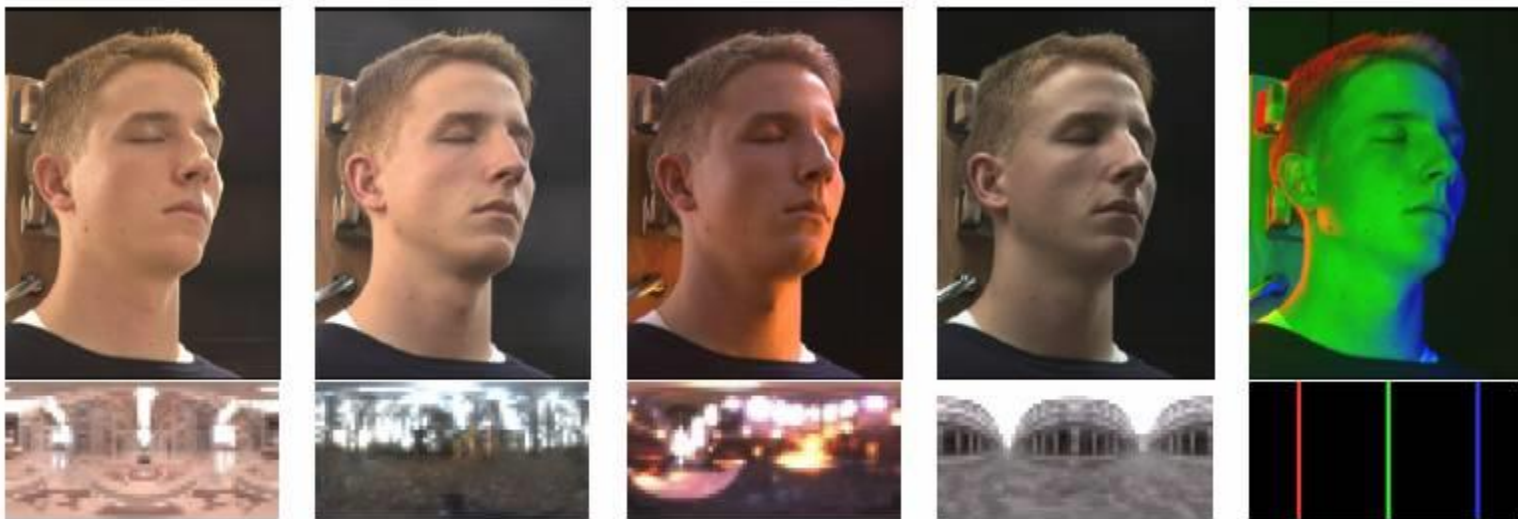
- **Light Stage** Debevec et al. [SIGGRAPH 2000]
 - 从固定的物体（或人）上采集**BRDF**
 - 从少数的几个视角拍摄**2000**多个不同光源方向条件下的图像
 - 从所有图像点上同时获取清楚地 **BRDF**





测量设备：Light Stage

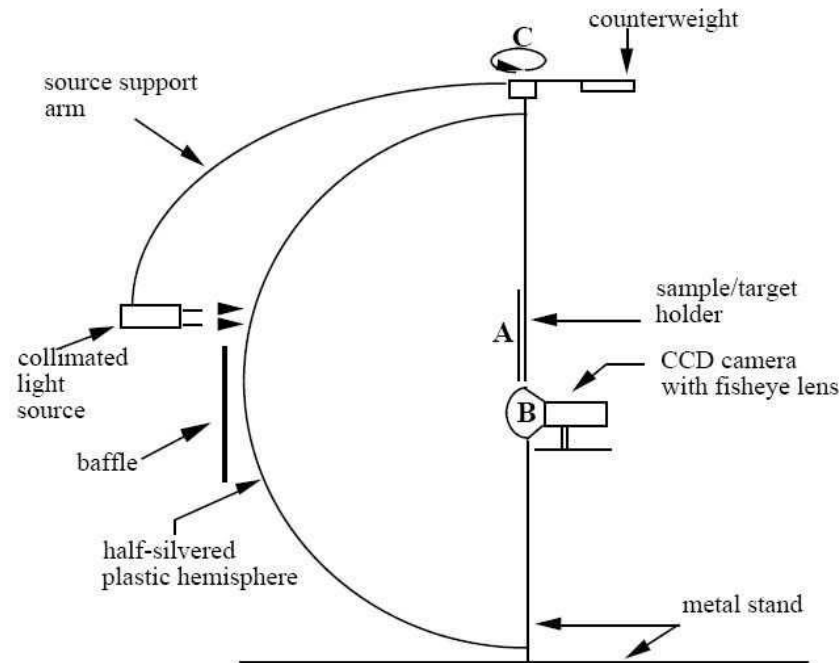
- 对脸部进行重光照





测量设备：Gonioreflectometer

- Gonioreflectometer
 - 由Ward [SIGGRAPH 92]开发

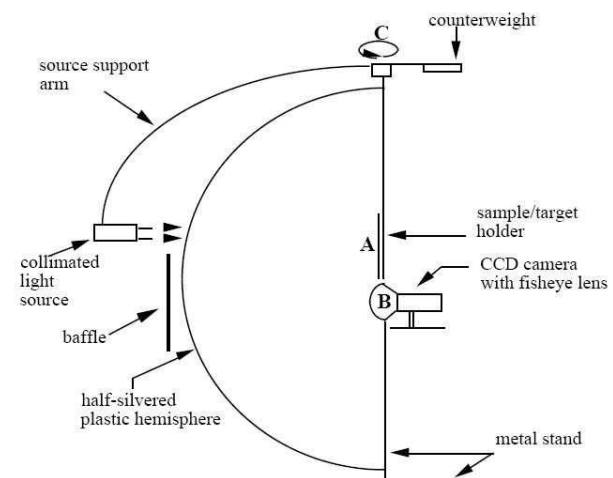




测量设备： Gonioreflectometer

- **Gonioreflectometer**

- 利用一个半镀银的半球从多个方向同时观察材料样本
- 由半球外的一个光源对物体进行照明
- 通过鱼眼镜头一次性同时采集整个半球的信息
- 排除2个维度，仅需要移动光源





BRDF度量 (2018-)

- 如何减少BRDF中测量的工作量?
- 采用机器学习的方法!

Efficient Reflectance Capture Using an Autoencoder

Kaizhang Kang*, Zimin Chen*, Jiaping Wang, Kun Zhou and Hongzhi Wu

ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2018), 37, 4 (Aug. 2018), 127.

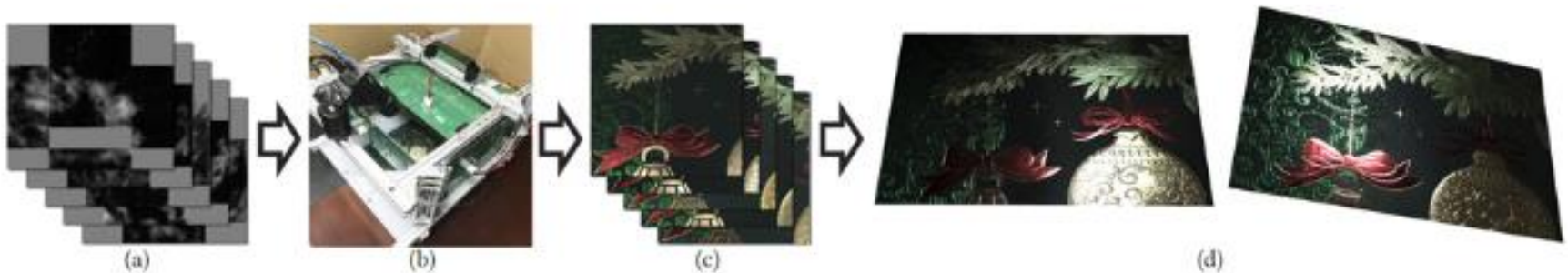


Fig. 1. Using as few as 16 ~ 32 lighting patterns (a) learned from a large amount of reflectance data, we efficiently capture photographs (c) of a planar physical sample in a mini, near-field lightstage (b), and faithfully reconstruct its SVBRDF that can be rendered under novel lighting and view conditions (d).



BRDF度量

- 选定一种BRDF表示模型GGX (Walter et al. 2007)
- 在点 \mathbf{p} 处的BRDF为:

$$f_r(\omega_i; \omega_o, \mathbf{p}) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \frac{D_{\text{GGX}}(\omega_h; \alpha_x, \alpha_y) F(\omega_i, \omega_h) G_{\text{GGX}}(\omega_i, \omega_o; \alpha_x, \alpha_y)}{4(\omega_i \cdot \mathbf{n})(\omega_o \cdot \mathbf{n})}$$

- 采集设备有10240个LED光源，枚举每一个光源得到其照亮 \mathbf{p} 点的亮度，就可以回归出GGX的模型参数
- 能否用更少的测量次数（例如：32次）来估计BRDF参数，同样得到比较准确的值？



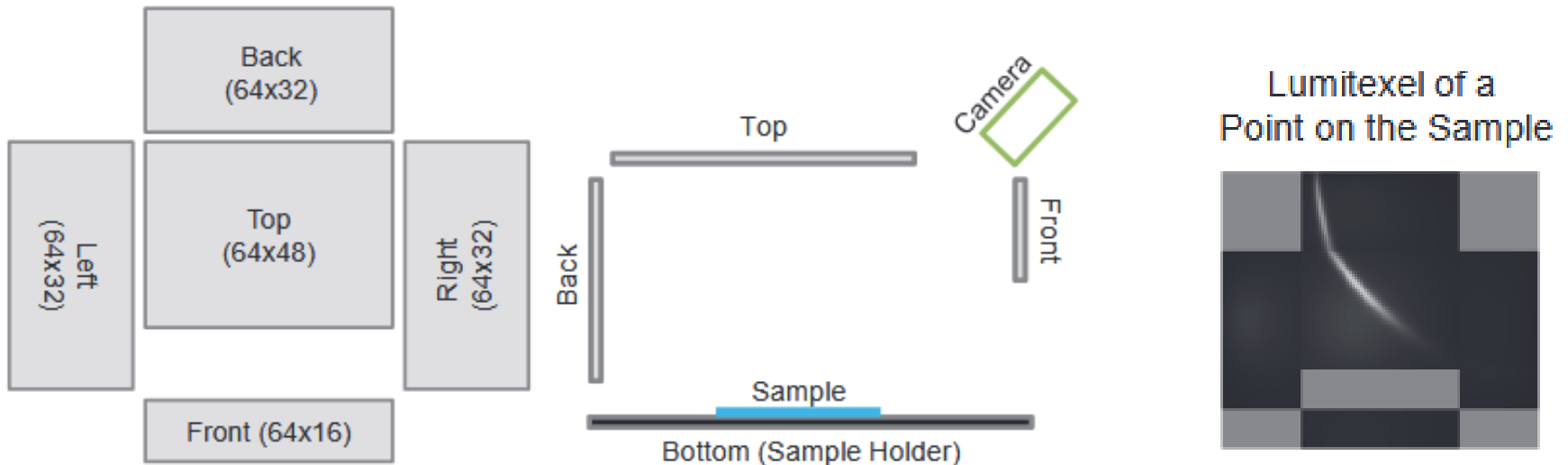
BRDF度量

- 我们希望得到一组光照的模式，每种光照模式下有不同的光源组合，用这些组合去做测量，并还原出10240次单独测量的结果
- 这一过程可以用自编码器（autoencoder）模型表达



BRDF度量

- 一种BRDF属性与一个10240维向量表示一一对应，称为lumitexel。
- 每一维的值表示这一维对应点光源照亮时，摄像头中观测到材质的亮度。

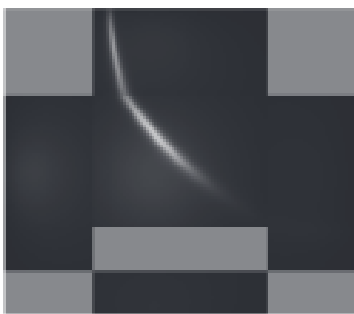




BRDF度量

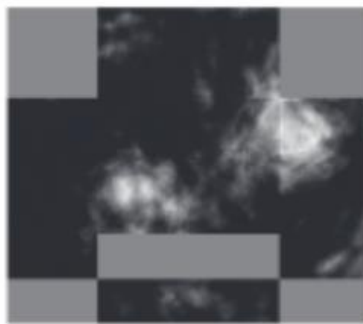
- 对于某一种光照模式下材质的亮度，可以由lumitexel和光照模式（lighting pattern）的点乘得到。

Lumitexel of a
Point on the Sample



*

Lighting Pattern



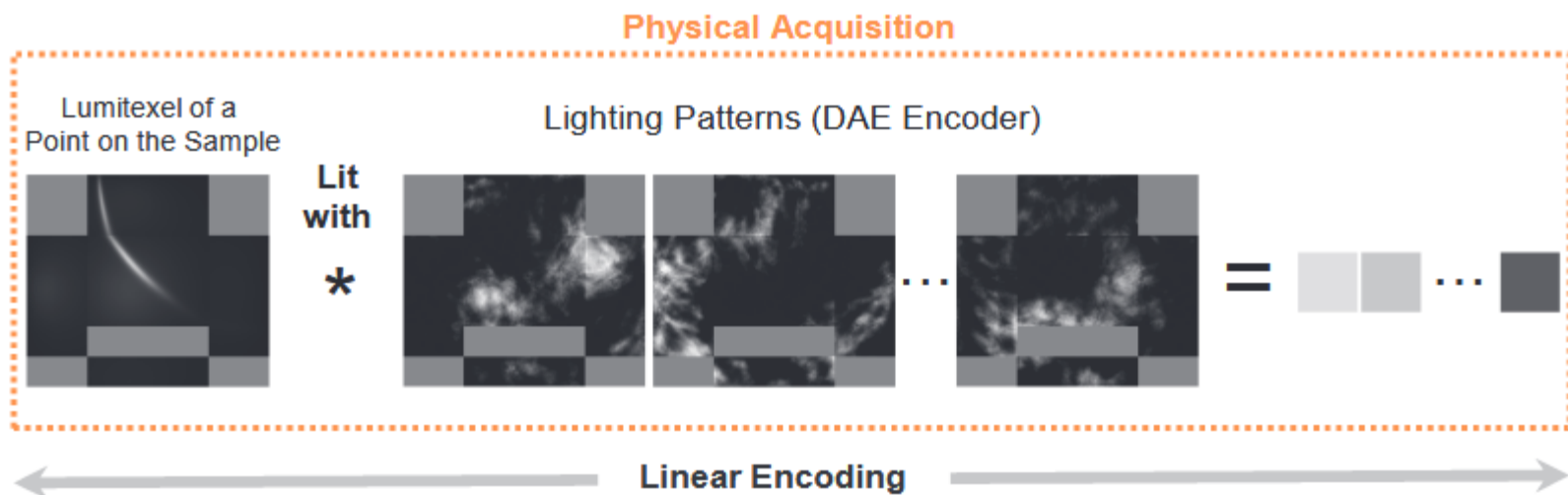
=





BRDF度量

- 基于此，我们可以任意构造BRDF材质，并可以模拟得到该材质在不同光照模式下的亮度，用于训练编码器和解码器。
- 由自编码器生成32种光照模式，可以得到32维光照向量。

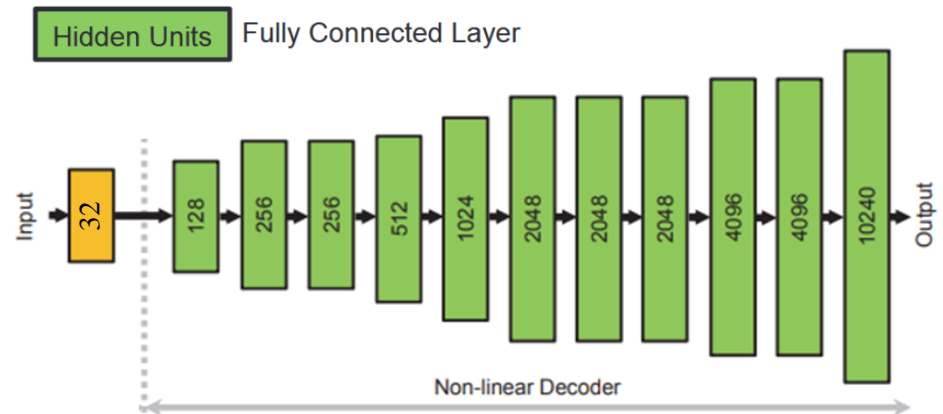
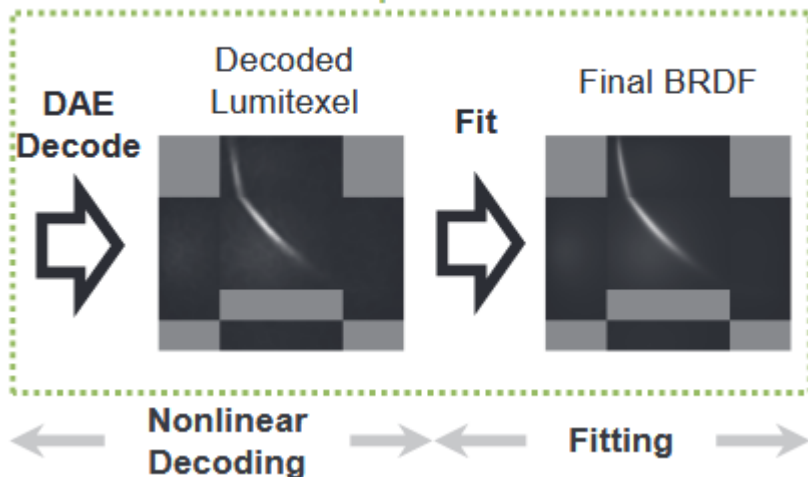




BRDF度量

- 我们希望根据这32维向量恢复10240维的lumitexel，可以用构造的BRDF进行监督。
- 通过训练FC组成的解码器，可以输入32次测量的结果，还原lumitexel。

Computation





BRDF度量

- 使用预测得到的10240次测量值回归BRDF参数
- 根据BRDF参数，可以在新的光照条件下绘制

Efficient Reflectance Capture Using an Autoencoder

Kaizhang Kang¹ Zimin Chen¹ Jiaping Wang² Kun Zhou¹ Hongzhi Wu¹

¹ State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University ² Sinovation Ventures



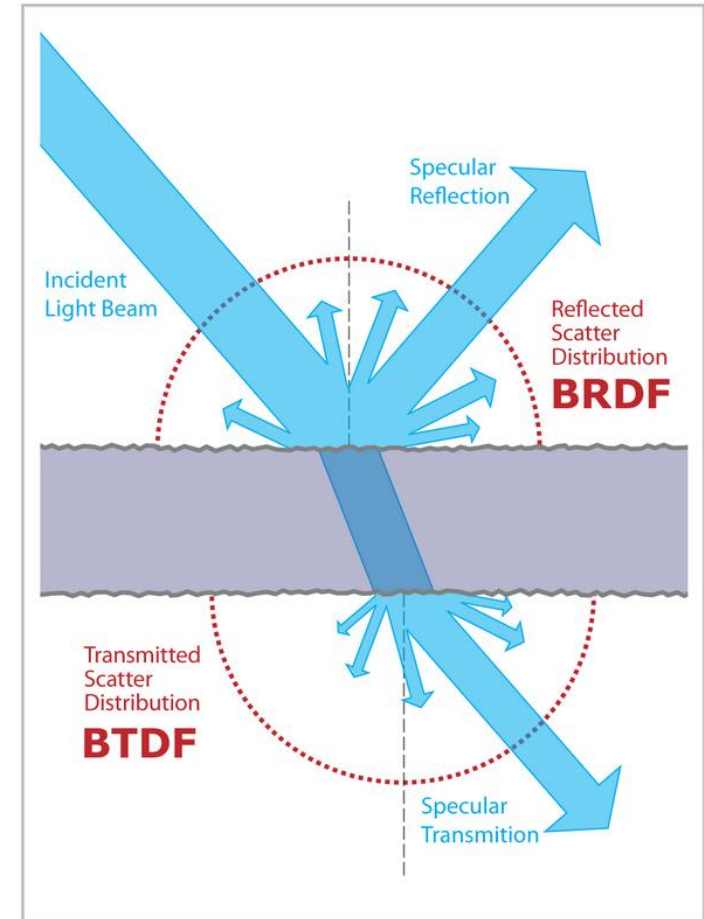
BRDF模型的不足

- 前面介绍的所有BRDF模型都有一个共同的假设基础：
 - 物体是不透明的，光能不会进入物体内部进行传递
- 现实世界中有很多材质不满足这样的特性：
 - 珍珠、翡翠、牛奶、甚至皮肤等
 - 只考虑光能在物体表面的传输无法渲染出逼真的半透明（或全透明）材质
- 事实上，现代图形学绘制技术中，除了材质的BRDF模型，还需要考虑材质的BTDF模型



BTDF

- **BRDF**模型描述了光线在物体表面如何反射
- **BTDF**模型则描述了光线与物体表面接触后，有多少能量进入了物体内部，其全称为：**Bidirectional Transmittance Distribution Function**





BSSRDF

- 为了完整刻画光线在接触到物体表面后的传输分布，我们需要构建物体表面材质的**BRDF**+**BTDF**模型

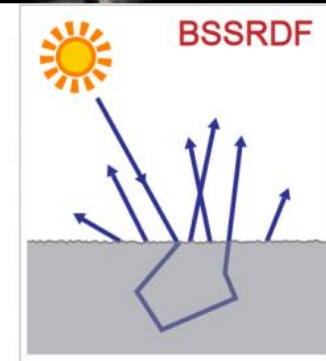
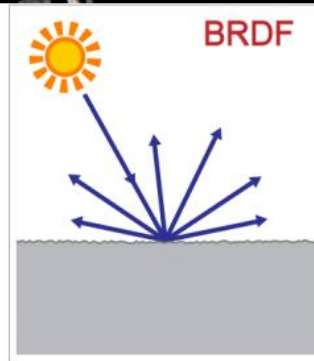
$$\mathbf{BRDF} + \mathbf{BTDF} = \mathbf{BSSRDF}$$

- B**idirectional **S**urface **S**cattering **R**eflectance **D**istribution **F**unction





BRDF vs BSSRDF



BRDF vs BSSRDF

油漆还是牛奶？





BRDF vs BSSRDF

我们的皮肤其实是半透明的！





BSSRDF

- BSSRDF是BRDF的超集，比BRDF更加复杂，完全基于物理的模型计算量太大
- 光线在物体内部的传输（BTDF）很难像BRDF那样通过仪器来测量，因此长期以来，对现实世界材质的BSSRDF采集并没有太大进展
- 现代图形渲染技术主要还是通过简单模型来近似模拟BSSRDF，其中次表面散射是渲染半透明物体最常用的方法
- 次表面散射(Subsurface Scattering)是描述半透明至透明的物体和光相互作用的一种现象



次表面散射



Different levels of subsurface scattering (increasing from left to right) on Venus



次表面散射

- 现实生活中的蜡烛、玉石等等在光照下，光线会进入物体内部并经过多次散射才从物体表面另一点射出
- 理论上对材质的BSSRDF进行积分就可以精确描述这一现象，但是一方面精确的BSSRDF难以获取，另一方面对BSSRDF的积分计算量太大

A Practical Model for Subsurface Light Transport

Henrik Wann Jensen

Stephen R. Marschner

Marc Levoy

Pat Hanrahan

Stanford University

- 感兴趣的同学可以参阅：

<https://graphics.stanford.edu/papers/bssrdf/bssrdf.pdf>



今日人物: Marc Levoy

- Marc Levoy, Stanford 教授、Adobe 副总裁
 - Google scholar H因子76 , 论文200+篇
 - 引用53144次, 1000+: 14, 2000+: 7
 - Architecture from Cornell University, bachelor and Master; PHD(1989), UNC
 - In 1980's, volume rendering
 - In 1990's, 3D laser scanning, Digital Michelangelo Project
 - Google's Street View project
 - **ACM SIGGRAPH Computer Graphics Achievement Award** (1996), **ACM Fellow** (2007).
 - 2014, Google, Google Glass, Google street view





下次课预告

- 光线跟踪





PA0: Raster Graphics

- 内容： 编程实现直线绘制， 圆形绘制以及区域填充算法.
- 形式： 给定一个代码框架， 完成核心部分的算法实现.
- 习题课：
 1. 讲解光栅图形学及PA0的实现细节
 2. 时间地点： 周六？ 周日？



谢谢!