

## 9.1 光源

- 环境光(Ambient Light):从物体表面所产生的反射光的统一照明，称为环境光或背景光。例如房间里并没有受到灯光或者太阳光的直接照射，而是由墙壁、天花板、地板及室内各物体之间光的多次反射进行自然照明。
- 通常我们认为理想的环境光具有如下特性：没有空间或方向性；
- 在所有方向上和所有物体表面上投射的环境光强度是统一的恒定值。

点光源是发光体的最简单的模型，光线由光源出发向四周发散。

还有一种是平行光，即光线都从同一个方向照射。通过模拟方向光和物体表面的交互模式，可以渲染出具有高

真实感（明暗变化、镜面反射等）的三维场景。

## 9.2 漫反射与 Lambert 模型

粗糙的物体表面向各个方向等强度地反射光，这种等同地向各个方向散射的现象称为光的漫反射（diffuse reflection）。

产生光的漫反射现象的物体表面称为理想漫反射体，也称为朗伯（Lambert）反射体。

对于仅暴露在环境光下的朗伯反射体，可以用如下公式表示某点处漫反射的光强：

$$I_{ambdiff} = k_d I_a$$

- $I_a$  表示环境光强度（简称光强），
- $k_d$  ( $0 < k_d < 1$ ) 为材质对环境光的反射系数，
- $I_{ambdiff}$  是漫反射体与环境光交互反射的光强。

即使一个理想的漫反射体在所有方向上具有等量的反射光线，但是表面光强还依赖于光线的入射方向（方向光）。例如，入射光方向垂直的表面与入射光方向成斜角的表面相比，其光强要大的多。这种现象可以用 Lambert 定律进行数学上的量化。

当方向光照射到朗伯反射体上时，漫反射光的光强与入射光的方向和入射点表面法向夹角的余弦成正比，这称之为 Lambert 定律，并由此构造出 Lambert 漫反射模型：

$$I_{ldiff} = k_d I_l \cos \theta$$

- $I_l$  是点光源强度，
- $\theta$  是入射光方向与顶点法线的夹角，称为入射角 ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ )，
- $I_{ldiff}$  是漫反射体与方向光交互反射的光强。

入射角为零时，说明光线垂直于物体表面，漫反射光强最大； $90^\circ$  时光线与物体表面平行，物体接收不到任何光线。

$$I_{ldiff} = k_d I_l (N \bullet L)$$

综合考虑环境光和方向来，Lambert 光照模型可写为：

$$I_{diff} = I_{ambdiff} + I_{ldiff} = k_d I_a + k_d I_l (N \bullet L)$$



漫反射光照模型渲染效果

## 9.3 镜面反射与 Phong 模型

Lambert 模型较好地表现了粗糙表面上的光照现象，如石灰粉刷的墙壁、纸张等，但在用于诸如金属材料制成的物体时，则会显得呆板，表现不出光泽，主要原因是该模型没有考虑这些表面的镜面反射效果。一个光滑物体被光照射时，可以在某个方向上看到很强的反射光，这是因为在接近镜面反射角的一个区域内，反射了入射光的全部或绝大部分光强，该现象称为镜面反射。

Phong Bui Tuong 提出一个计算镜面反射光强的经验模型，称为 phong

模型，认为镜面反射的光强与反射光线和视线的夹角相关，其数学表达如下公式所示：

$$I_{spec} = k_s I_l (V \bullet R)^{n_s}$$

- $k_s$  为材质的镜面反射系数，
- $n_s$  是高光指数，
- $V$  表示从顶点到视点的观察方向，
- $R$  代表反射光方向。

高光指数反映了物体表面的光泽程度。 $n_s$  越大，反射光越集中，当偏离反射方向时，光线衰减的越厉害，只有当视线方向与反射光线方向非常接近时才能看到镜面反射的高光现象，此时，镜面反射光将会在反射方向附近形成亮且小的光斑； $n_s$  越小，表示物体越粗糙，反射光分散，观察到的光斑区域小，强度弱。

反射光的方向  $R$  可以通过入射光方向  $L$ （从顶点指向光源）和物体法向量  $N$  求出：

$$R + L = (2N \cdot L)N$$

$$||$$

$$R = (2N \cdot L)N - L$$

### 9.3.1 phong 模型渲染



phong 光照模型的顶点着色程序渲染效果

从上图中可以看出，与漫反射模型的渲染效果相比，phong 光照模型的渲染效果要圆润很多，明暗界限分明，光斑效果突出。不过图中马的渲染效果，可以很清楚的发现，马的渲染效果没有其他三个模型好，原因在于马模型的面片少，是低精度模型，而顶点着色渲染只对几何顶点进行光照处理，并不会对内部点进行处理。

为了使得低精度模型也能得到高质量的渲染效果，就必须进行片段渲染。



phong 光照模型的片段着色程序渲染效果

## 9.4 Blinn-Phong 光照模型

Blinn-Phong 光照模型，又称为 Blinn-phong 反射模型（Blinn-Phong reflection model）或者 phong 修正模型（modified Phong reflection model），是由 Jim Blinn 于 1977 年在文章“Models of light reflection for computer synthesized pictures”中对传统 phong 光照模型基础上进行修改提出的。和传统 phong 光照模型相比，Blinn-phong 光照模型混合了 Lambert 的漫射部分和标准的高光，渲染效果有时比 Phong 高光更柔和、更平滑，此外它在速度上相当快，因此成为许多 CG 软件中的默认光照渲染方法。此外它也集成在了大多数图形芯片中，用以产生实时快速的渲染。在 OpenGL 和 Direct3D 渲染管线中，Blinn-Phong 就是默认的渲染模型。

phong 光照模型中，必须计算  $V \cdot R$  的值，其中  $R$  为反射光线方向单位向量， $V$  为视线方向单位向量，但是在 Blinn-phong 光照模型中，用  $N \cdot H$  的值取代了  $V \cdot R$ 。Blinn-phong 光照模型公式为：

$$I_{spec} = k_s I_l (N \bullet H)^{n_s}$$

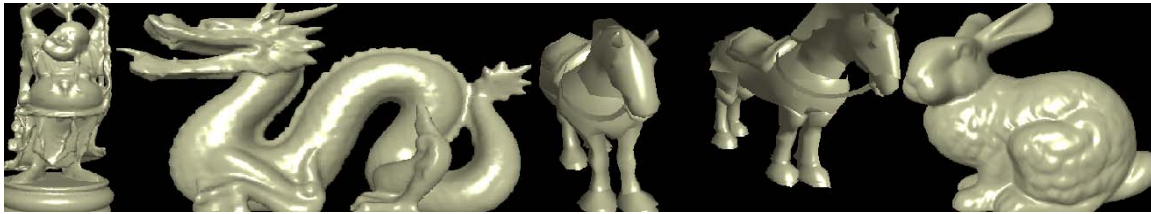
- $N$  是入射点的单位法向量，
- $H$  是“光入射方向  $L$  和视点方向  $V$  的中间向量”，通常也称之为半角向量。

注意：半角向量被广泛用于各类光照模型，原因不但在于半角向量蕴含的信息价值，也在于计算半角向量是一件简单、耗时不多的工作。

$$H = \frac{L+V}{|L+V|}$$

通常情况下，使用 Blinn-phong 光照模型渲染的效果和 phong 模型渲染的效果没有太大的区别，有些艺术工作者认为 phong 光照模型比 blinn-phong 更加真实，实际上也是如此。Blinn-phong 渲染效果要更加柔和一些，Blinn-phong 光照模型省去了计算反射光线方向向量的两个乘法运算，速度更快。

**Blinn-phong**和 **phong** 模型的唯一区别一个使用半角向量，一个使用反射光方向向量。



Blinn-phong 光照模型渲染效果

## 9.5 全局光照模型与 Rendering Equation

Kajia 在 1986 年提出 rendering equation:

向外辐射传输的光能 = 因自发光而向外辐射传输的光能 + 接收后向外反射的光能

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega^+} L_i(x, \omega_i) f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cos\langle \omega_i, n \rangle d\omega_i$$

