



上节要点

■ 面消隐算法

- 画家算法：深度优先级列表
- **Z-Buffer**算法：帧缓存+深度缓存
- 扫描线**Z-Buffer**算法：相关性、边对
- 区间扫描线算法：交点排序、扫描线区间
- 区域子分割算法：四等分、简单覆盖关系
- 光线投射算法：物体空间消隐

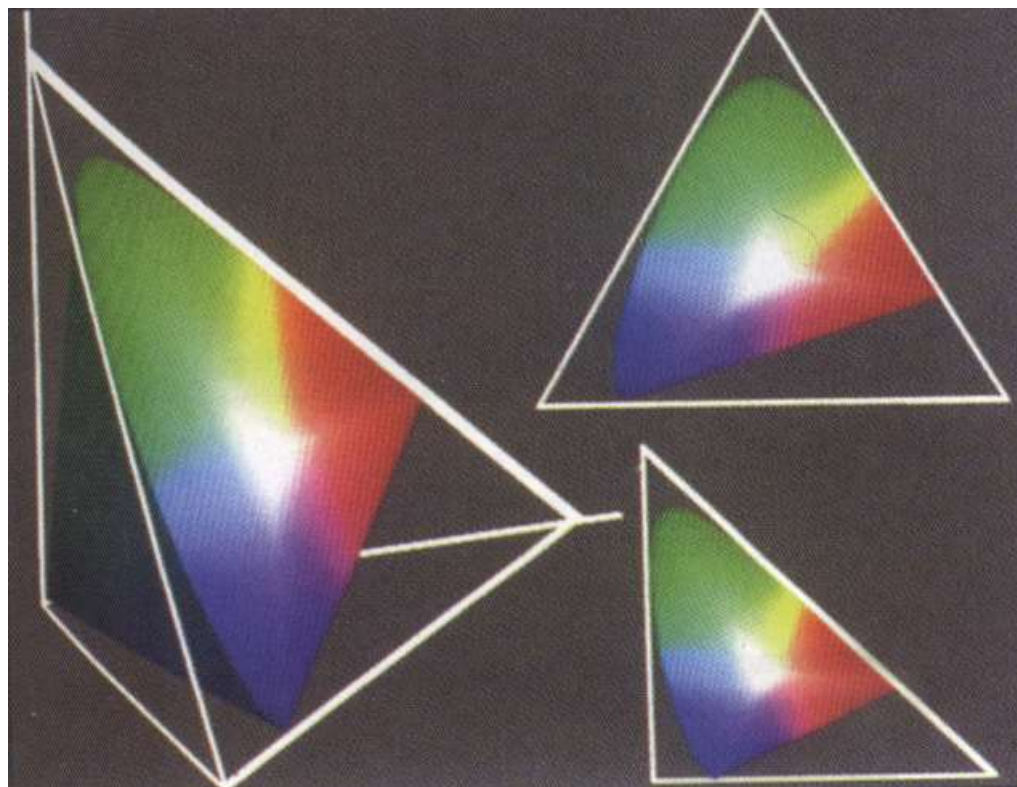
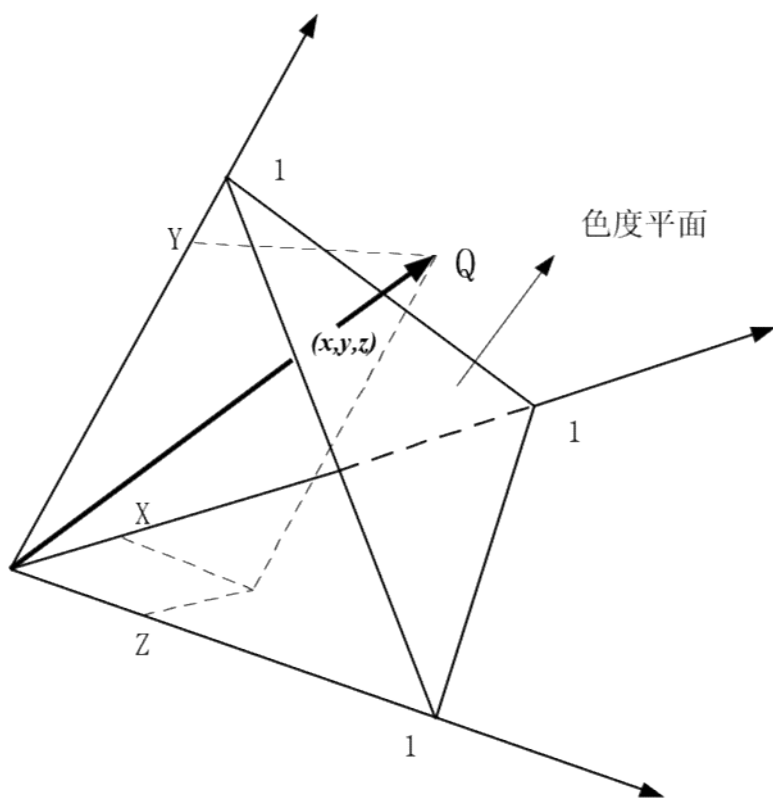


■ 颜色视觉

- 颜色：外来的光刺激作用于人的视觉器官而产生的主观感觉。
- 颜色的特性：
 - 心理学角度：色调、饱和度、亮度
 - 光学物理学角度：主波长、纯度、明度
- 三色学说(三刺激理论)
- CIE-XYZ系统
- 三刺激空间、色度图、CIE色度图



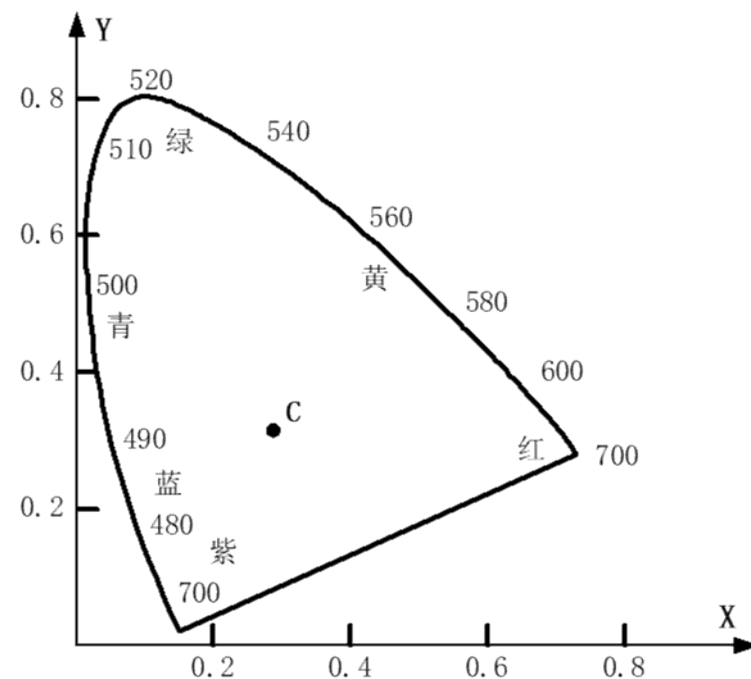
色度图





CIE色度图

- **CIE色度图**—色度图投影到**XY**平面上
- 马蹄形区域的边界和内部代表了所有可见光的色度值
- 边界弯曲部分代表了光谱的某种纯度为百分之百的颜色光





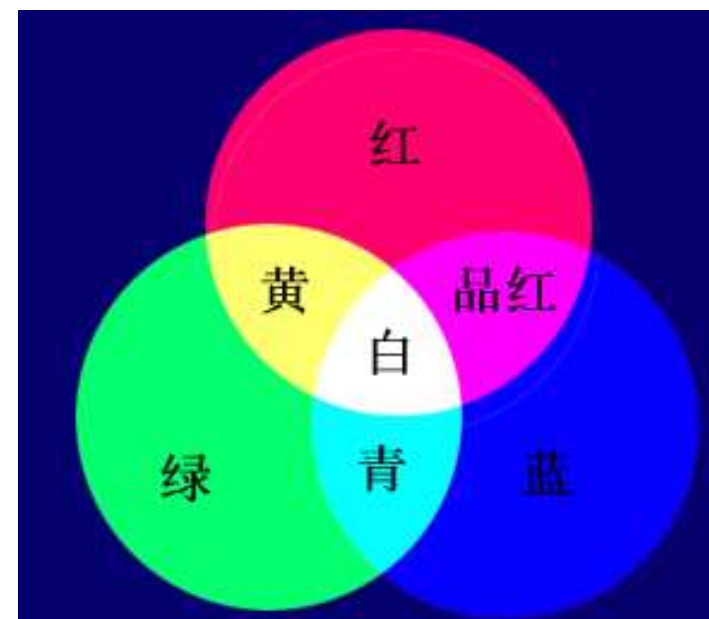
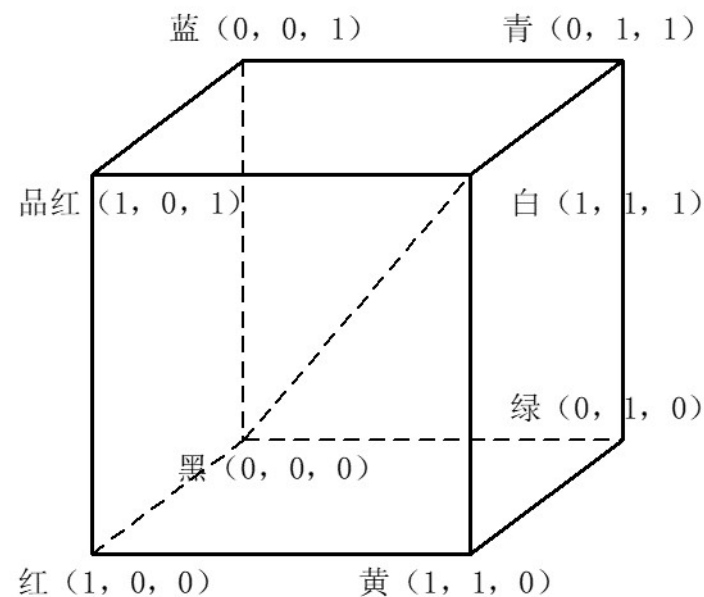
常用颜色模型

- **颜色模型**是指某个三维颜色空间中的一个可见光子集，包含某个颜色域的所有颜色
- 颜色模型的用途是在某个颜色域内方便地指定颜色
- **RGB**颜色模型
- **CMY**颜色模型
- **HSV**颜色模型



RGB颜色模型

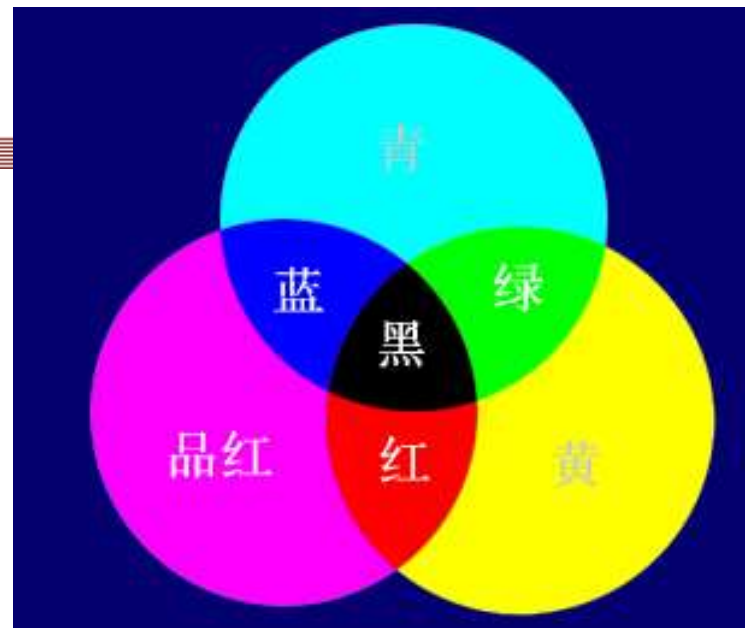
- 通常用于彩色光栅图形显示设备中
- 真实感图形学中的主要的颜色模型
- 采用三维直角坐标系
- **RGB**立方体
- 三原色混合可产生复合色





CMY颜色模型

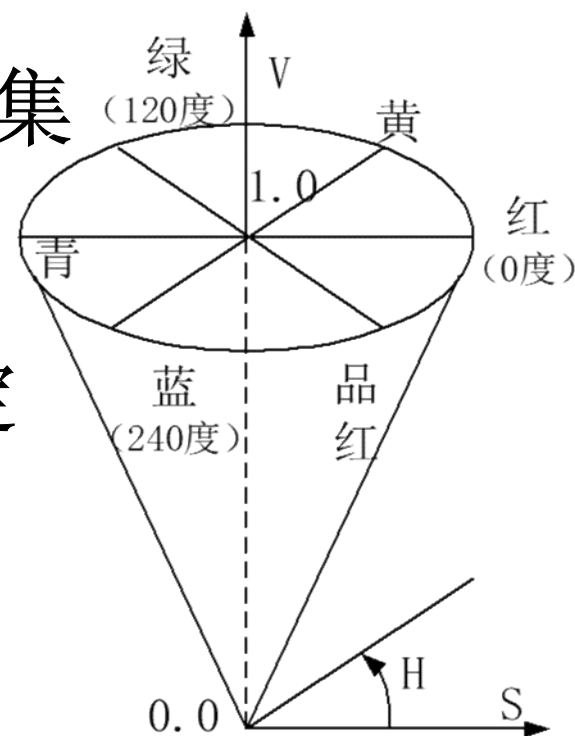
- 以红、绿、蓝的补色Cyan(青)、Magenta(品红)、Yellow(黄)为原色构成的颜色模型
- 常用于从白光中滤去某种颜色，又称为减性原色系统，用在白色中减去某种颜色来定义一种颜色；
- 用于印刷行业硬拷贝设备的颜色处理。





HSV颜色模型

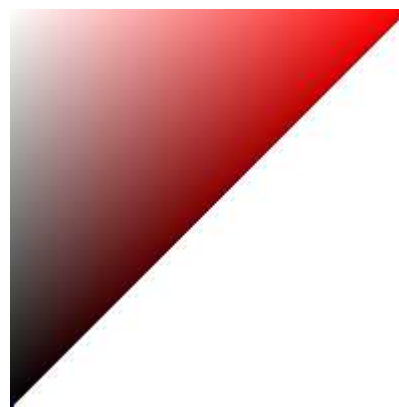
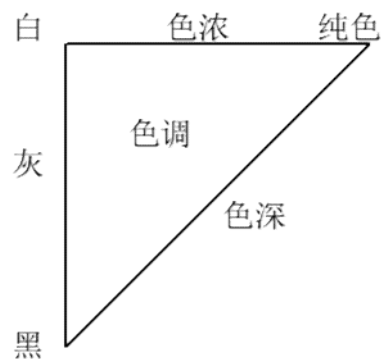
- **HSV**(Hue, Saturation, Value)颜色模型是面向用户的
- 对应圆柱坐标系的圆锥形子集
- 圆锥的顶面对应于 **$V=1$**
- 色调 **H** 由绕 **V** 轴的旋转角给定
- 饱和度 **S** 取值从 **0** 到 **1** ，由圆心向圆周过渡





画家配色方法

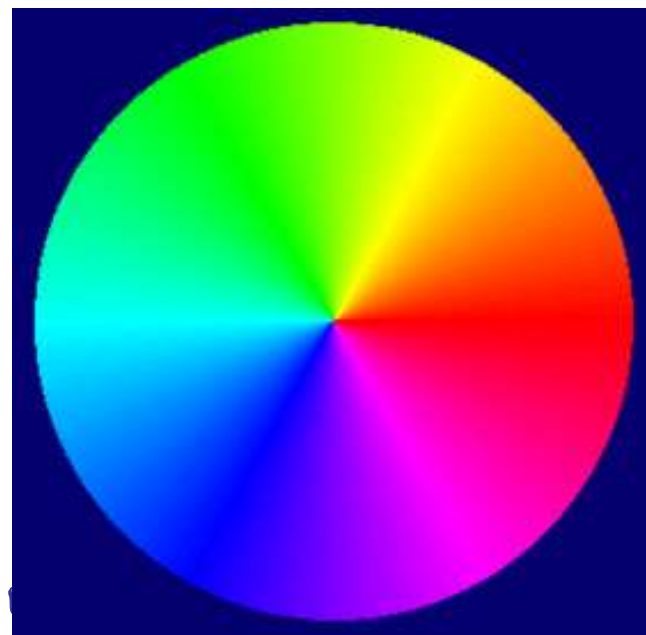
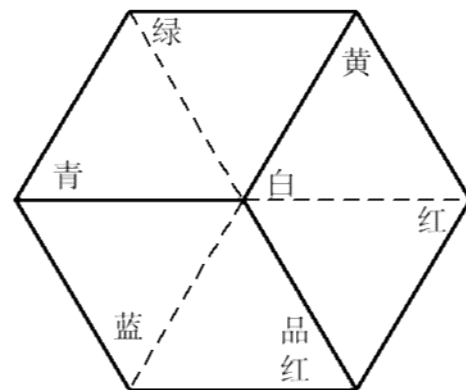
- **HSV**模型对应画家的配色的方法
- 在一种纯色中加入白色以改变色浓，加入黑色以改变色深。同时加入不同比例的白色、黑色，即得到不同色调的颜色





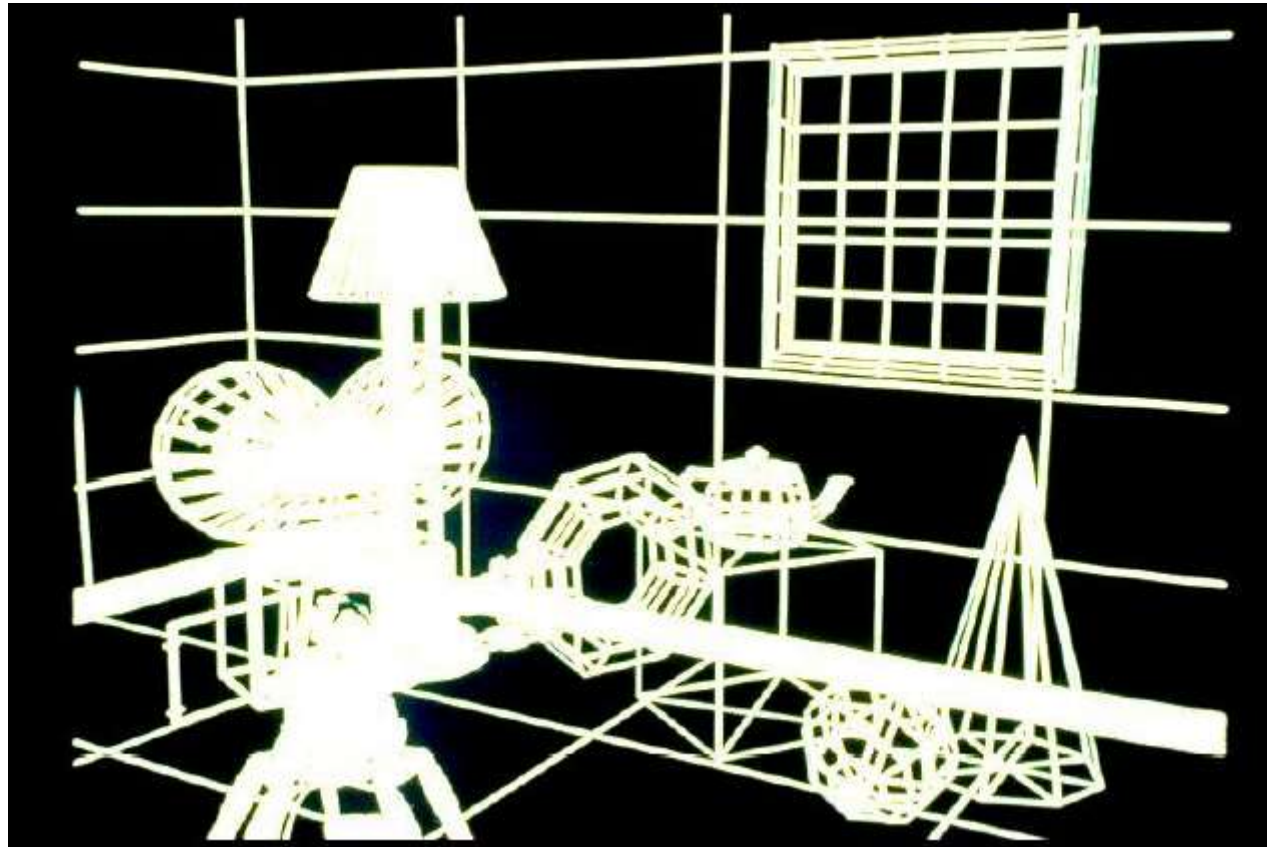
RGB模型与HSV模型

- **RGB**立方体从白色顶点沿着主对角线向原点方向投影，可以得到一个正六边形，该六边形是**HSV**圆锥顶面的一个真子集
- **RGB**空间的主对角线，对应于**HSV**空间的**V**轴



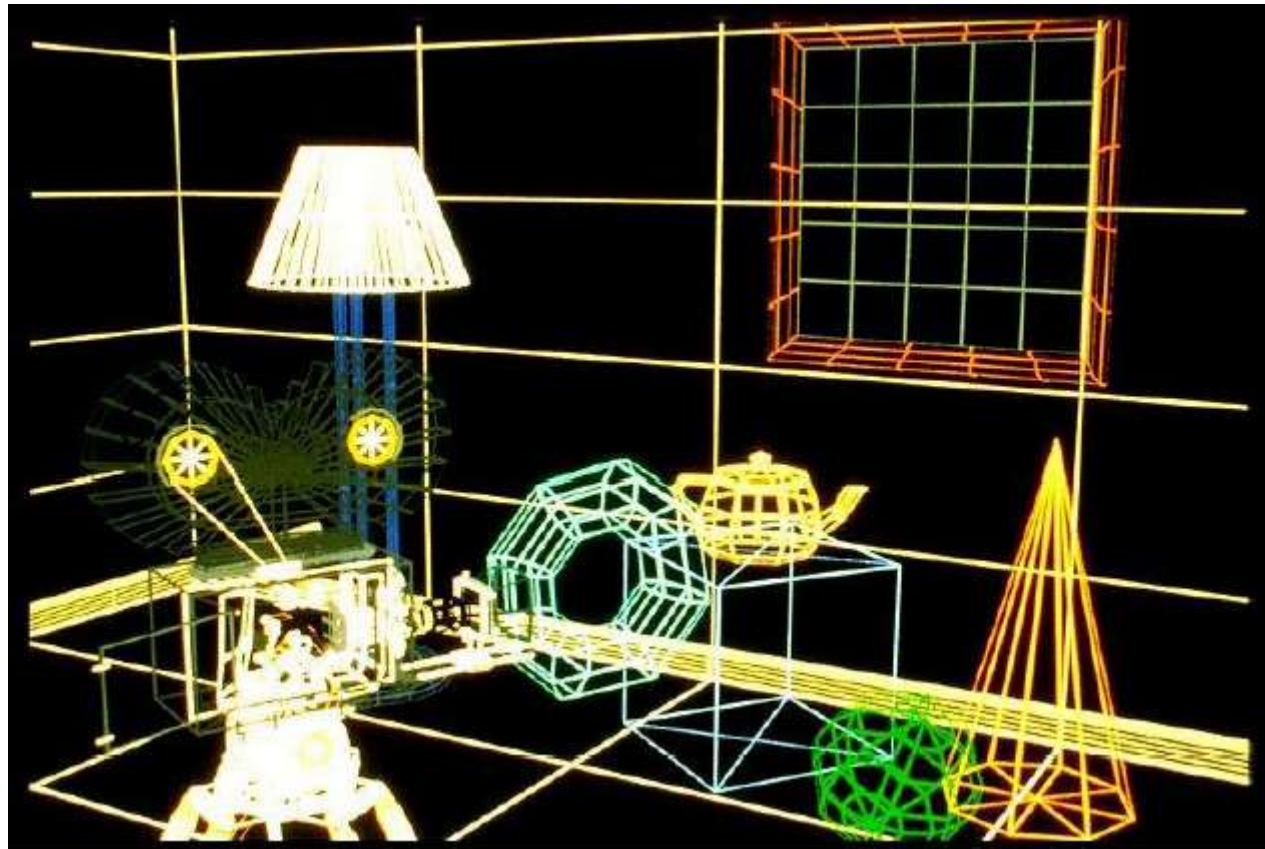


Perspective Wireframe





Wireframe Aided by Color



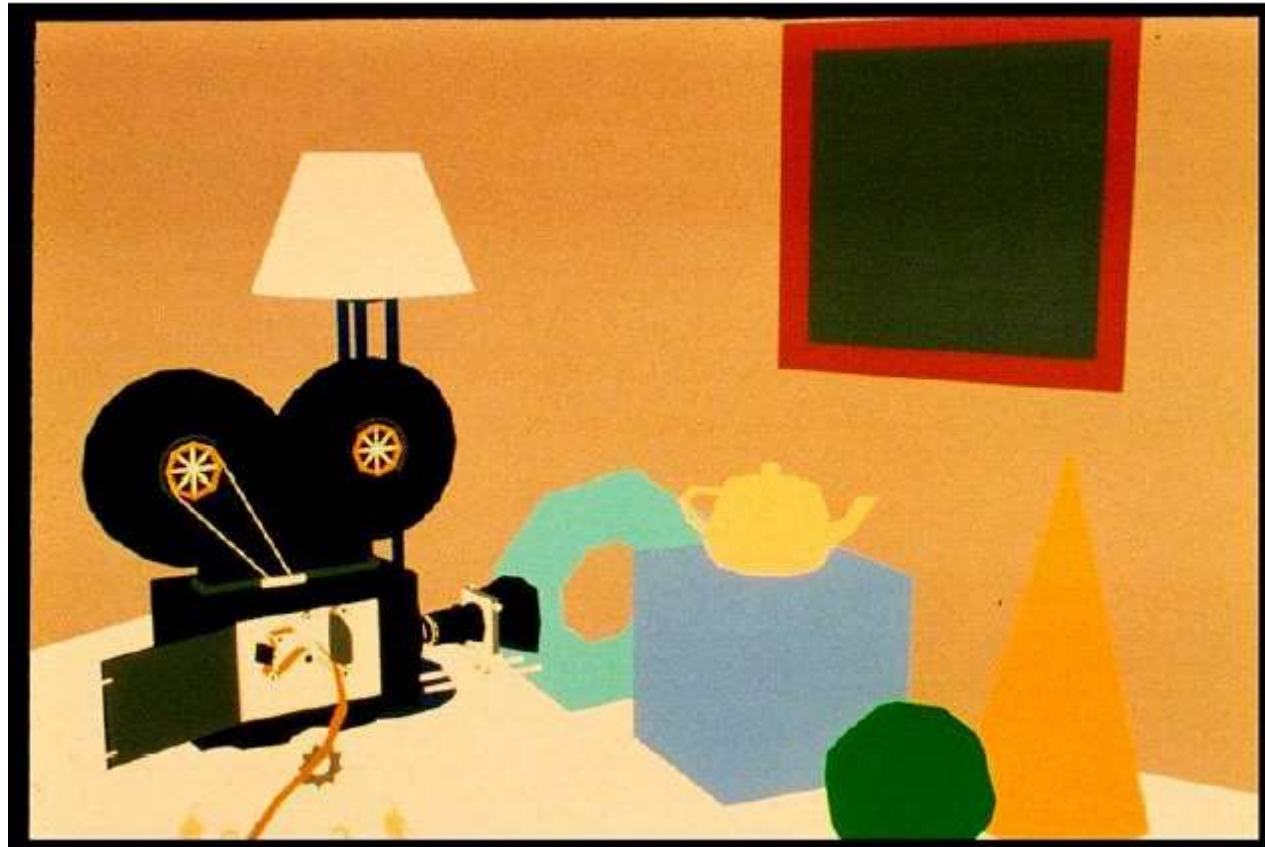


Visible Line Detection



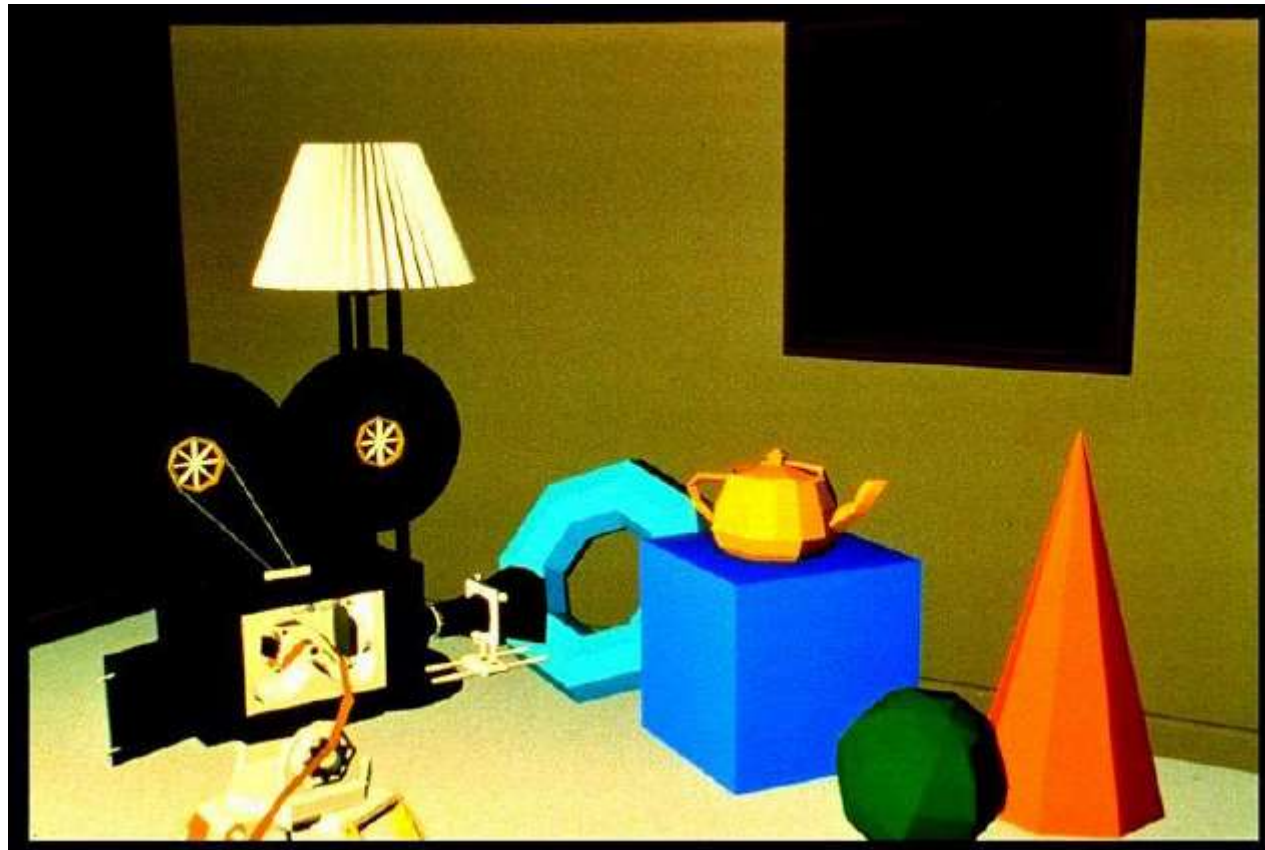


Visible Surface Detection





Flat Shaded Polygons



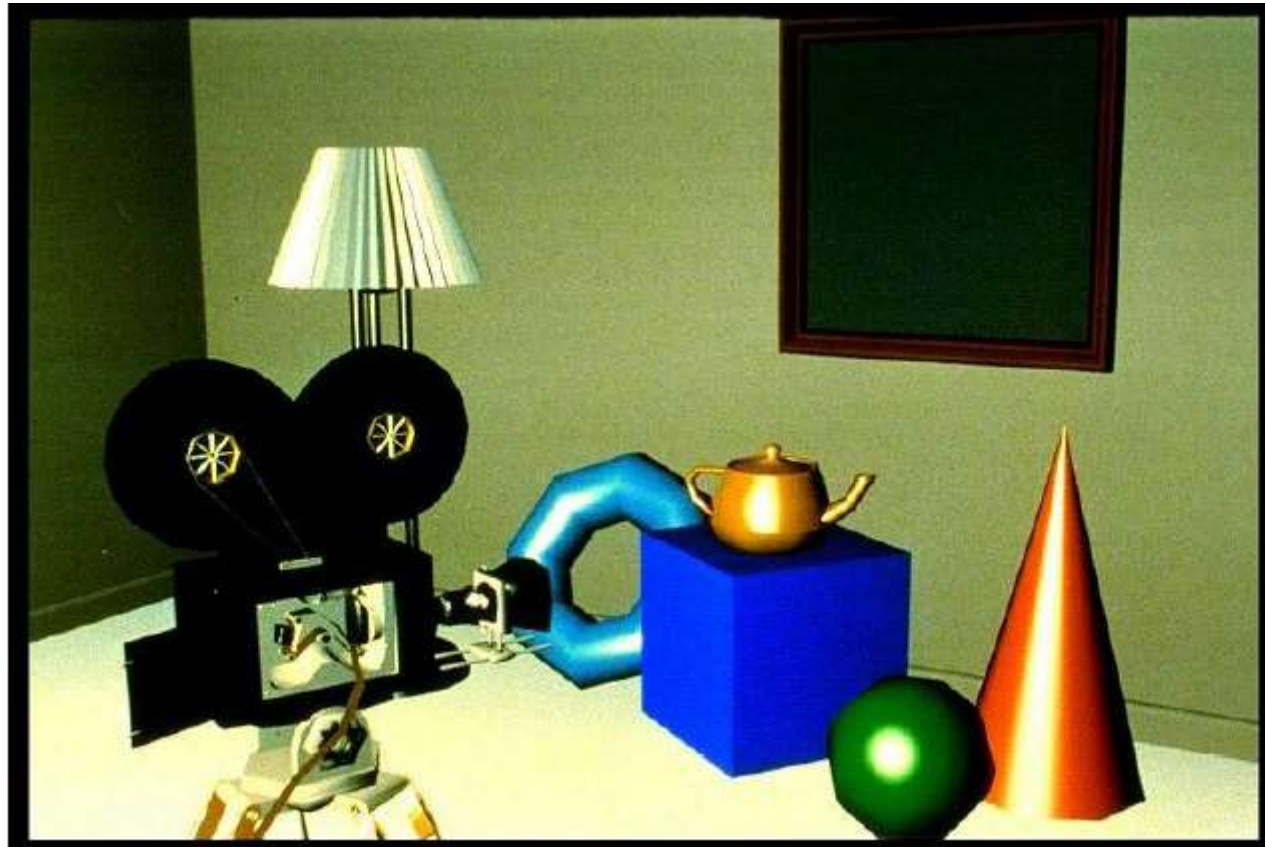


Gourand Shaded Polygons



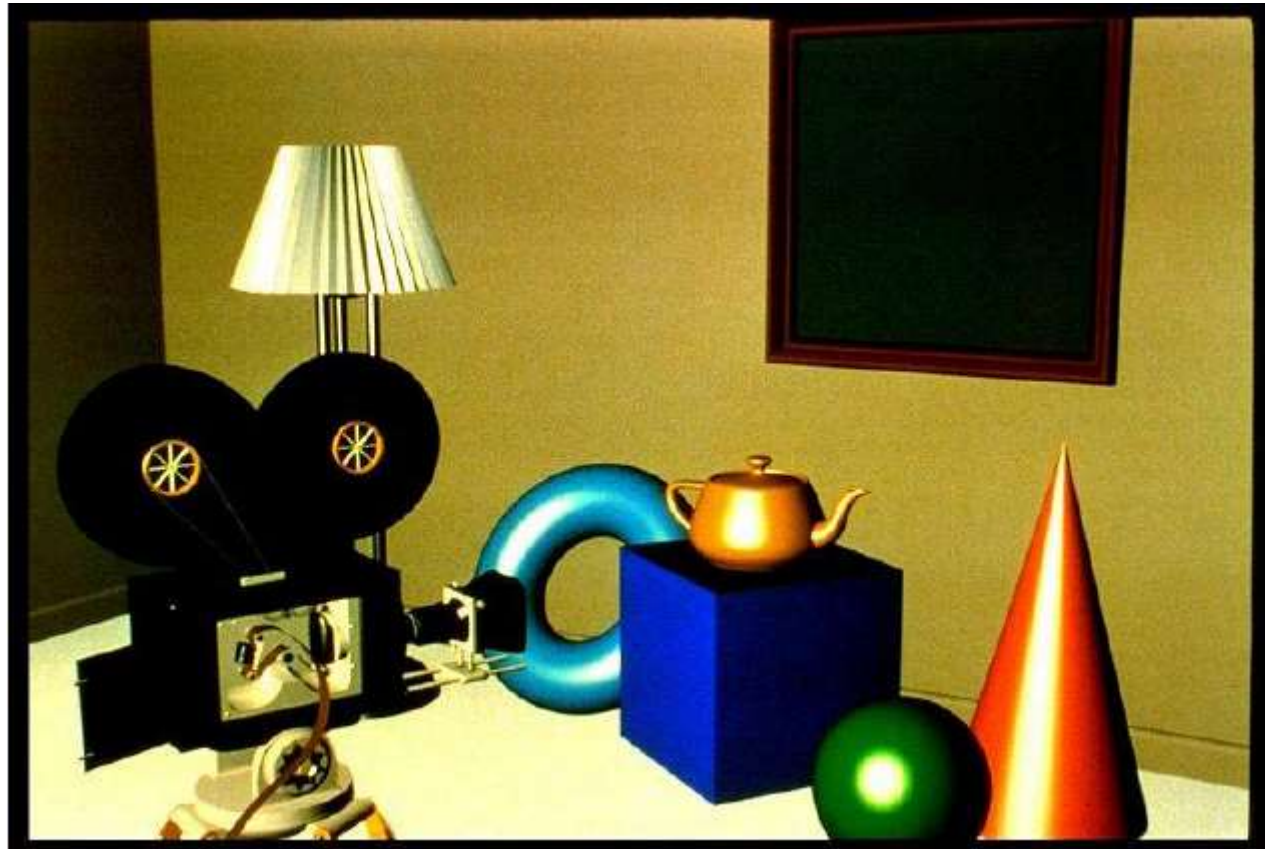


Phong Shaded Polygon





Parametric Curved Surfaces





Improved Illumination Model





Texture Mapping





Displacement Mapping





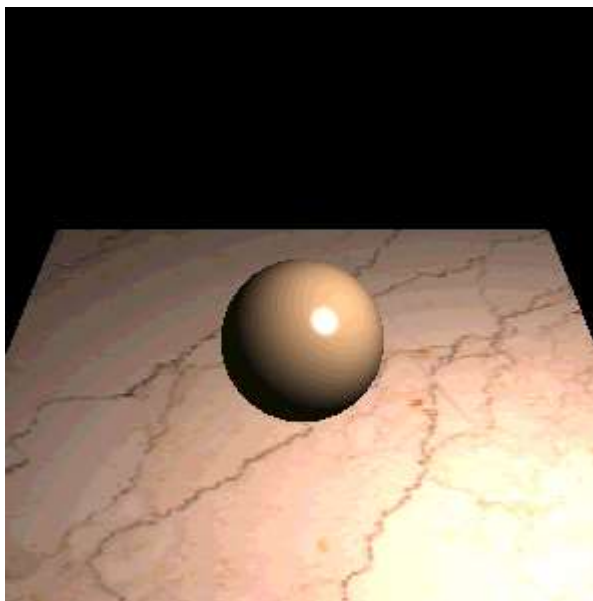
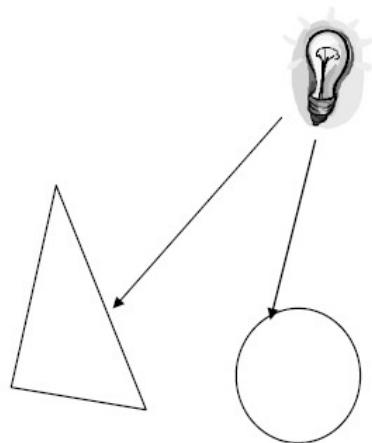
第九章 光照明模型(1)



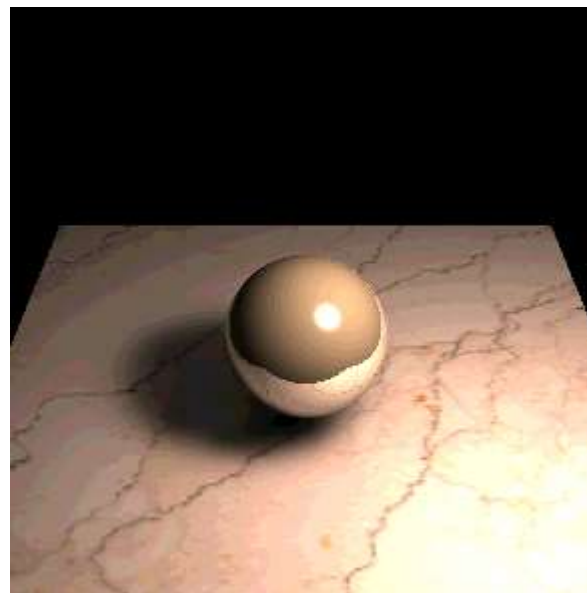
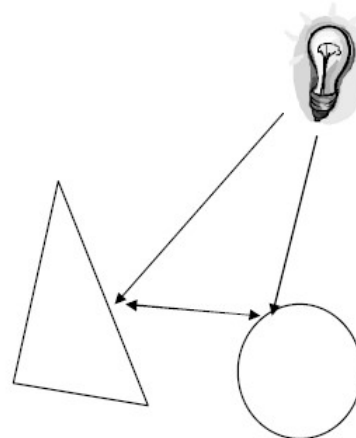
- 光照明模型/明暗效应模型(**illumination model, shading model, lighting model**): 根据光学物理的有关定律, 计算景物表面上任何一点投向观察者眼中的光亮度的大小和色彩组成。
- 局部(**Local**)光照明模型
- 整体(**Global**)光照明模型



局部光照明模型



整体光照明模型





光照明模型(1)

- 简单的局部光照明模型(简单光照明模型)
- 较为完善的局部光照明模型
- 光透射模型



早期发展

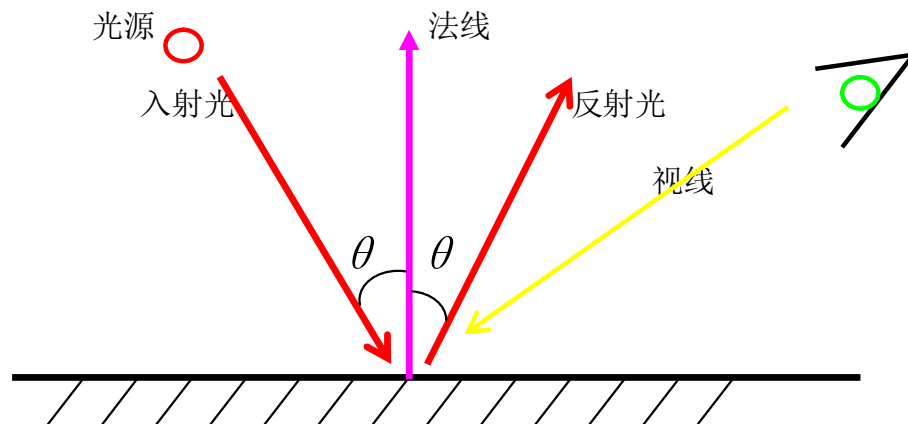
- **1967年，Wylie**等人第一次在显示物体时加进光照效果
- **1970年，Bouknight**提出第一个光反射模型：**Lambert**漫反射+环境光
- **1971年，Gourand**提出漫反射模型加插值的思想
- **1975年，Phong**提出图形学中第一个有影响的光照明模型



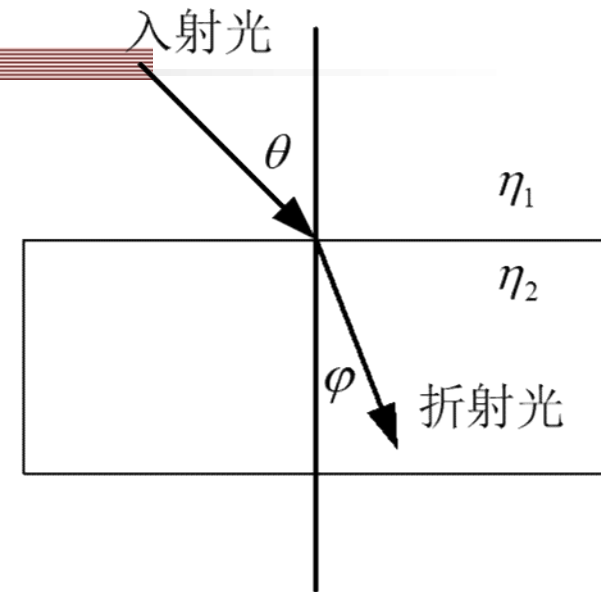
相关物理知识

■ 光的传播

■ 反射定律



- 反射光线、法线、入射光线共面；
- 反射光线与入射光线分居法线两侧；
- 反射角等于入射角；



■ 折射定律

- 折射光线、法线、入射光线共面；
- 折射光线与入射光线分居法线两侧；
- 折射角 φ 与入射角 θ 满足：

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\sin \varphi}{\sin \theta}$$



能量关系

- 在光的反射和折射现象中的能量分布：

$$I_i = I_d + I_s + I_t + I_v$$

- 入射光强 I_i ，漫反射光强 I_d ，镜面反射光强 I_s ，透射光强 I_t ，吸收光强 I_v ；
- 能量是守恒的



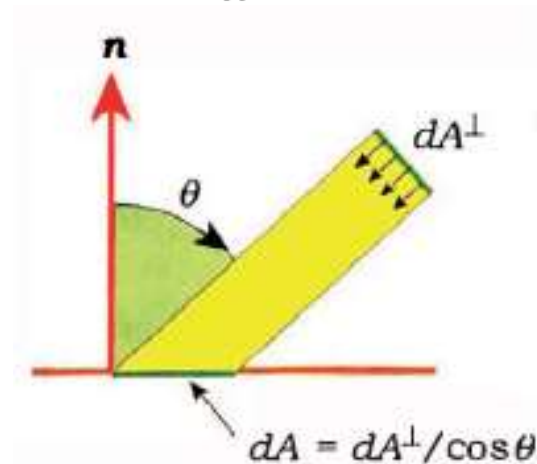
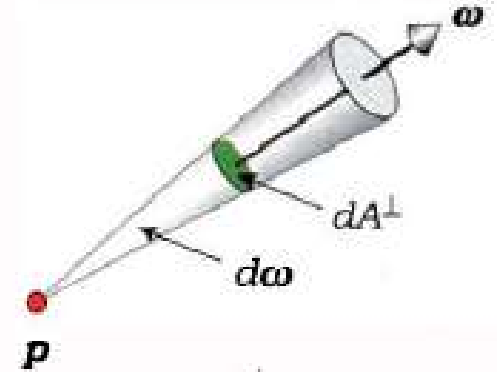
光的度量

- **光能量守恒定律**: 单位时间内通过一个光线管中任一截面的能量是守恒的;
- **辐射能量 Q (Radiant energy)**: 每个光子携带的能量 $Q=hc/\lambda$, h : 普朗克常数, c : 光速
- **辐射通量 Φ (Radiant flux)**: $\Phi=dQ/dt$
- **辐射通量密度 (Radiant flux density)**: $d\Phi/dA$ 也称光通量



- 辐射照度 E (Irradiance): 到达物体表面的通量密度
- 辐射出射度 M (Radiant exitance): 离开物体表面的通量密度, 也称辐射度 (Radiosity)
- 面元 dA^\perp 向点光源 P 所张的立体角 $d\omega = \frac{dA^\perp}{r^2}$
- 辐射强度 (Radiant Intensity): $\frac{d\Phi}{d\omega}$
- 辐射亮度 I (Radiance):

$$I = \frac{d^2\Phi}{dA^\perp d\omega} = \frac{d^2\Phi}{dA \cos\theta d\omega}$$





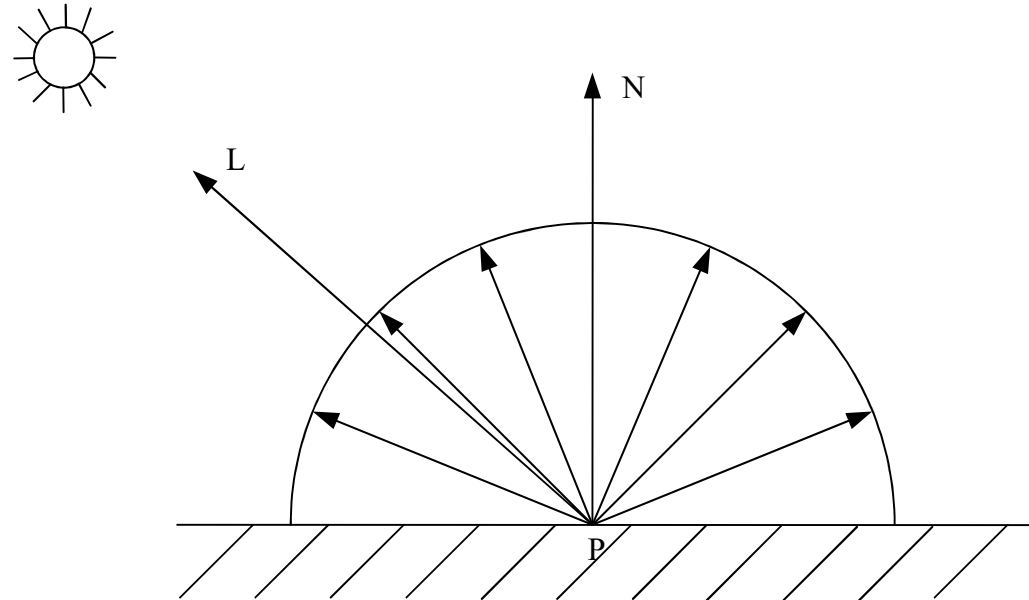
Phong光照模型

- 简单光照模型模拟物体表面对光的反射作用；
- 光源为点光源；
- 物体对直接光照的反射作用分为：
 - 镜面反射(**Specular Reflection**)
 - 漫反射(**Diffuse Reflection**)
- 物体间相互作用用环境光(**Ambient Light**)表示；



理想漫反射

- 粗糙、无光泽表面
- 漫反射光均匀向各方向传播，与视点无关；





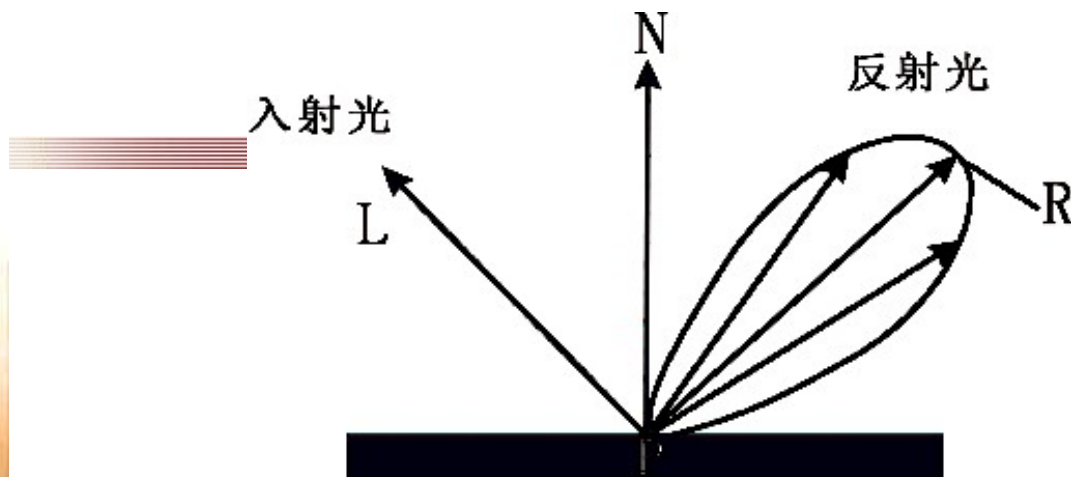
■ 由**Lambert**余弦定律，漫反射光强为

$$I_d = I_p K_d \cos(\theta) = I_p K_d \cdot (L \cdot N)$$

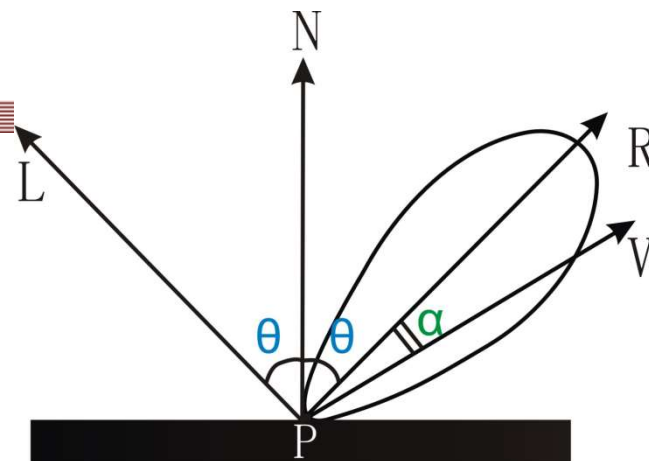
- L ：点 P 指向光源的单位向量；
- N ：物体表面在点 P 处的单位法向量；
- θ ： L 与 N 间的夹角；
- K_d ：物体表面的漫反射系数，反映物体表面的颜色；



- 漫反射光的颜色由入射光的颜色和物体表面的颜色共同决定；
- 漫反射系数 K_d 的三个分量 K_{dr} , K_{dg} , K_{db} ，分别代表**RGB**三原色的漫反射系数，通过调整它们来设定物体的颜色；
- 通过调整入射光强的三个分量 I_{pr} , I_{pg} , I_{pb} 来改变光源的颜色。
- m 个光源的情况下：
$$I_d = K_d \sum_{i=1}^m [I_{p,i} \cdot (L_i \cdot N)]$$



- 高光现象；
- 镜面反射光在空间分布具有一定的方向性，朝空间一定方向会聚
 - 理想镜面，反射光都集中在镜面反射方向上；
 - 非理想镜面反射面，反射光分布在镜面反射方向周围，且由反射定律决定的反射方向的光强最大；



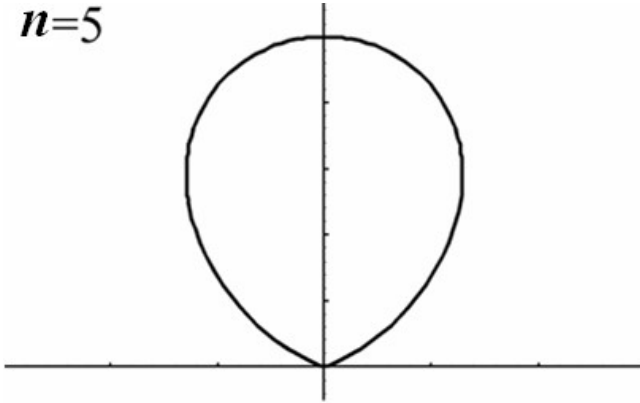
- 镜面反射光强可表示为:

$$I_s = I_p \cdot K_s \cdot \cos^n(\alpha) = I_p \cdot K_s (R \cdot V)^n$$

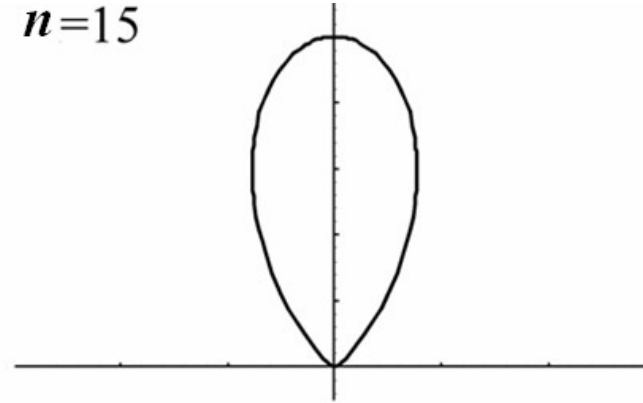
- K_s : 镜面反射系数;
- α : 视线方向 V 与反射方向 R 间的夹角;
- n : 镜面高光指数, 模拟镜面反射光在空间的会聚程度。
 - n 越大, 光的会聚程度越高, 表明物体表面的光泽度越高;



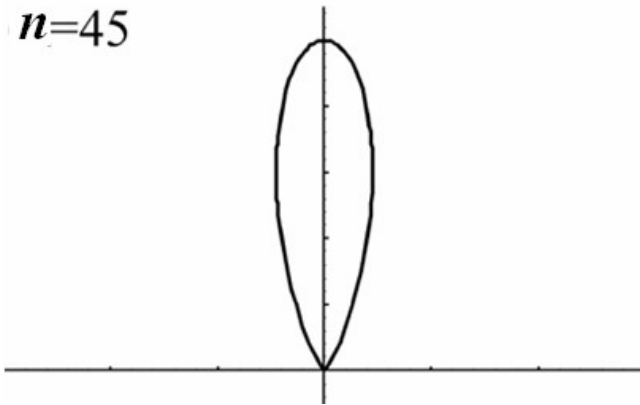
$n=5$



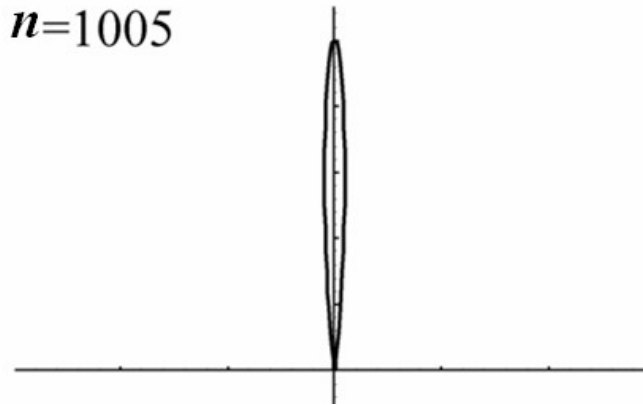
$n=15$



$n=45$



$n=1005$

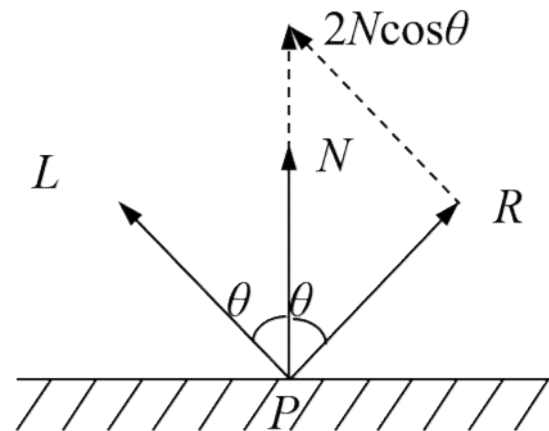




$$I_s = I_p \cdot K_s \cdot \cos^n(\alpha) = I_p \cdot K_s (R \cdot V)^n$$

■ 反射方向计算:

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





- 镜面反射系数 K_s 是一个与物体的颜色无关的参数；
- 镜面反射光产生的高光区域只反映光源的颜色；
- m 个光源的情形：
$$I_s = K_s \cdot \sum_{i=1}^m [I_{p,i} \cdot (R_i \cdot V)^n]$$



环境光

- 环境光是指光源间接对物体的影响；
- 光在物体和周围环境之间多次反射，最终达到平衡；
- 同一环境下的环境光光强均匀分布；
- 环境光的反射光强： $I_e = I_a \cdot K_a$
 - I_a : 环境光的光强；
 - K_a : 物体对环境光的反射系数；



$$I = I_a K_a + I_p K_d (L \cdot N) + I_p K_s (R \cdot V)^n$$



环境光反射

+



理想漫反射

+



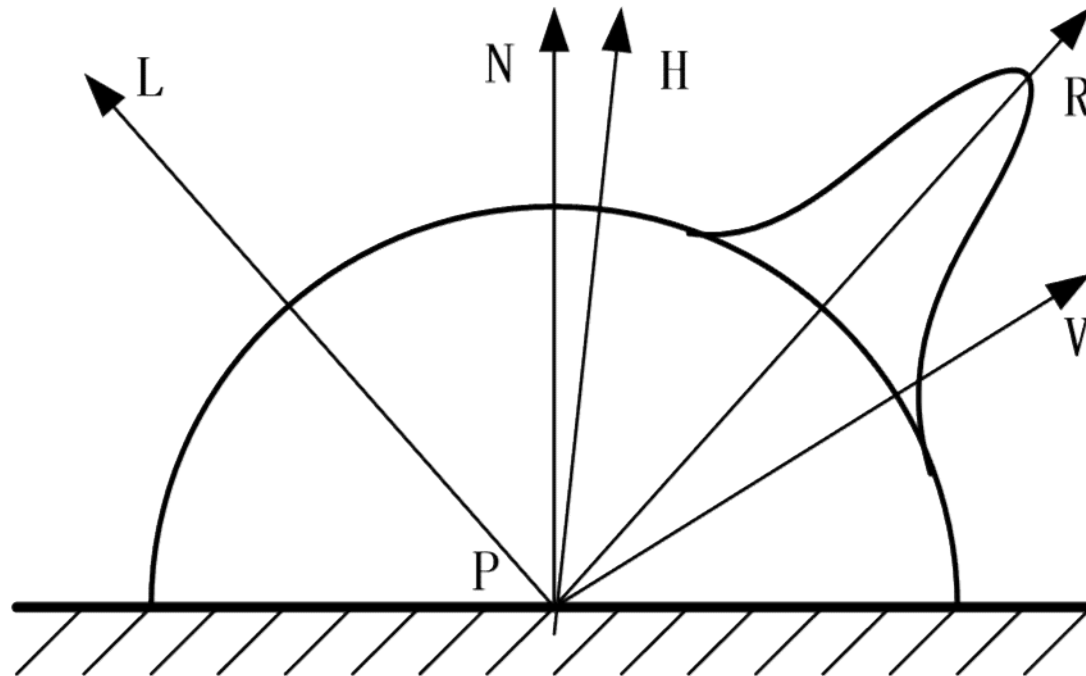
镜面反射

=





Phong模型





Phong模型的实现

- **Phong模型**: $I = I_a K_a + I_p K_d (L \cdot N) + I_p K_s (R \cdot V)^n$
- 对物体表面上的每个点 P ，均需计算光线 L 的反射方向 R ， $R = 2N(N \cdot L) - L$ 。
- 为了减少计算量，假设：
 - 光源在无穷远处， L 为常向量
 - 视点在无穷远处， V 为常向量
 - 用 $(H \cdot N)$ 近似 $(R \cdot V)$ ， H 为 L 与 V 的平分向量

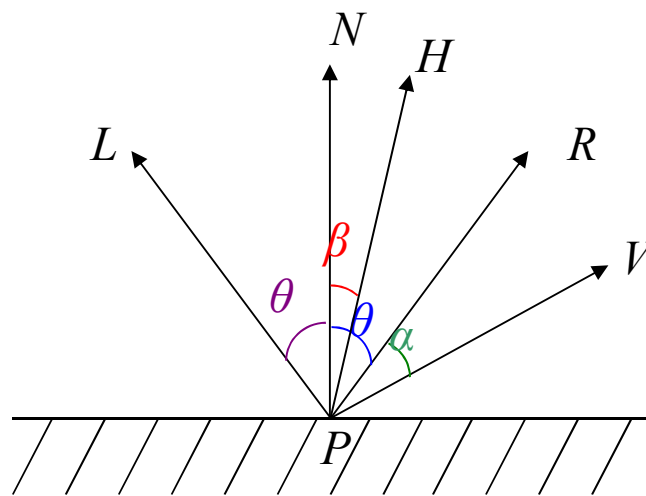
$$H = \frac{L + V}{|L + V|}$$



- 对所有的点总共只需计算一次 H 的值，节省了计算时间；
- 用 $(H \cdot N)$ 近似 $(R \cdot V)$ 的合理性：可以通过调整 n 对镜面反射的高光域进行补偿。

$$2(\theta + \beta) = 2\theta + \alpha$$

$$\beta = \alpha / 2$$



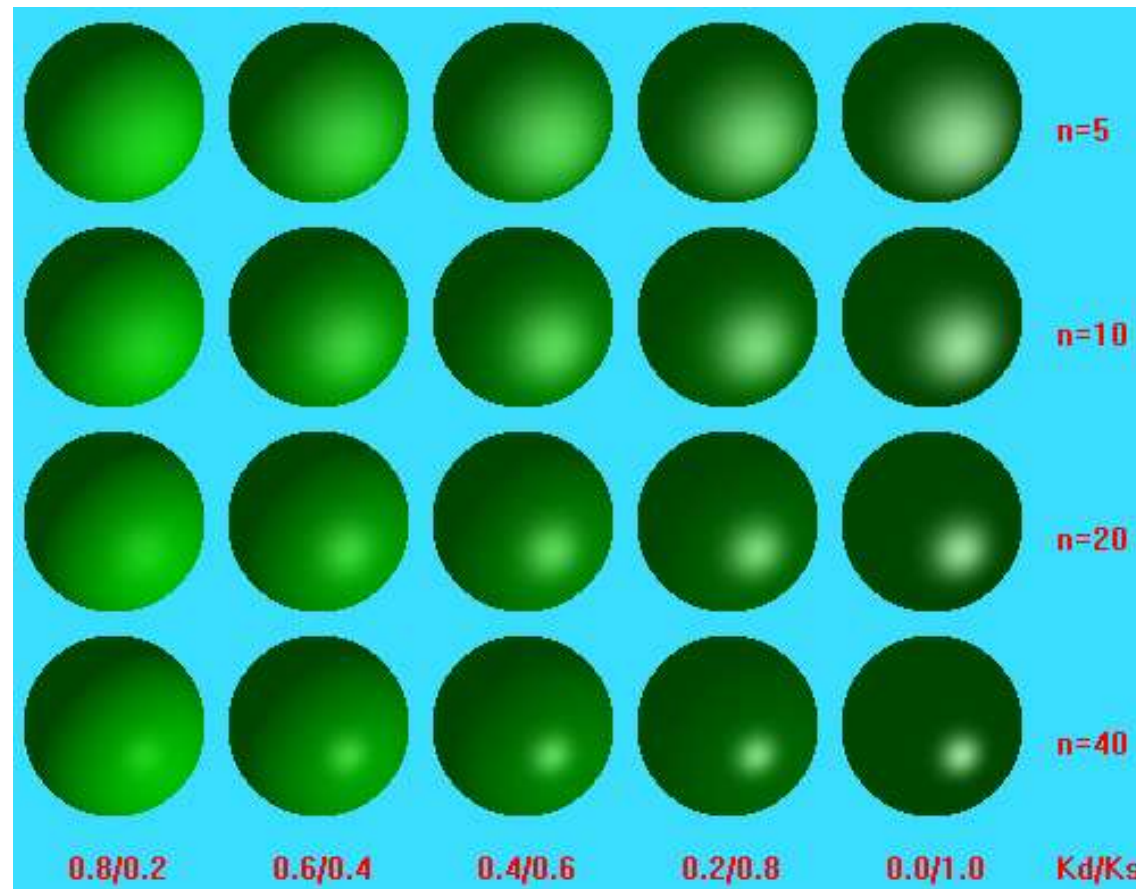


■ Phong光照模型的RGB颜色模型形式:

$$\begin{cases} I_r = I_{ar}K_{ar} + I_{pr}K_{dr}(L \cdot N) + I_{pr}K_{sr}(H \cdot N)^n \\ I_g = I_{ag}K_{ag} + I_{pg}K_{dg}(L \cdot N) + I_{pg}K_{sg}(H \cdot N)^n \\ I_b = I_{ab}K_{ab} + I_{pb}K_{db}(L \cdot N) + I_{pb}K_{sb}(H \cdot N)^n \end{cases}$$



Phong模型示例



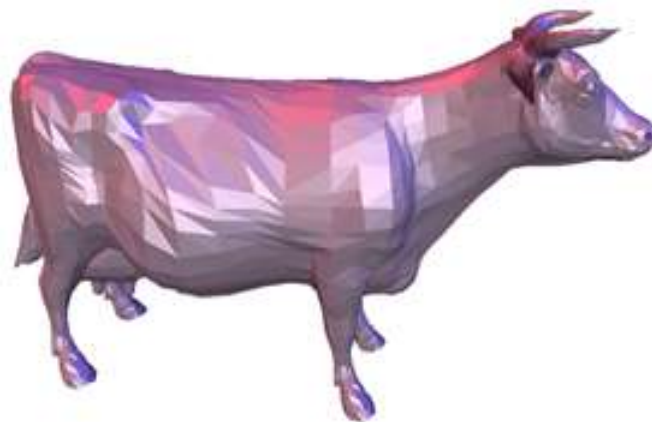


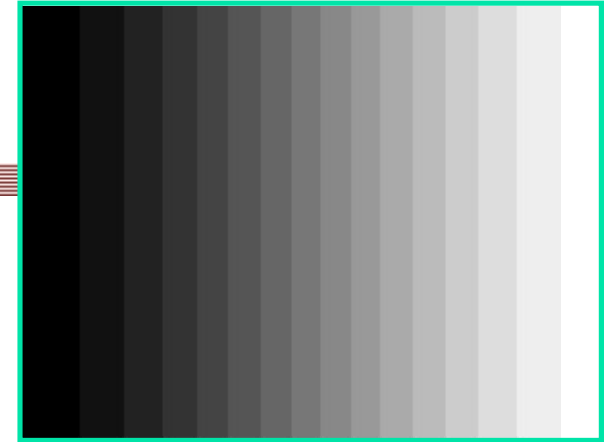
Phong模型的特点

- **Phong**光照明模型是真实感图形学中提出的第一个有影响的光照明模型
- **Phong**模型具有以下特点：
 - 光源被假设为理想点光源；
 - 把光源和视点都定在无穷远处，用 $(H \cdot N)$ 近似 $(R \cdot V)$ ；
 - 漫反射光强和镜面反射光强都被认为是对光源入射光的直接反射，且互相独立；



- 镜面反射光的颜色，仅由光源的颜色决定，与物体的材料属性无关；
- 用镜面高光指数来模拟物体表面的光滑程度；
- 环境光为一个常数；
- 大量的化简影响了生成的图形的真实感程度；





增量式光照明模型

- **Phong模型** $I = I_a K_a + I_p K_d (L \cdot N) + I_p K_s (H \cdot N)^n$
 - 光强计算公式是物体表面法向量的函数：
 $I=f(N)$
 - 多边形内部的所有象素颜色相同
 - 不同法向的相邻多边形的邻接处有光强突变及马赫带效应(**Mach Bands**)
 - 马赫带效应：人类视觉系统夸大具有不同常量光强的两个相邻区域之间的光强不连续性
- 保证多边形之间的颜色光滑过渡——
增量式光照明模型



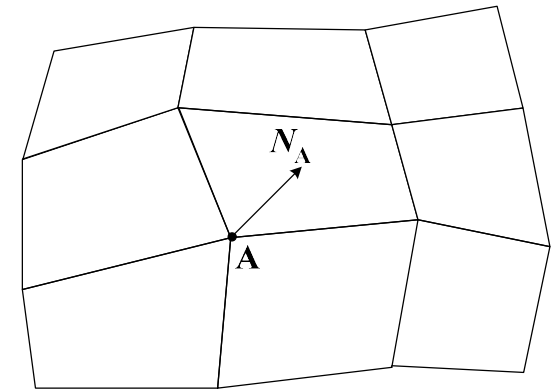
基本思想

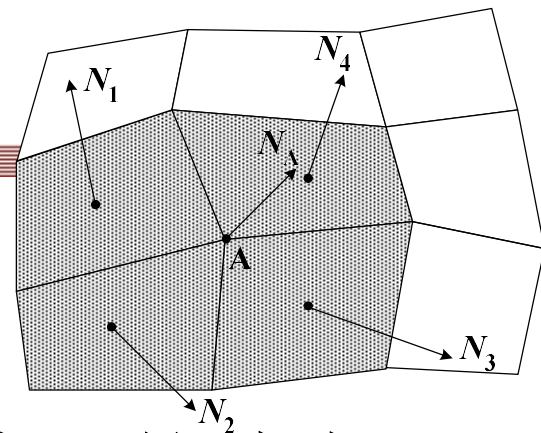
- 在各多边形顶点处计算光照明强度或参数，然后在各个多边形内部进行双线性插值，得到多边形光滑均匀的颜色分布
- 两个主要算法
 - 双线性光强插值(**Gouraud**明暗处理)
 - 双线性法向插值(**Phong**明暗处理)



Gouraud双线性光强插值

- Gouraud于1971年提出;
- 算法的基本描述:
 - 计算多边形顶点的平均法向
 - 用简单光照明模型计算顶点的平均光强
 - 插值计算离散多边形边上的各点光强
 - 插值计算多边形内域中各点的光强。





顶点法向计算

- 与某个顶点相邻的所有多边形的法向平均值近似作为该顶点的近似法向量
- 顶点**A**相邻的多边形有**k**个，它的法向量计算为：

$$N_A = \frac{1}{k} (N_1 + N_2 + \cdots N_k)$$

- 计算出的平均法向一般与该多边形物体近似曲面的切平面法向比较接近



顶点平均光强计算

- 用**Phong**光照明模型及平均法向量计算在顶点**A**处的光强

$$I = I_a K_a + I_p K_d (L \cdot N) + I_p K_s (H \cdot N)^n$$

- **Gourand**提出明暗处理方法时，**Phong**模型还没有出现，采用：

$$I = I_a K_a + I_p K_d (L \cdot N) / (r + k)$$

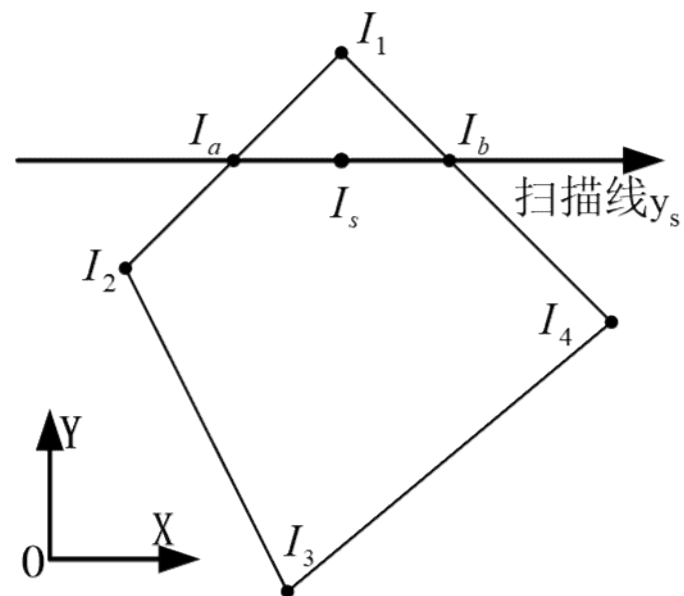
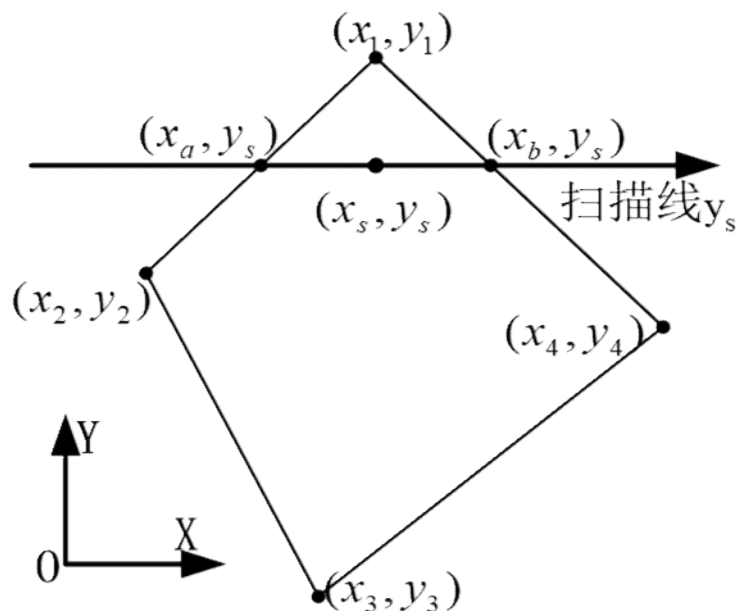
- r : 点到光源的距离；
- k : 常数；



光强插值

■ 双线性光强插值

- 由顶点的光强插值计算各边的光强，然后由各边的光强插值计算出多边形内部点的光强



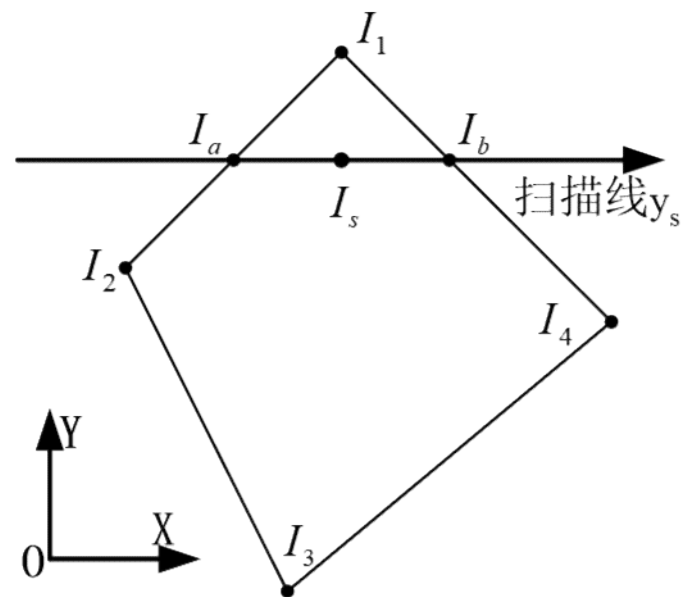


光强插值公式

$$I_a = \frac{1}{y_1 - y_2} [I_1(y_s - y_2) + I_2(y_1 - y_s)]$$

$$I_b = \frac{1}{y_1 - y_4} [I_1(y_s - y_4) + I_4(y_1 - y_s)]$$

$$I_s = \frac{1}{x_b - x_a} [I_b(x_b - x_s) + I_a(x_s - x_a)]$$





增量算法

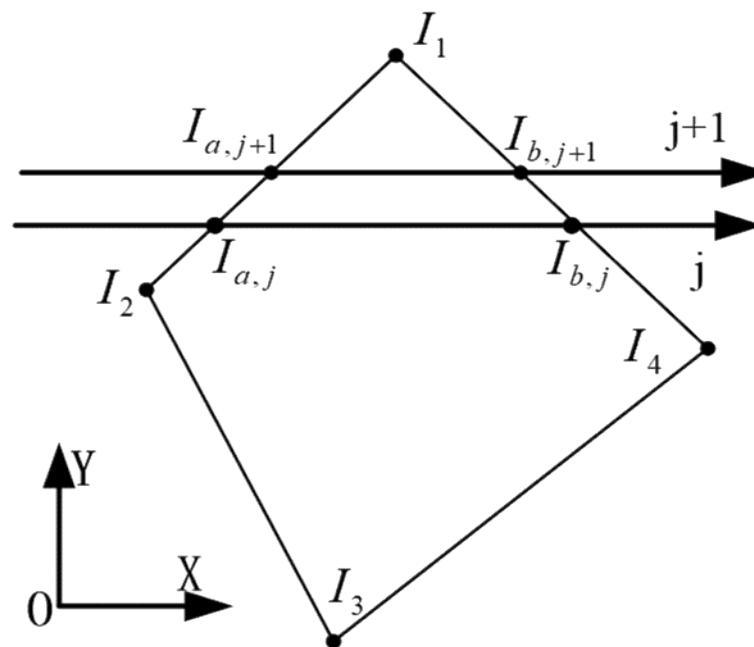
- 扫描线由 j 变成 $j+1$,新扫描线上点的光强:

$$I_{a,j+1} = I_{a,j} + \Delta I_a,$$

$$I_{b,j+1} = I_{b,j} + \Delta I_b,$$

$$\Delta I_a = (I_1 - I_2)/(y_1 - y_2)$$

$$\Delta I_b = (I_1 - I_4)/(y_1 - y_4)$$

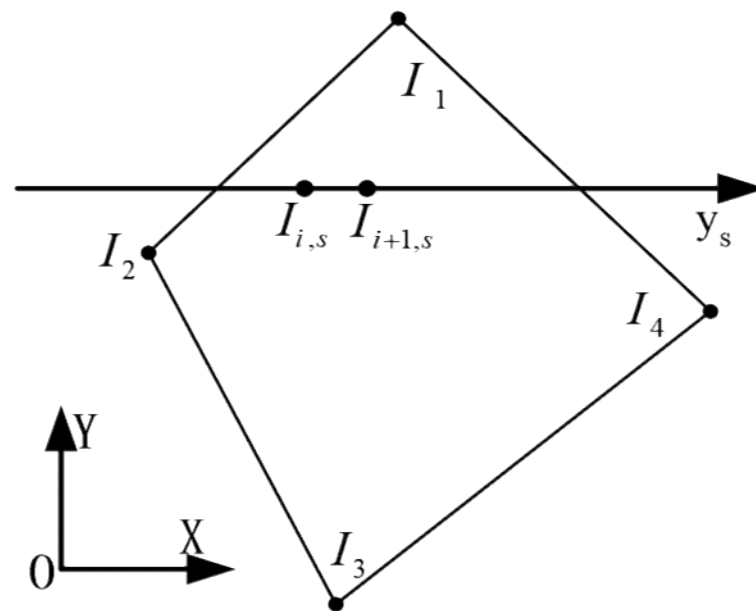




- 扫描线内部，横坐标由*i*增为*i+1*，扫描线上像素点的光强：

$$I_{i+1,s} = I_{i,s} + \Delta I_s$$

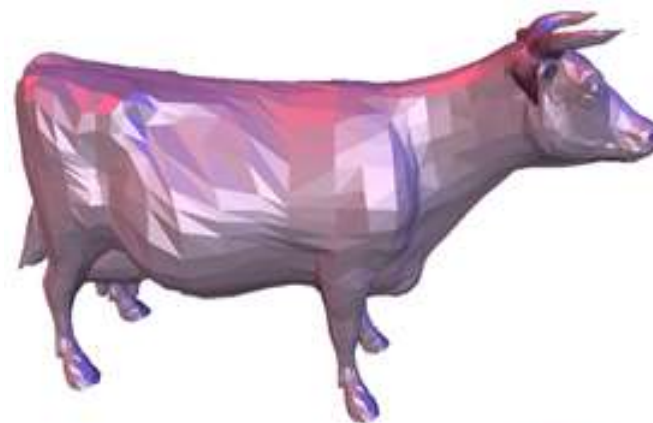
$$\Delta I_s = \frac{1}{x_b - x_a} (I_b - I_a)$$





Phong模型示例

- 三角网格面片模型
 - 未经插值的Phong模型
 - 增量式光照明模型



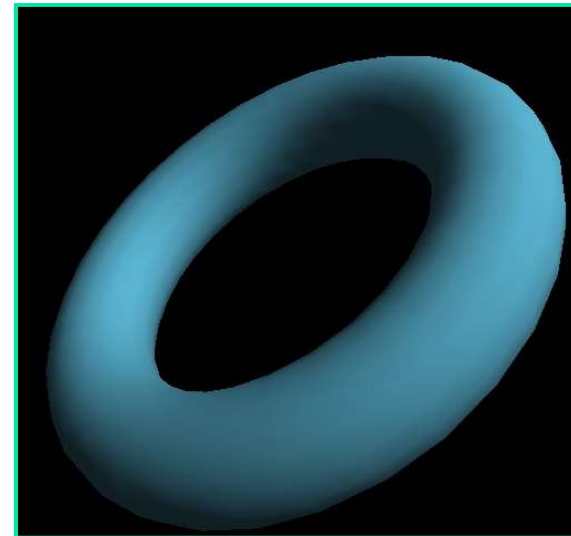
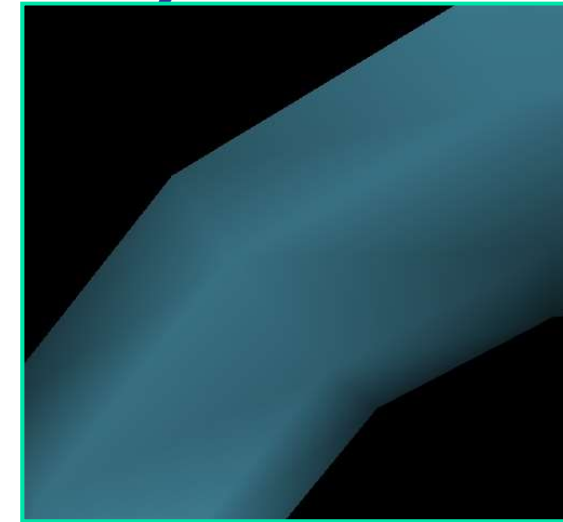
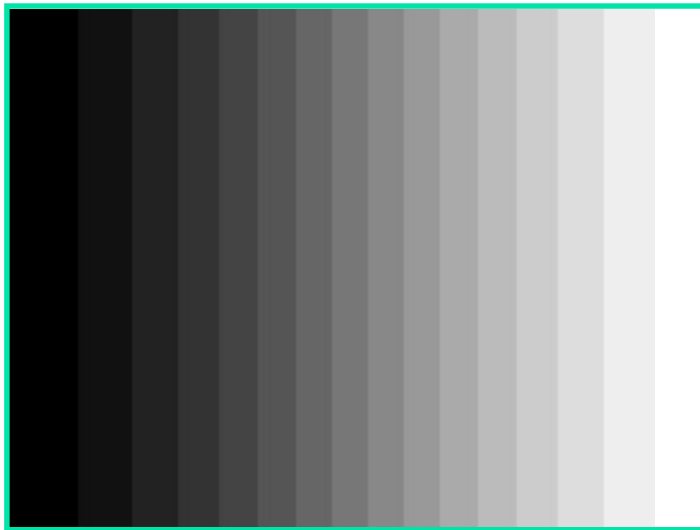


双线性光强插值特点

- 计算速度快;
- 解决了相邻多边形之间的颜色突变问题;
- 镜面反射效果不太理想: 高光域的形状不规整, 且只能在顶点周围形成;
- 相邻多边形的边界处的马赫带效应不能完全消除;
- 改进: **Phong**提出双线性法向插值, 以时间为代价, 解决高光问题



马赫带(Mach Bands)





Phong双线性法向插值

- 保留双线性插值，对多边形边上的点和内域各点，采用增量法；
- 对顶点的法向而非顶点光强进行插值；
- 对多边形内每个点由插值得到的法向计算各自光强；



法向插值方法

- 方法与光强插值类似，其中的光强项用法向量项来代替。基本公式：

$$N_a = \frac{1}{y_1 - y_2} [N_1(y_s - y_2) + N_2(y_1 - y_s)]$$

$$N_b = \frac{1}{y_1 - y_4} [N_1(y_s - y_4) + N_4(y_1 - y_s)]$$

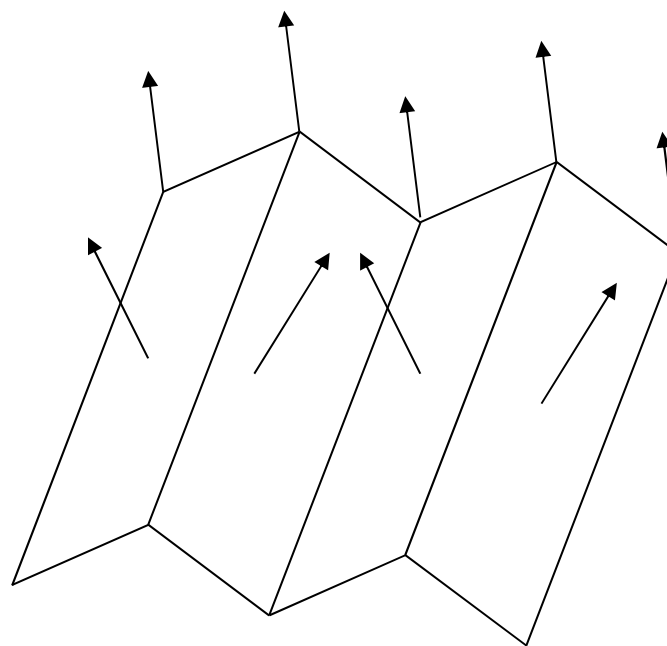
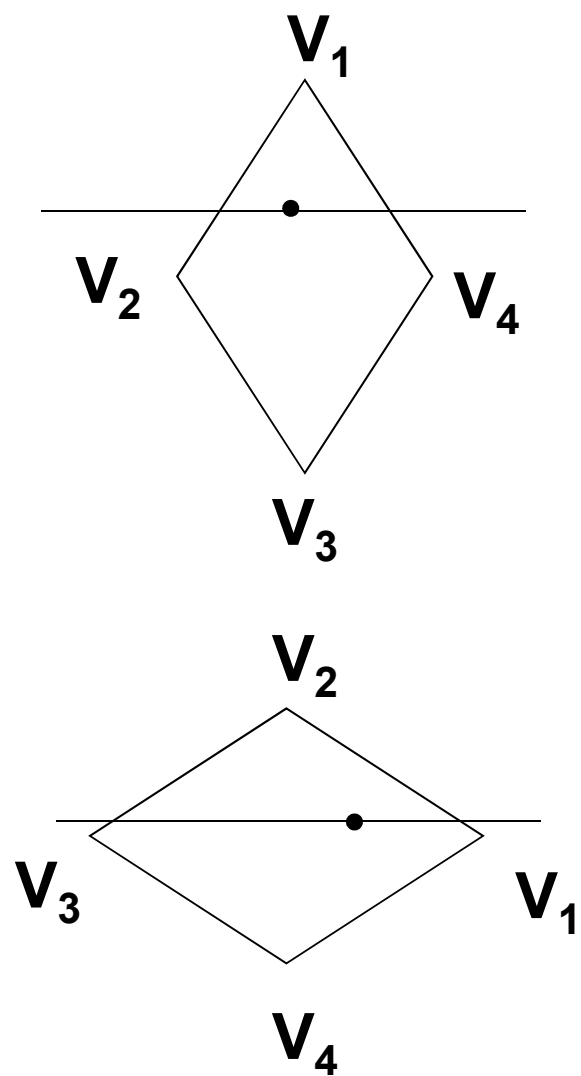
$$N_s = \frac{1}{x_b - x_a} [N_b(x_b - x_s) + N_a(x_s - x_a)]$$

- 增量插值计算也类似，用法向代替光强



增量式光照明模型评价

- 双线性光强插值能有效地显示漫反射曲面，计算量小；
- 双线性法向插值可以产生正确的高光区域，但是计算量大；
- 增量式光照明模型的不足：
 - 物体边缘轮廓是折线段而非光滑曲线；
 - 由于透视，等间距扫描线会产生不均匀效果；
 - 插值结果取决于插值方向；
 - 法向不精确；





光照明模型(1)

- 简单的局部光照明模型(简单光照明模型)
- 较为完善的局部光照明模型
- 光透射模型



用局部光反射模型生成的各种材质的瓶子



理论基础：光的电磁理论

- 自然光的镜面反射率 ρ 的**Fresnel**公式：

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2(\theta - \psi)}{\operatorname{tg}^2(\theta + \psi)} + \frac{\sin^2(\theta - \psi)}{\sin^2(\theta + \psi)} \right)$$

- θ 是入射角， ψ 是折射角，满足折射定律

$$\sin \psi = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta$$

- 反射率与折射率有关
- 简单记做波长的函数 $\rho(\theta, \lambda)$

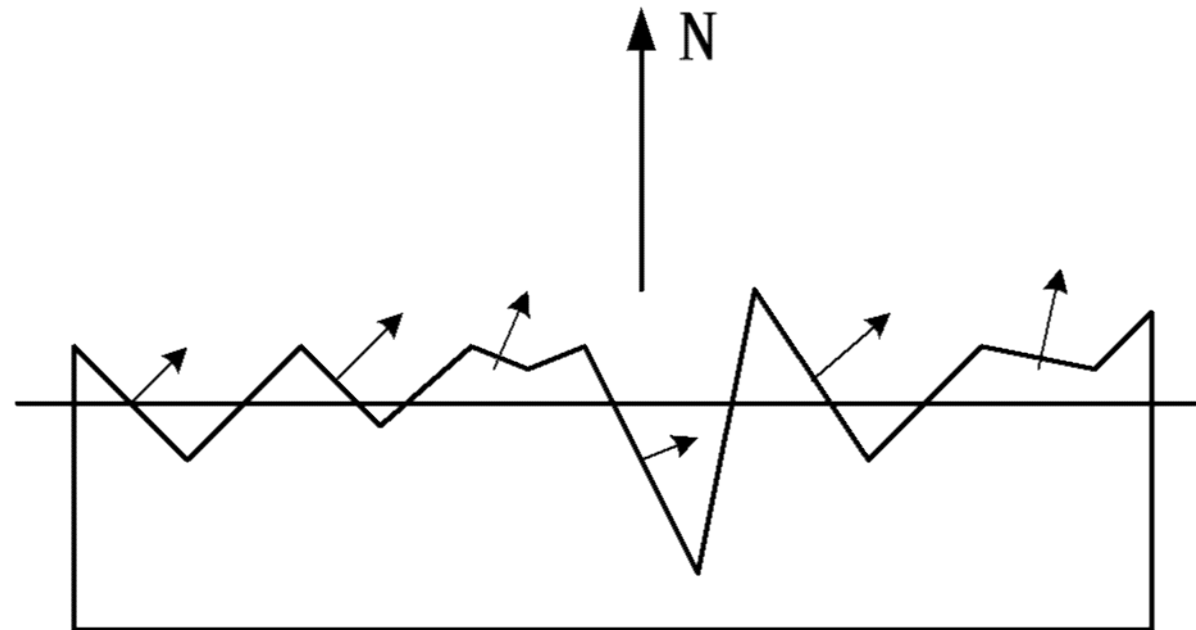


微平面理论

- 微观情况下，物体表面粗糙不平
- 局部光照明模型中反映物体表面的粗糙程度
 - 粗糙物体表面由无数微小理想镜面组成
 - 这些平面朝向各异，随机分布
 - 对于每一个微平面，只有在它的反射方向上才有反射光

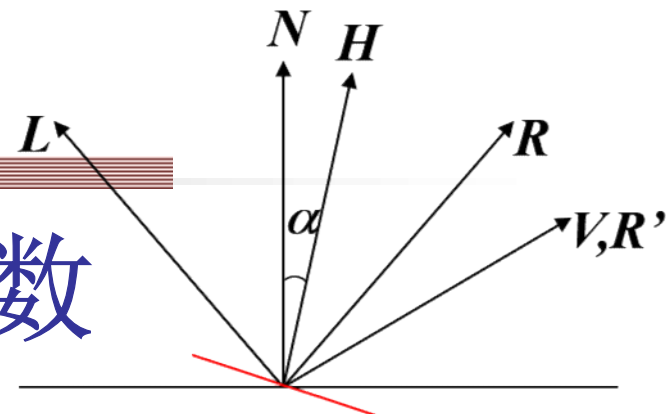


■ 微平面示意





- 微平面是理想镜面，反射率可用**Fresnel**公式计算
- 物体表面的反射率与表面的粗糙度有关
- 实际物体反射率： $DG\rho(\theta,\lambda)$
 - D 为微平面法向的分布函数
 - G 为由于微平面的相互遮挡或屏蔽而使光产生的衰减因子



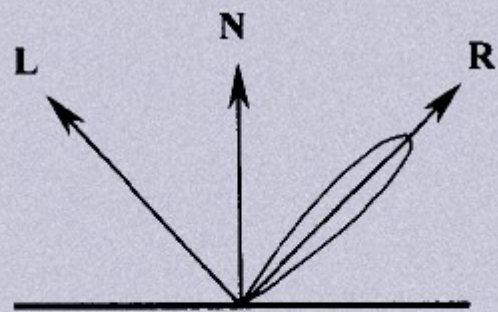
微平面法向分布函数

- **Torrance**和**Sparrow**采用**Gauss**分布函数模拟法向分布:

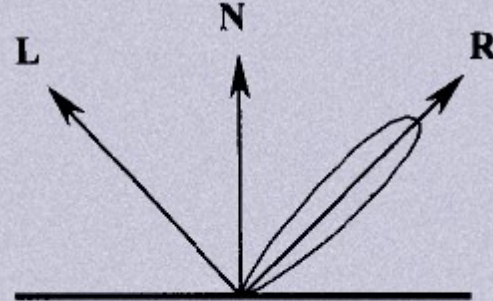
$$D = ke^{-(\alpha/m)^2}$$

- k 为常系数
- α 为微平面的法向与平均法向的夹角($N \cdot H$)
- m 为微平面斜率的均方根, 表示表面的粗糙程度

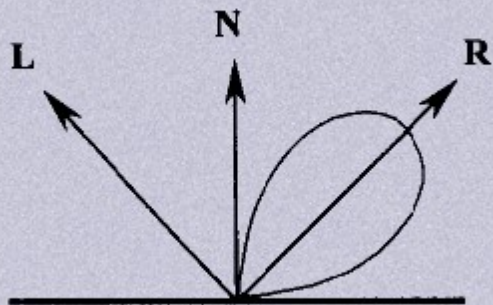
$$m = \sqrt{\frac{m_1^2 + m_2^2 + \dots + m_n^2}{n}}$$



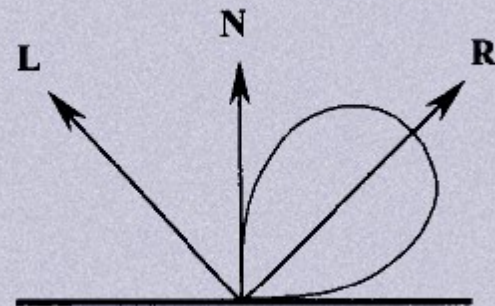
Gauss 分布, $m=0.2$



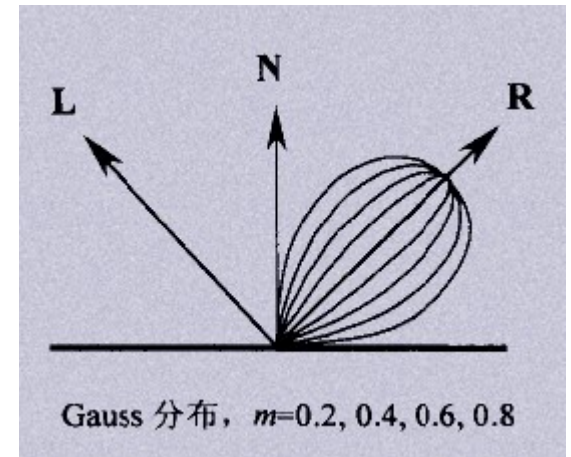
Beckmann 分布, $m=0.2$



Gauss 分布, $m=0.6$



Beckmann 分布, $m=0.6$



Gauss 分布, $m=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$



- **Cook**和**Torrance**采用**Berkmann**分布函数模拟微平面的法向分布：

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \alpha} e^{-\tan^2 \alpha / m^2}$$

- 微平面法向的分布函数***D***表示微平面的法向与平均法向的夹角为 α 的微平面占整个微平面的比例；***m***越小,表面越光滑。
- 在**Phong**模型中， $\cos^n \alpha$ 也可看作一种微平面法向分布函数

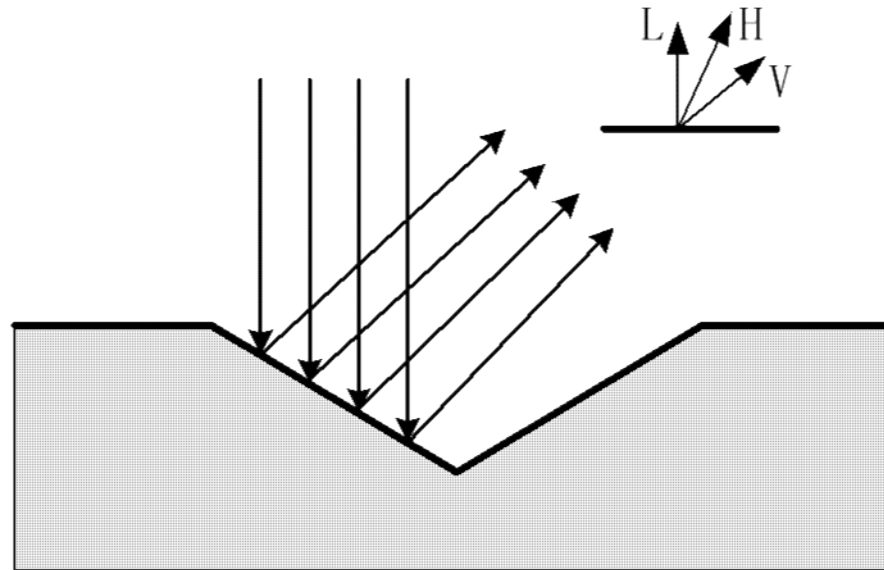


衰减因子

- 衰减因子是由于微平面的相互遮挡或屏蔽而产生的。
- 衰减因子 G 在局部光照明模型中也可以反映物体表面的粗糙程度。
- 微平面对光的遮挡和屏蔽有三种情况：无遮挡无屏蔽，部分反射光被屏蔽，部分入射光被遮挡。



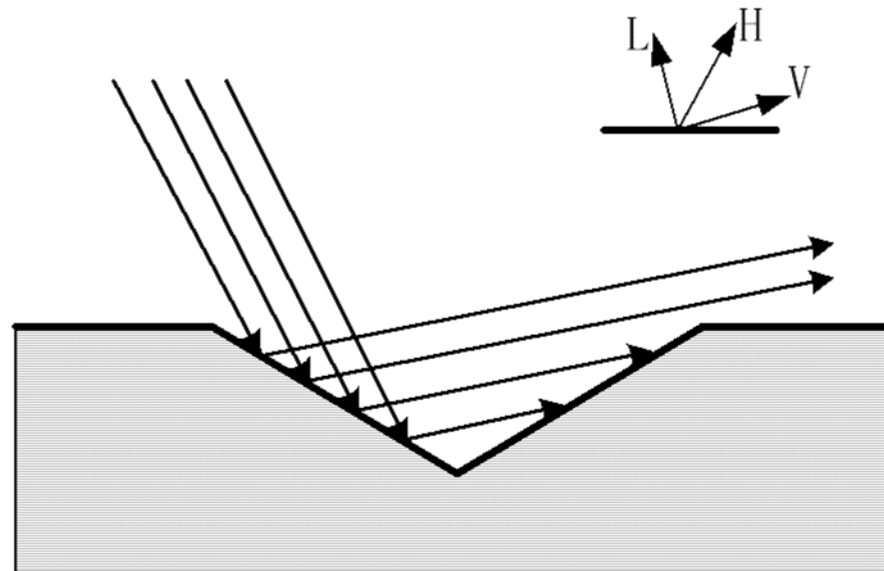
- 无遮挡无屏蔽, $G=1$

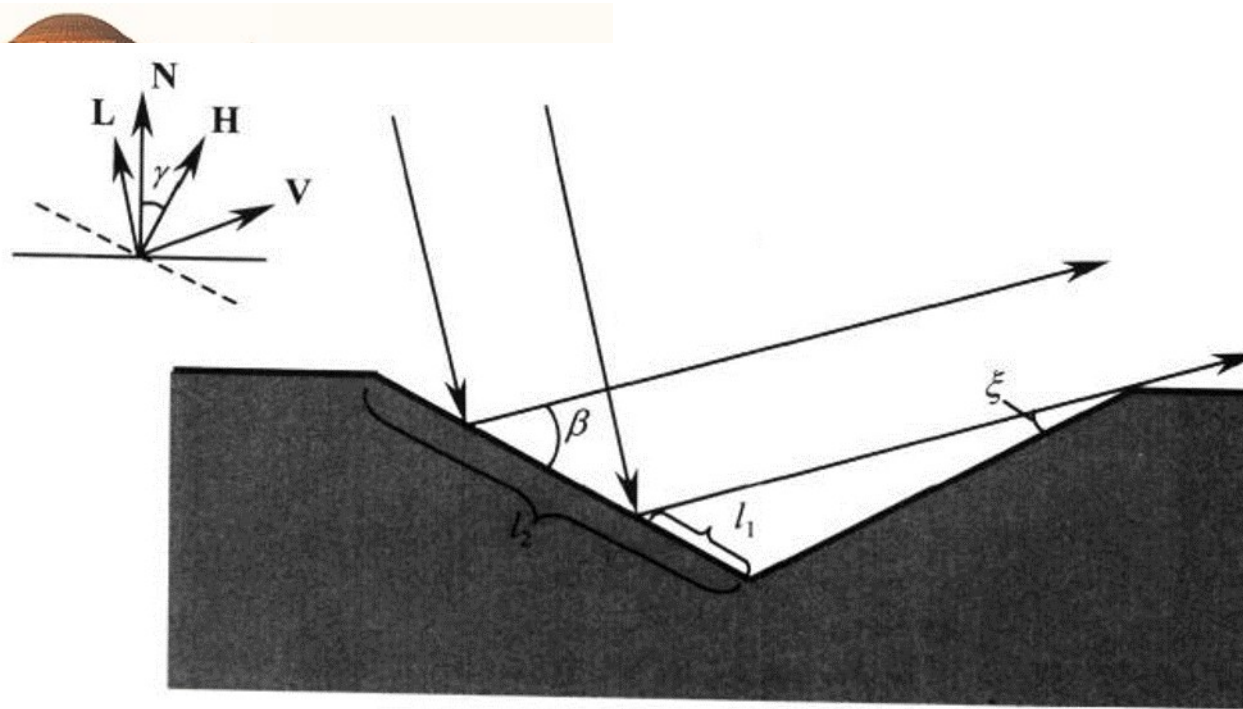




■ 部分反射光被屏蔽

$$G_m = \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(H \cdot L)}$$





$$G = 1 - \frac{l_1}{l_2}$$

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin \xi}{\sin \beta}, \gamma = \frac{\beta + \xi}{2}$$

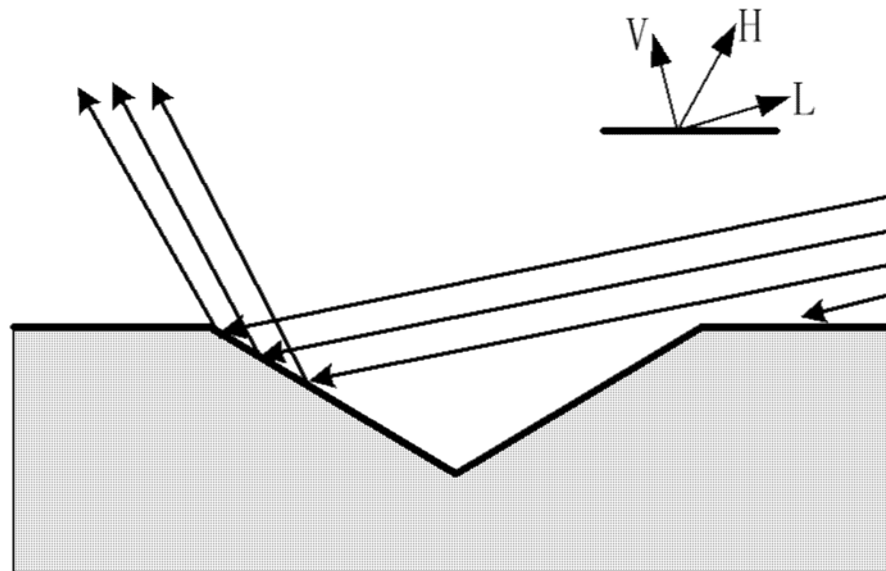
$$N \cdot H = \cos \gamma, H \cdot L = \sin \beta, N \cdot V = \sin \frac{\beta - \xi}{2}$$

$$G_m = 1 - \frac{\sin \xi}{\sin \beta} = \frac{2 \cos \frac{\beta + \xi}{2} \sin \frac{\beta - \xi}{2}}{\sin \beta} = \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(H \cdot L)}$$



■ 部分入射光被遮挡

$$G_s = \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)}$$





- 实际的应用中，把上述三种情况衰减因子 G 的最小值作为该微平面的衰减因子

$$G = \text{Min}\{1, G_m, G_s\}$$



局部光照明模型

- **Cook和Torrance于1981年提出**
- R_{bd} 表示物体对入射光的反射率

$$R_{bd} = \frac{I_r}{E_i}$$

- 反射光的光强 I_r
- 单位时间内单位面积上的入射光能量 E_i (辐射照度)

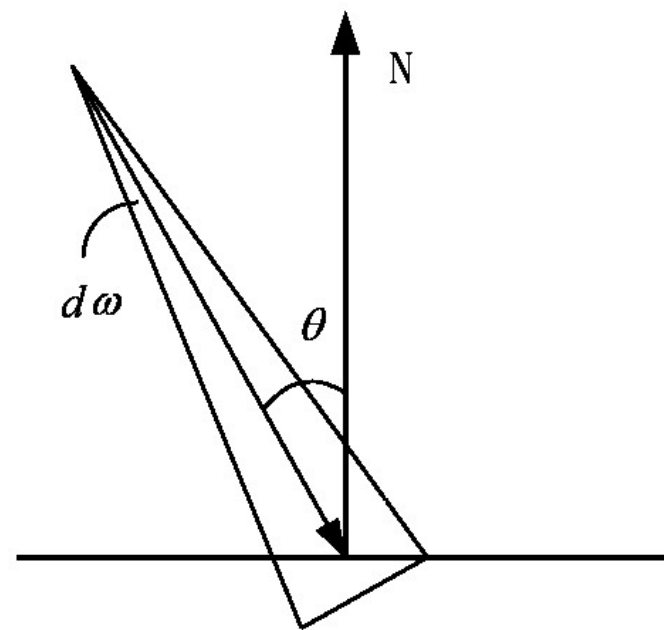


- 辐射照度(**Irradiance**) E_i 可用入射光的光强 I_i 和单位面积向光源所张的立体角 $d\omega$ 表示为:

$$E_i = I_i \cos \theta \cdot d\omega = I_i (N \cdot L) \cdot d\omega$$

- 反射光光强:

$$I_r = R_{bd} I_i (N \cdot L) \cdot d\omega$$





- 双向反射率可表示为漫反射率与镜面反射率的线性组合 $R_{bd} = K_d R_d + K_s R_s$

- $K_d + K_s = 1$, 漫反射系数与镜面反射系数
- 物体表面的漫反射率 $R_d = R_d(\lambda)$
- 物体表面的镜面反射率

$$R_s = \frac{DG\rho(\theta, \lambda)}{\pi(N \cdot L)(N \cdot V)}$$



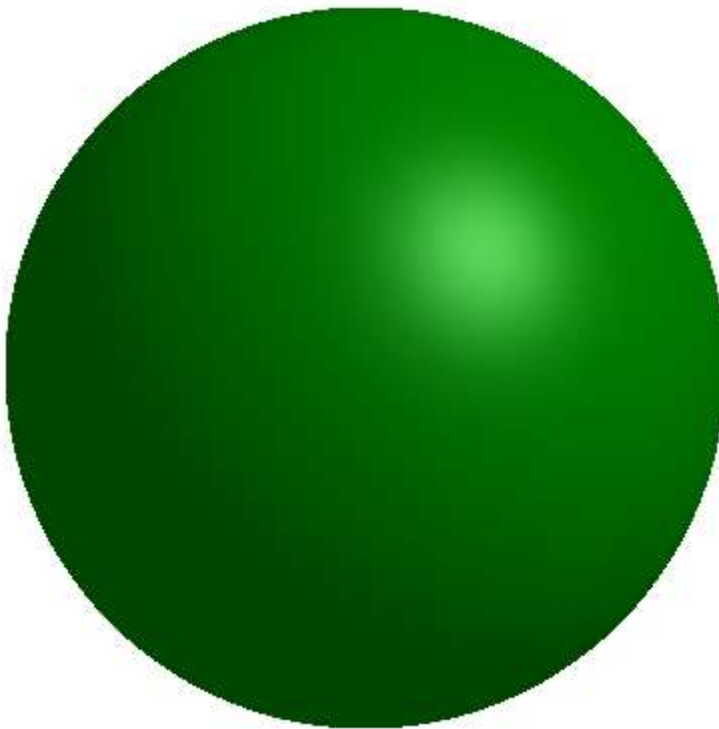
■ 局部光照明模型表示

$$I_r = I_a K_a + I_i (N \cdot L) d\omega (K_d R_d + K_s R_s)$$

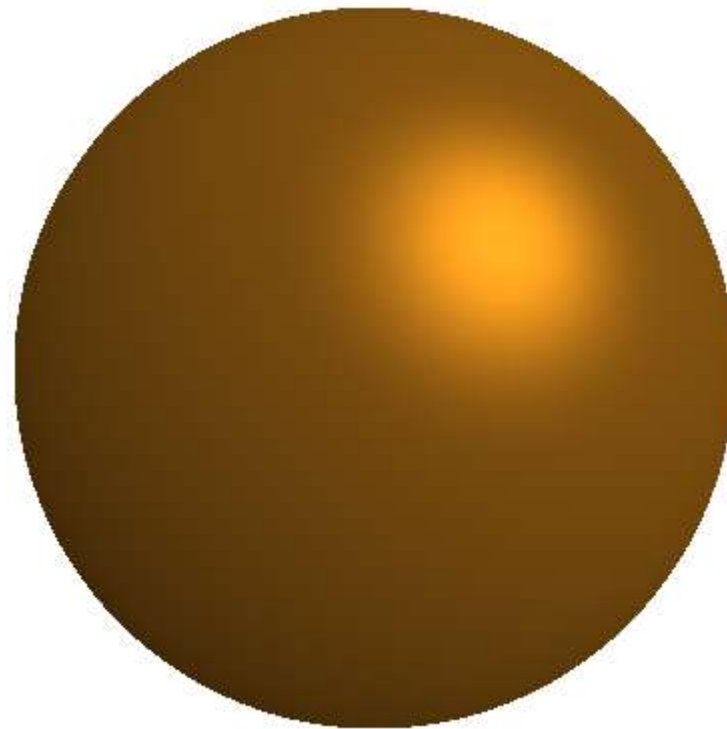
- I_r 物体表面反射光强
- $I_a K_a$ 表示环境光的影响
- 最后一项是考虑了物体表面性质后的反射光强度量



简单与局部模型比较



Phong模型



局部光照明模型



局部光照明模型的优点

- 相对于简单光照明模型而言
 - 基于入射光能量导出的光反射模型
 - 反映表面的粗糙度对反射光强的影响
 - 考虑了物体材质的影响，可以模拟磨光的金属光泽，高光颜色与材料的物理性质有关
 - 改进入射角很大时的失真现象