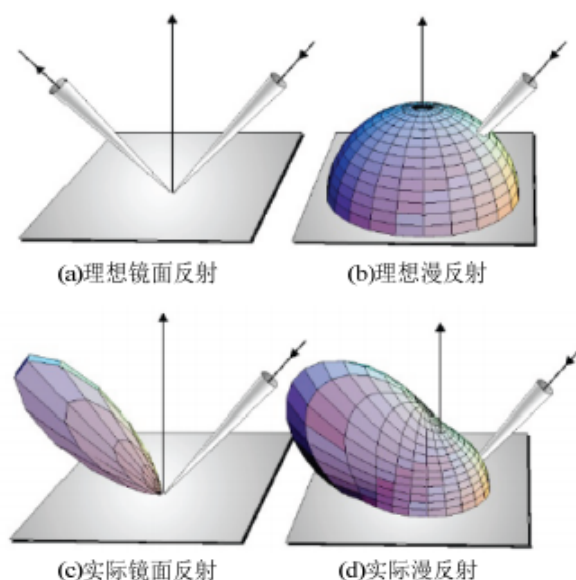


在过去的一段时间中，光照模型得到了深入的发展，人们不再满足于只是对漫反射现象和镜面反射现象进行模拟，而是希望可以模拟更多特殊材质上的光照效果，如同向异性、各项异性等。上一章已经提到过，无论是漫反射，还是镜面反射，都属于材质和光交互的理想状态，就好像物理学中的无阻力状态和恒温状态，真实的情况是：漫反射和镜面反射都需要依据材质特征和物体表面微平面特征。下图是实际漫反射、镜面反射与理想漫反射、镜面反射的示意图：



理想发射和实际反射之对比

材质和光的交互方式是多种多样的，例如，我们可以在光盘上看到如扇面般的光带分布，在光滑的圆柱形炊具上可以看到光的条纹。为了衡量材质的光学特征和物体表面微平面特征，BRDF（Bidirectional Reflectance Distribution Function）模型应运而生。

10.1 Cook-Torrance 光照模型

使用 phong 和 blinn-phong 光照模型渲染出来的效果都存在一个问题：效果过于艺术化，不太真实。这是因为这两种模型都对材质细节方面没有进行考虑。1981 年，Robert L. Cook 和 Kenneth E. Torrance 发表了名为“A Reflectance Model For Computer Graphics”的论文，首次提出了 Cook-Torrance 光照模型。

Cook-Torrance 光照模型将物体粗糙表面（**rough surface**）看作由很多微小平面（微平面）组成，每一个微平面都被看作一个理想的镜面反射体，物体表面的粗糙度由微平面斜率的变化来衡量。一个粗糙表面由一系列斜率变化很大的微平面组成，而在相对平滑的表面上微平面斜率变化较小。

Cook-Torrance 模型将光分为两个方面考虑：漫反射光强和镜面反射光强。如下公式所示：

$$I_{c-t} = I_{diff} + I_{spec} = I_{diff} + k_s I_l R_s$$

- I_{diff} 是漫反射光强，该部分的计算方法和前面所讲的相同；

- Ks/R_s 是镜面反射光强的计算方法；

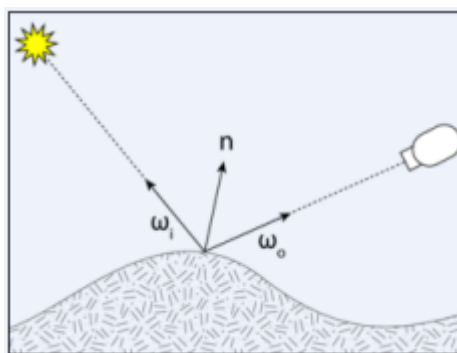
从公式可以看出：cook-Torrance 模型与 phong、blinn-phong 模型的不同之处在于 R_s 的计算方法。实际上，cook-Torrance、phong 和 blinn-phong 三种光照模型的本质区别都在于“使用不同数学表达式计算 R_s ”。 R_s 在英文中称之为“specular term”。

10.2 BRDF 光照模型

10.2.1 什么是 BRDF 光照模型

1965 年，Nicodemus, Fred 在论文“Directional reflectance and emissivity of an opaque surface”中提出了 BRDF 的概念。BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function, 中文翻译为“双向反射分布函数”。该函数描述了入射光线在非透明物体表面如何进行反射。

BRDF 的结果是一个没有单位的数值，表示在给定入射条件下，某个出射方向上反射光的相对能量，也可以理解为“入射光以特定方向离开的概率”（实时计算机图形学第二版 111 页）。如图 23 所示， w_i 表示光线入射方向， w_o 表示光线出射方向（入射点到视点），则该情况下的 BRDF 值表示：光线以 w_i 方向入射，然后以 w_o 方向出射的概率，或者光强。这些信息也可以用仪器进行测试记录，并存放在图片上，称为 polynomial texture map。



光的反射

依据光学原理，BRDF 的计算公式为：

$$f_r(w_i, w_o) = \frac{dL_r(w_o)}{dE_i(w_i)} = \frac{dL_r(w_o)}{L_i(w_i) \cos \theta_i dw_i}$$

$L_r(w_o)$

- 表示从 w_o 方向反射的光线的辐射亮度（Radiance）；

$E_i(w_i)$

- 表示从 w_i 方向入射的光线在辐射照度（Irradiance）；

辐射亮度和辐射照度是表示光照性质的光学量，辐射亮度是每单位立体角在垂直于给定方向的平面上的单位正投影面积上的功率。辐射照度则是整个入射表面的功率，等于投射在包括该点的一个面元上的辐射通量 $d\phi$ 除以该面元的面积 dA 。故而，从物理光学上我们可以将公式理解为：BRDF 函数计算的是“特定反射方向的光强与入射光强的比例”。

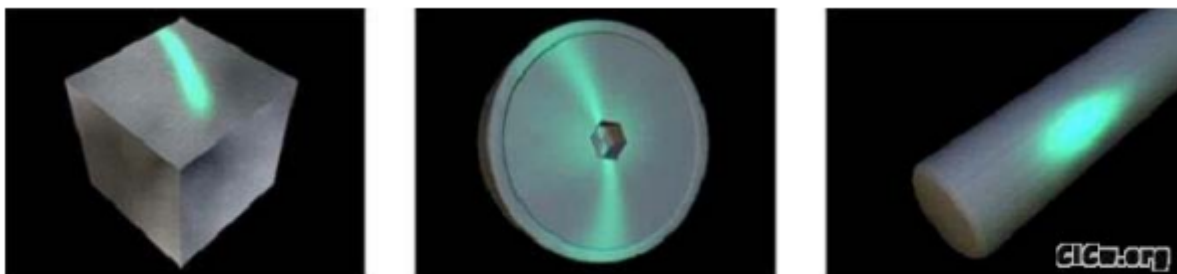
10.2.2 什么是各向异性

各向异性(anisotropy)与均向性相反，是指在不同方向具有不同行为的性质，也就是其行为与方向有关。如在物理学上，沿着材料做不同方向的量测，若会出现不同行为，通常称该材料具有某种“各向异性”，这样的材料表面称为各向异性表面（anisotropic surface）；特殊的晶体结构会导致各向异性，材质表面上存在有组织的细小凹凸槽也会导致各向异性。各向异性反射是指：各向异性表面反射光的一种现象。在生活中我们经常见到各向异性光照效果，例如光滑的炊具上的扇面光斑（如图所示）。

炊具呈现的各向异性光照效果

由于材质有组织的细微凹凸结构的不同，各向异性也分为基本的三种类型（如图所示）：

1. 线性各向异性；
2. 径向各向异性；
3. 圆柱形各向异性，实际上线性各向异性，单被映像为圆柱形。



三种典型的各向异性光照效果

10.3 Bank BRDF 经验模型

Bank BRDF 属于经验模型，由于其计算简单，且效果良好，所以该模型在各向异性光照效果的模拟方面非常有用。Bank BRDF 的镜面反射部分可以表达为如下公式的形式：

$$f = k_s (\sqrt{1 - (L \cdot T)^2} \sqrt{1 - (V \cdot T)^2} - (L \cdot T)(V \cdot T))^{n_s}$$

- k_s 表示镜面反射系数；
- n_s 表示镜面高光系数；

- L 表示入射光线方向；
- V 表示实现观察方向；
- T 表示该点的切向量。尤其要注意切向量的计算方法，因为一个三维空间点可能存在无数个切向量，通常采用“顶点的法向量和视线方向做叉积”，其结果作为 T 。

10.4 本章小结

BRDF 模型有很多分支模型，如 HTSG BRDF 模型擅长模拟很多物理现象，是现今最完整的 BRDF 模型，但是同时需要昂贵的计算开销；Ward BRDF 用于各向异性表面的经验模型有些复杂，并且需要从实际物体表面来获取 BRDF 数据。这些数据可以通过测角仪、图像双向反射计来得到，国外网站也有一些公开的数据库。