

2018-2019 年度第二学期 00106501

计算机图形学



童伟华 管理科研楼1205室

E-mail: tongwh@ustc.edu.cn

中国科学技术大学 数学科学学院

<http://math.ustc.edu.cn/>





第五章 明暗处理

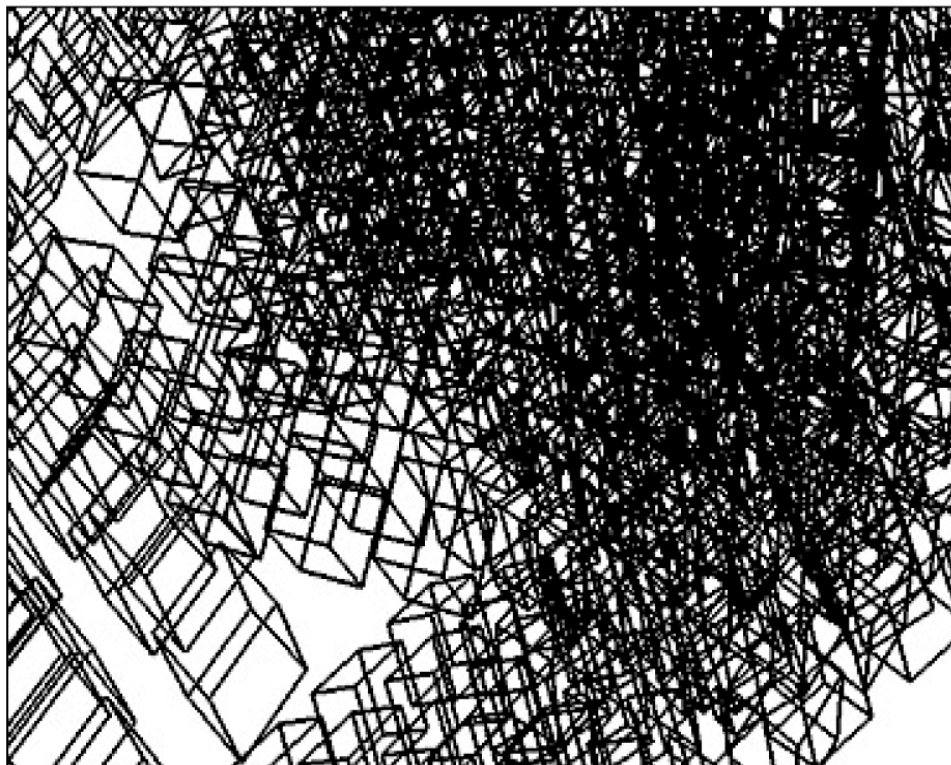


第一节 基本算法

多边形网格模型

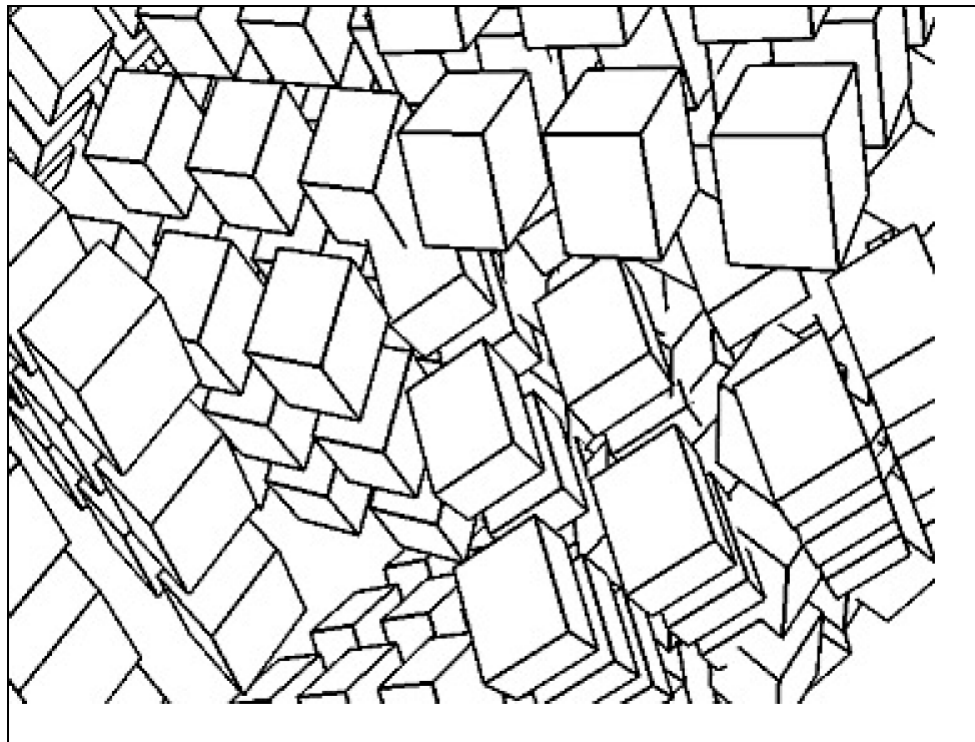


- 正如在第4.5节所述，在计算机图形学中的模型通常是由多边形网格构成的
- 右图以线框形式显示一个场景，由540个立方体组成



隐藏面消除

- 使多边形网格显得真实的第**一**种方法是隐藏面消除。该算法将在第八章中介绍
- 右图显示的是前**一**页场景经隐藏面消除的结果
- 但结果仍然显得平坦

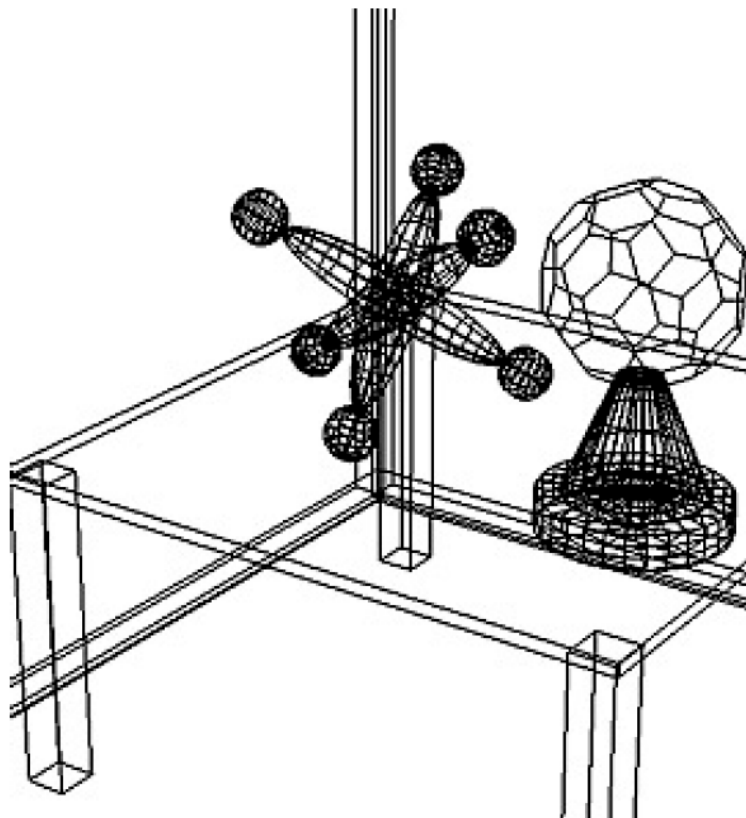


模拟光照

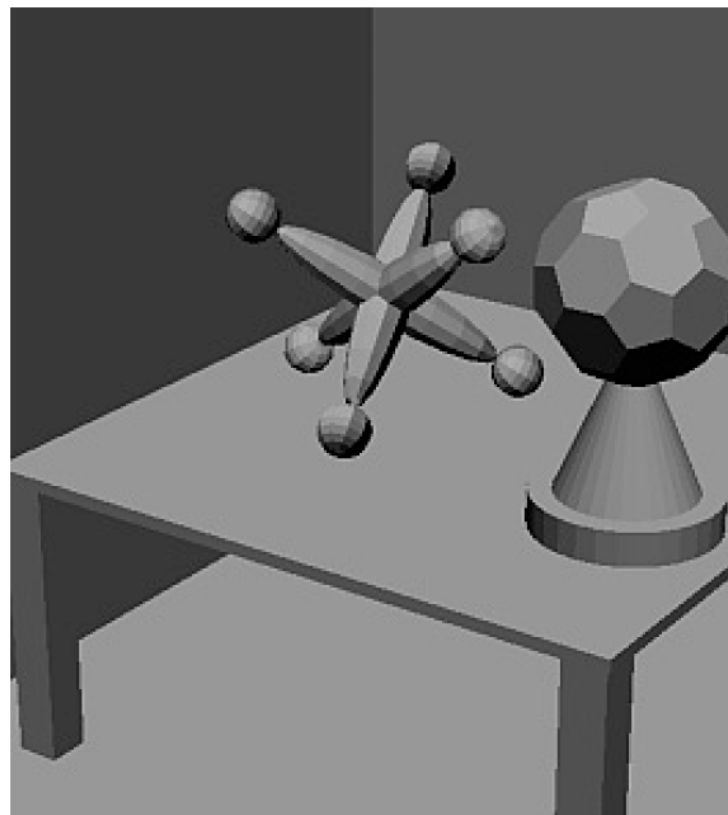


- 在隐藏面消除后，为了使对象看起来更真实，应当模拟光照在物体的状态，即应当通过计算确定表示对象的像素的适当状态
- 在这种计算中应充分根据对象表面的状态，光源的位置以及视点的位置
- 需要计算每帧图像中各个像素的颜色亮度，而不是由用户直接指定

示例



线框模型

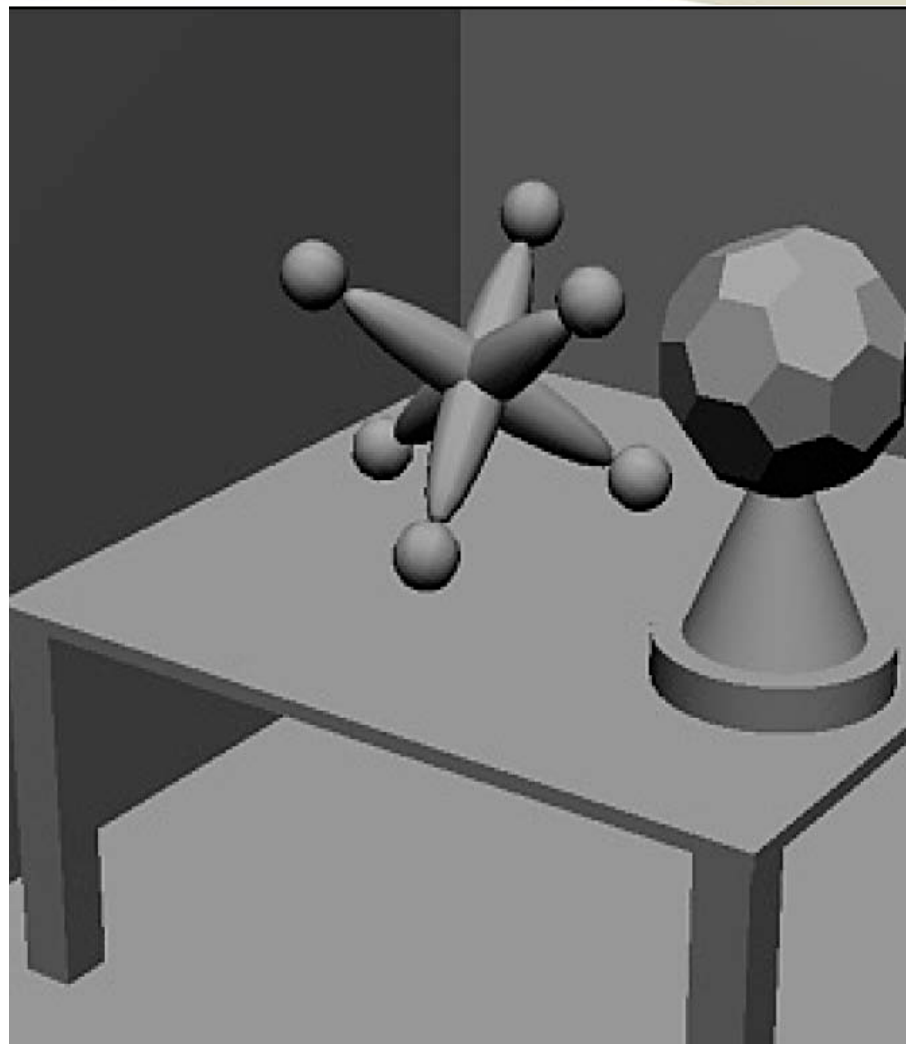


经过了简单光照处理和
隐藏面消除

平坦明暗处理

光滑明暗处理

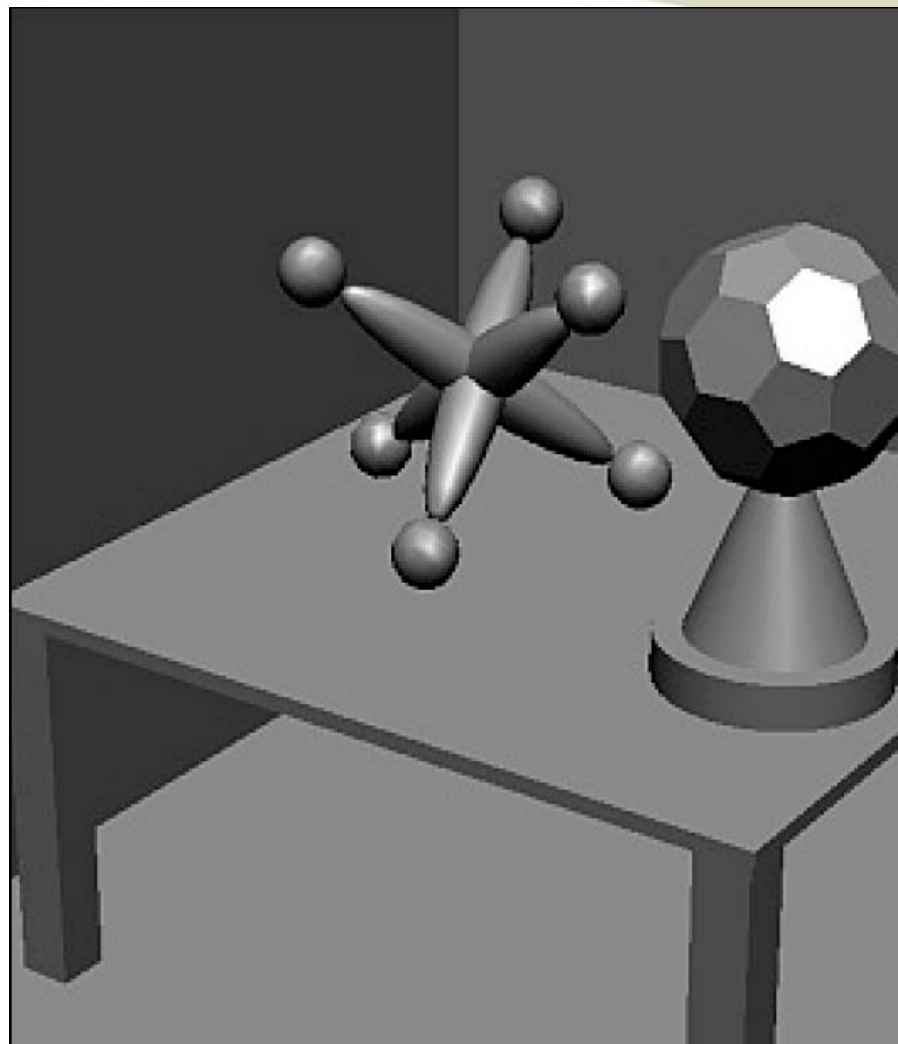
- 如果多边形网格表示的对象为光滑对象，那么显示的结果应当反映这种光滑性
- 在计算了每个顶点处的亮度后，应用线性插值计算出内部的亮度——称为Gouraud明暗处理算法



镜面光



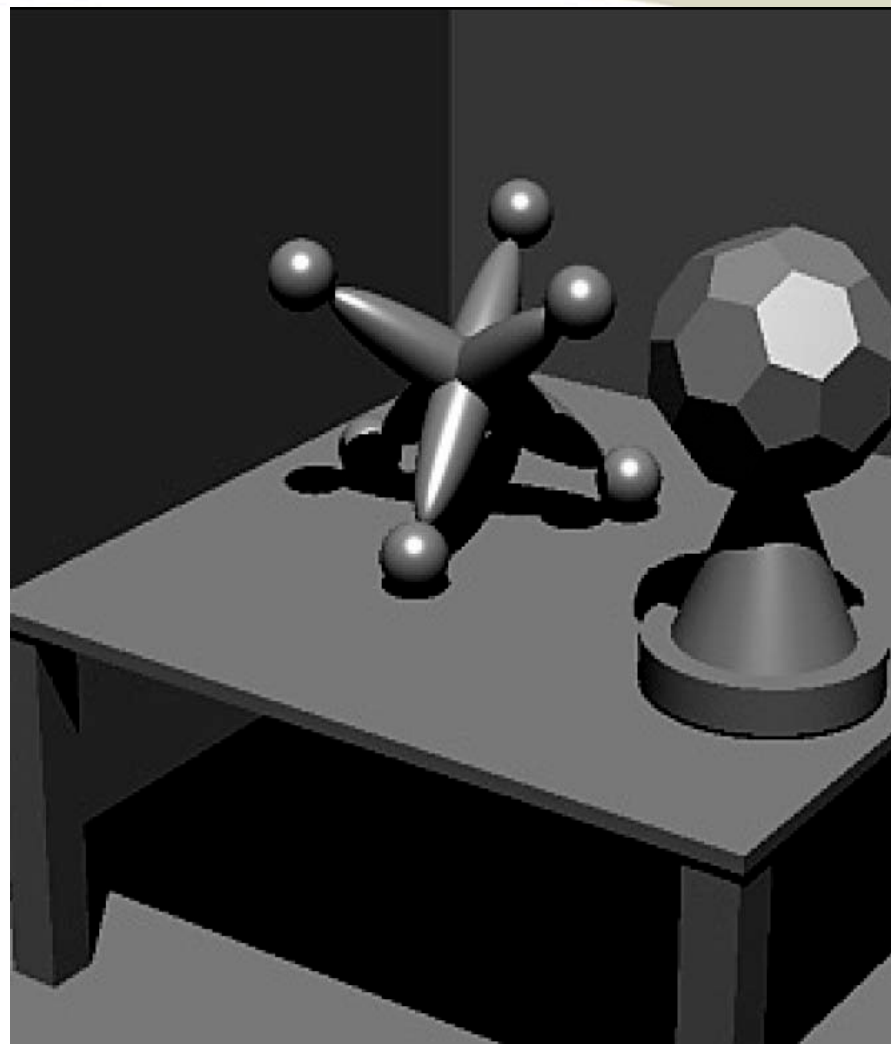
- 为了得到更真实的效果，
可以加入镜面光的效果



阴影



- 在加入阴影后，可以进一步提高图像的真实感



纹理映射



- 在对象表面上加上纹理效果，会使图像的真实感增强一大步



其它增加真实感的方法



■ 光线跟踪

- 计算复杂
- 容易实现，生成的图形中正确地反映阴影、镜面反射以及透明的效果

■ 辐射度方法

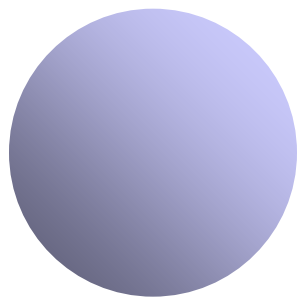
明暗处理



- 假设应用多边形网格建立了球面的模型，其颜色采用glColor定义，那么得到的结果为



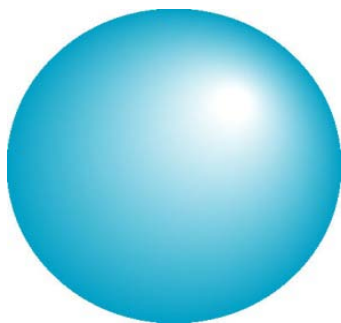
- 而我们希望结果为



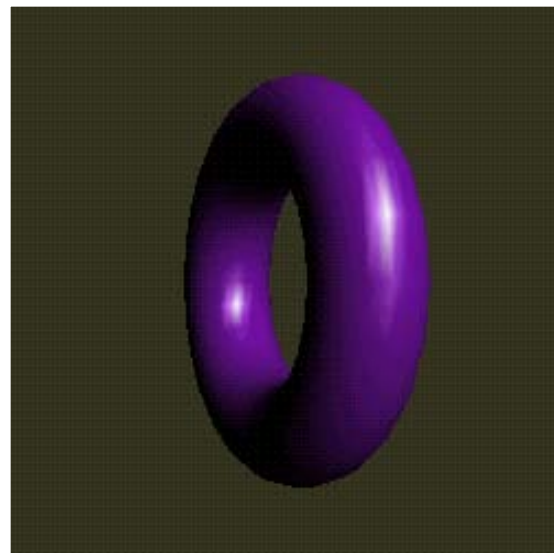
为什么？



- 为何实际中球的图像应当类似于



- 光源与材料的交互作用导致每点有不同的颜色或者明暗效果
- 这时需要考虑
 - 光源
 - 材料属性
 - 观察者位置
 - 曲面定向



散射

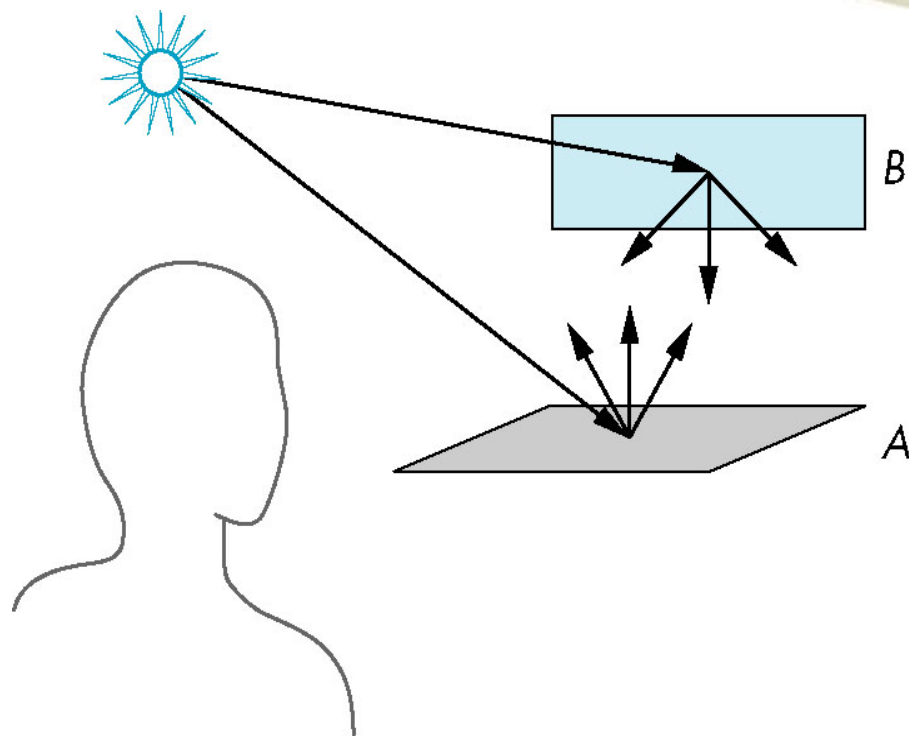
■ 光照射到A点

- 有些被反射
- 有些被吸收

■ 反射光中有些射到B点

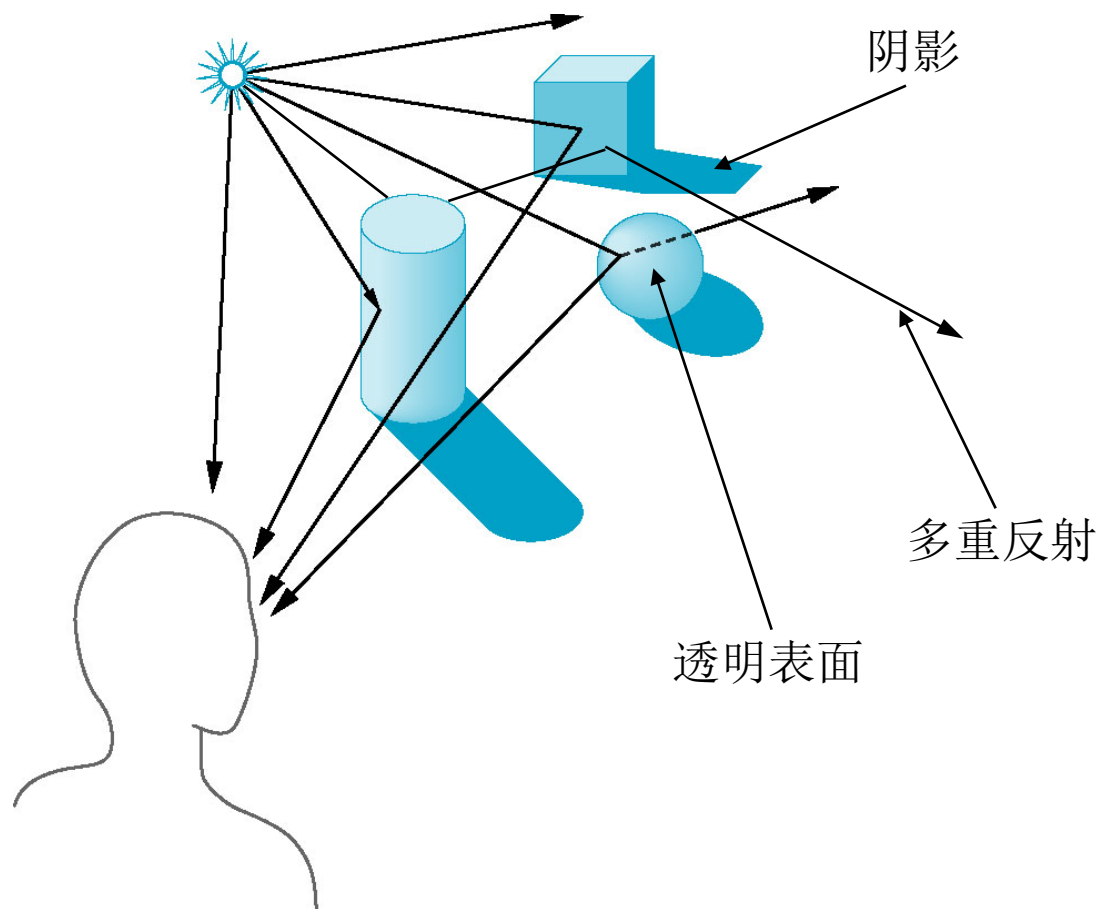
- 有些被反射
- 有些被吸收

■ 反射光中又有些射到A点，



- 光的无穷次反射和吸收过程可以用光照方程 (rendering equation) 描述
 - 一般是无法求解的, 即使应用数值方法也是非常复杂的
 - 光线跟踪只适用于完全反射曲面这一特殊情形的
- 光照方程是全局的, 并且包含
 - 阴影
 - 对象间的多次反射
- 以后会在光线跟踪和辐射度方法中详细考虑光照方程

全局效果



局部与全局光照

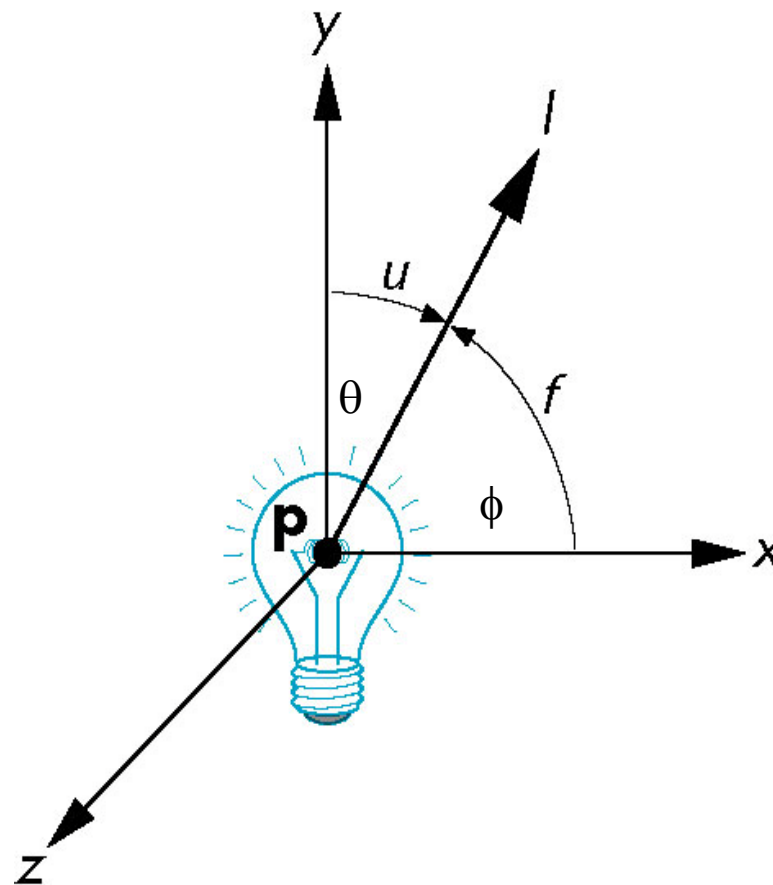


- 正确的明暗处理需要全局计算，即包含了所有的对象和光源
 - 这与流水线模型不兼容，在这个体系中对每个多边形单独进行明暗处理（局部光照）
- 然而在计算机图形学中，特别是在实时图形应用中，如果所得结果看起来可以的话，这种局部计算是可以接受的
 - 存在许多方法逼近全局效果

光源的描述



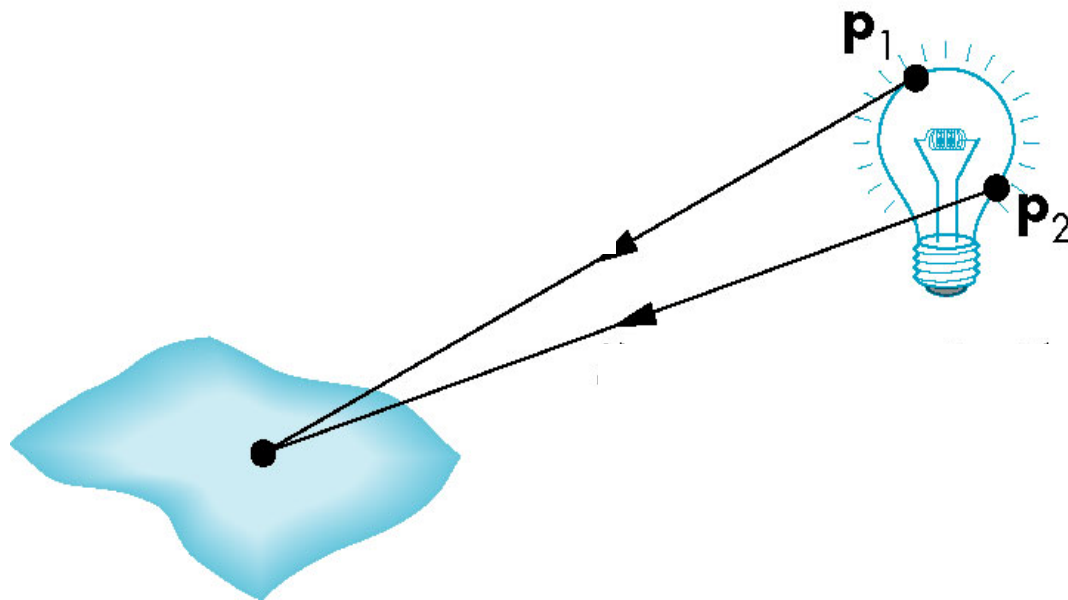
- 光线从光源表面离开的方式有两种
 - 自发射
 - 反射
- 在表面上任一点 (x, y, z) 所发出的光可以用 θ , ϕ 两个方位角表示以及每个波长 λ 的强度确定
 - 光照函数有六个变量



光源



- 一般的光源是很难处理的，因为我们需要对于在光源面上的所有点进行光强积分



光源的颜色

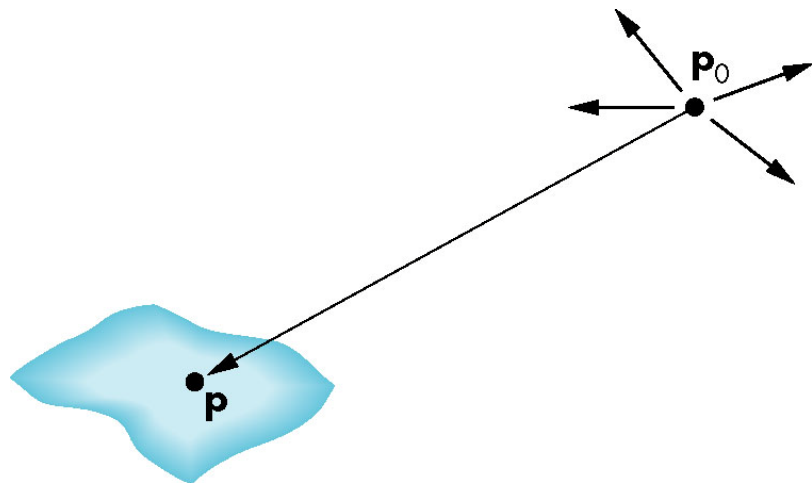


- 光源不但发射出不同量的不同频率光，而且它们的方向属性随着频率也可能不同
 - 真正的物理模型将非常复杂
- 人的视觉系统是基于三原色理论的
- 在大多数应用中，可以用三种成分—红、绿、蓝—的强度表示光源
 - 光亮度(luminance)函数为 $I = [I_r, I_g, I_b]$

点光源



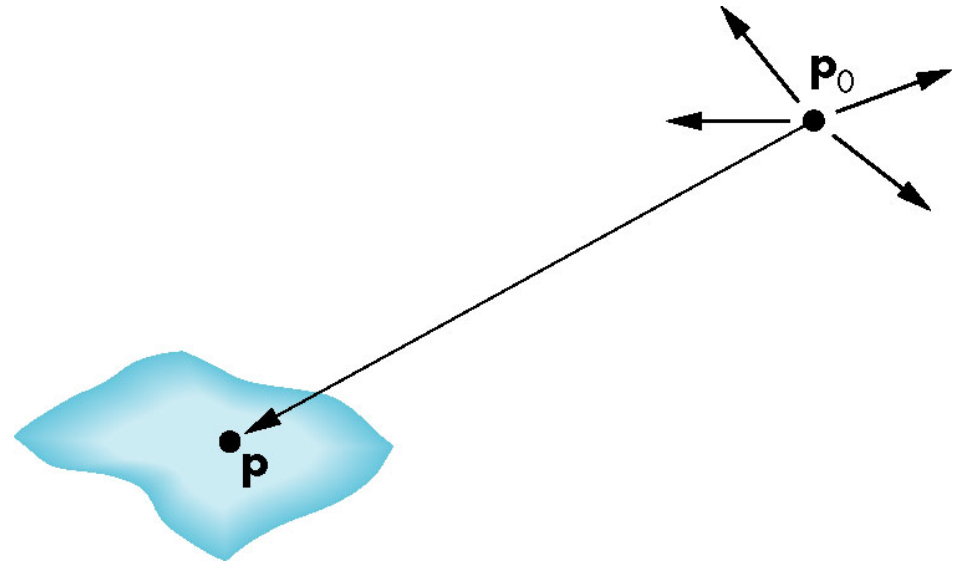
- 由位置和颜色表示
- 理想的点光源向各个方向发射光
- 远光源 即在无穷远处的光源，光线为平行线
- 点光源的亮度函数 $I(p_0) = [I_r(p_0), I_g(p_0), I_b(p_0)]$
- 在点p接受的光亮度反比于光源与点的距离



点光源的亮度



$$i(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0) = \frac{1}{|\mathbf{p} - \mathbf{p}_0|} I(\mathbf{p}_0)$$



点光源的应用

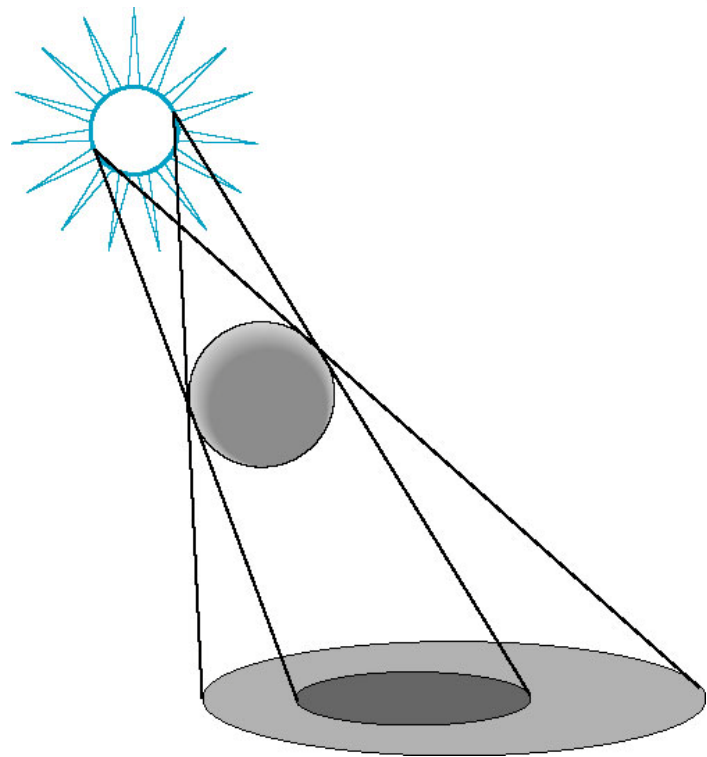


- 在计算机图形学中大量应用点光源，是因为它易于使用
- 但不能很好地反映物理现实
 - 只有点光源的场景得到的图像中对比度比较高；对象显得要么很亮，要么很暗
 - 而真实的光源由于尺寸较大，因此场景的结果比较柔和

真实光照



- 完全在阴影中的区域称为本影 (umbra)
- 部分在阴影中的区域称为半影 (penumbra)
- 可以在点光源中加入环境光降低高对比度的问题

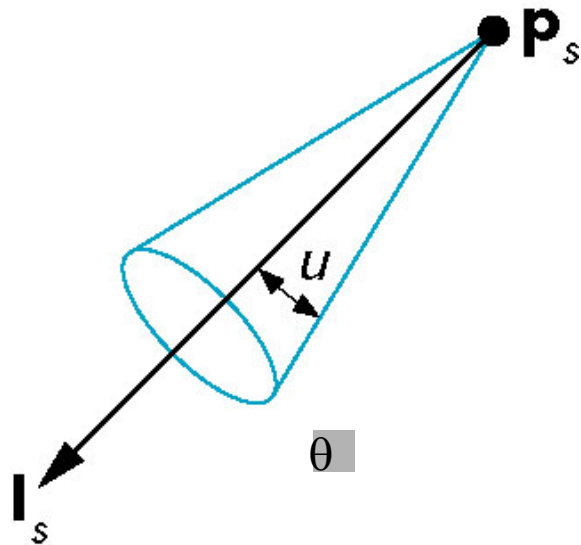


聚光灯 (spotlight)



■ 具有一个比较的窄的照明范围，通常为圆锥形半无穷区域

- 可以给点光源加上一定的限制得到
- 锥的顶点在 P_s ，而中心轴方向为 l_s 。
- 如果 $\theta = 180^\circ$ ，聚光灯成为点光源

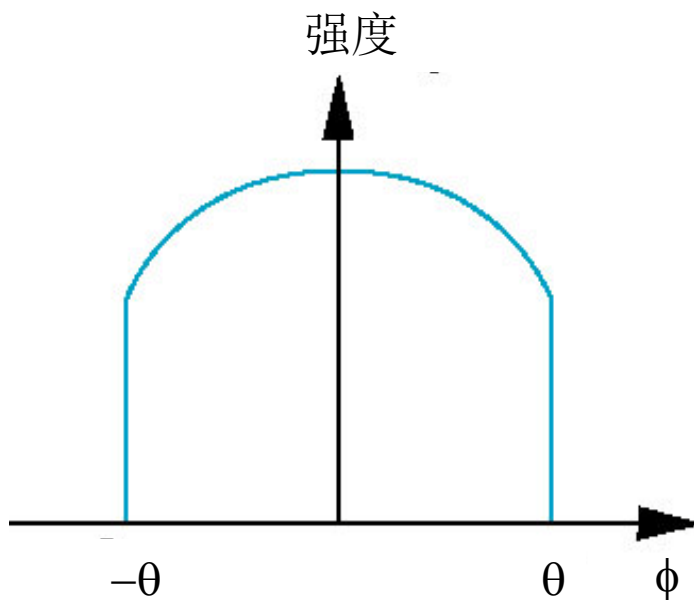


更真实的聚光灯



■ 光亮度在照明锥内具有一定的分布

- 通常绝大多数光集中在照明锥的中心
- 因此照明强度是向量 s 与中心轴夹角 ϕ 的函数



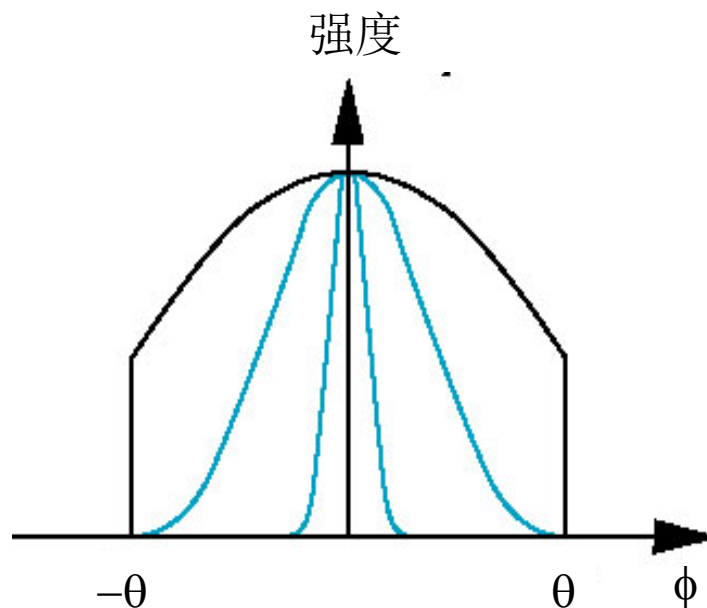
聚光灯的照明强度函数



■ 可以采用各种方式定义强度函数

■ 通常定义为 $\cos^e \phi$

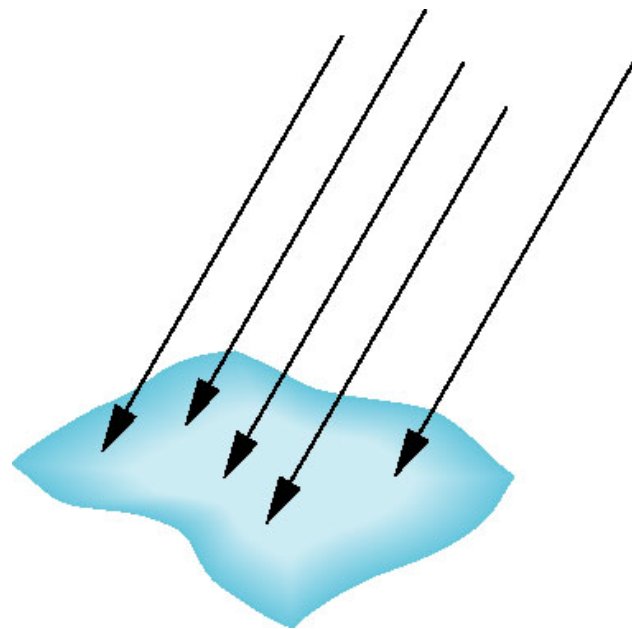
- 指数 e 确定光强度衰减的快慢
- 之所以采用余弦函数，是因为在这种情况下，非常容易计算出来它的值： $\cos \phi = s \cdot l$.



日光—无穷远光源



- 在光照计算中需要计算从光源到当前点的向量
 - 入射方向为上述向量的相反向量，而且需要单位化
- 如果光源在无穷远，该向量为常数
 - 太阳光是无穷远光源的典型代表



- 在场景中每个地方都具有相同的强度
- 严格意义上说，环境光也是来自于某个光源，但由于在光照计算中进行了某些简化，需要用环境光来模拟多次反射后的效果
- 环境光强是由 $I_a = [I_{ar}, I_{ag}, I_{ab}]$ 确定的，在每点的值完全相同

光线与材料的相互作用

- 照射在对象上的光线部分被吸收，部分被反射
- 如果对象是透明的，有些光被折射
- 反射部分的多少确定对象的颜色与亮度
 - 对象表面在白光上看起来是红的，就是因为光线中的红色分量被反射，而其它分量被吸收
- 反射光被反射的方式是由表面的光滑程度和定向确定的

对象表面

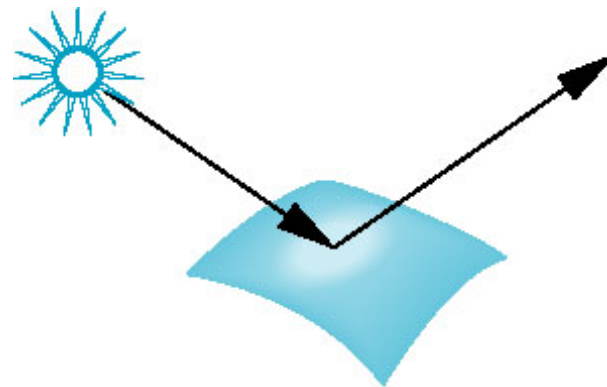


- 如果对象表面光滑，对象显得明亮；如果表面粗糙，那么就显得暗淡
- 表面有三种类型
 - 镜面 (specular surfaces)
 - 漫反射面 (diffuse surfaces)
 - 透明面 (translucent surfaces)

镜面



- 表面显得明亮，因为绝大多数光集中在严格镜面反射方向的周围
- 镜子是真正的镜面模型

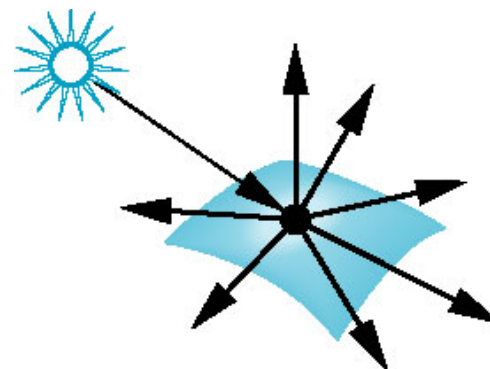


光滑表面

漫反射面



- 特征是反射光向各个方向进入空间
- 例如：涂有不光滑油漆的墙面

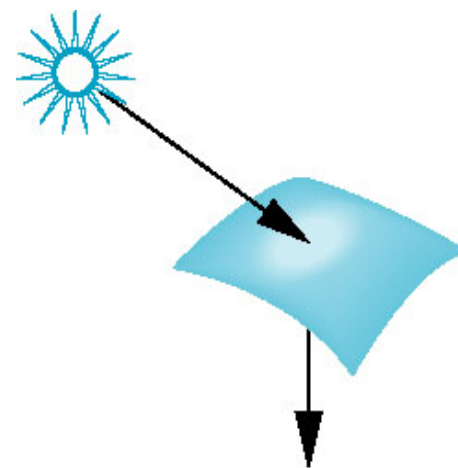


粗糙表面

透明面



- 有些光可以进入表面，从对象的另一处出来
- 例如：玻璃与水中的折射
- 这时也会有部分光被反射



透明面

三种情形的表面

- 在三维场景中的每个对象的表面可以是上述三种情形中的任一种，也可以是其中两种或三种的综合
- 每种情形所占的比例由对象表面的性态确定

理想反射



■ 法向由局部定向确定

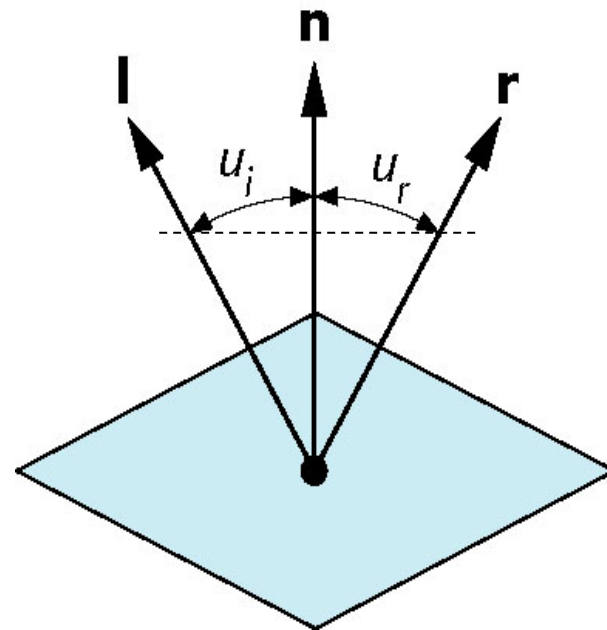
- 单位化 $|n| = 1$

■ 入射角 = 反射角

- $\theta_i = \theta_r$

■ 三个向量 l, n, r 必须共面

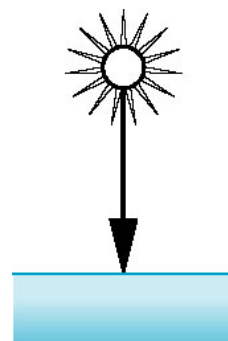
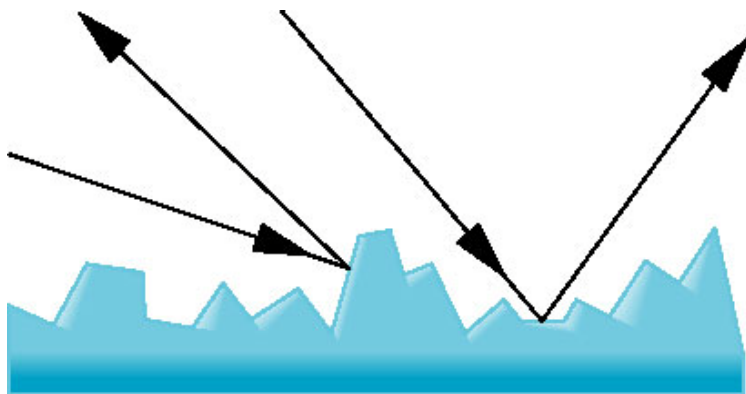
- 均为单位向量



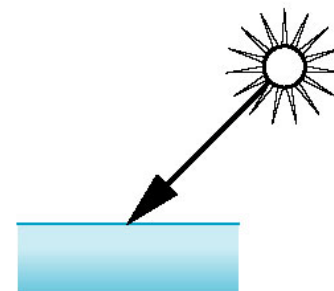
$$r = 2(l \cdot n)n - l$$

Lambertian 曲面

- 真正的漫反射
- 光向各个方向均匀地反射
- 模拟粗糙表面



(a)



(b)

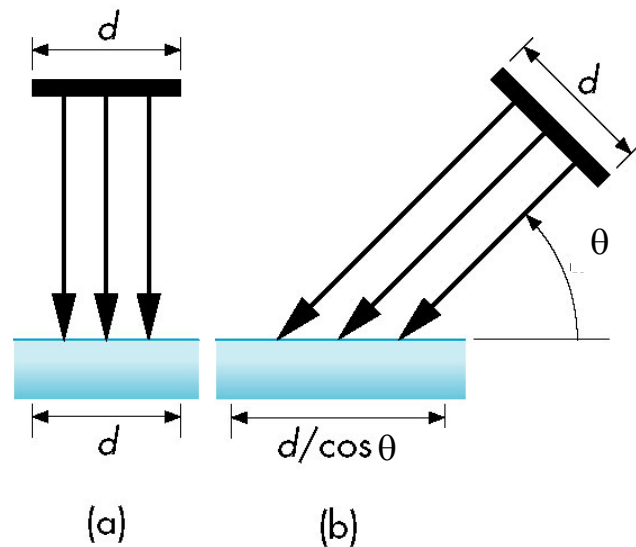
漫反射光强



■ 反射光的比例正比于入射光的竖直分量

- 即反射光 $\sim \cos\theta_i$
- 如果向量为单位向量，则
 $\cos\theta_i = \mathbf{l} \cdot \mathbf{n}$
- 存在三个系数 k_r, k_b, k_g 分别相应于每种颜色的光反射的比例
- 对每种光，反射光强

$$I_d = k I_l \cos\theta_i$$



特点



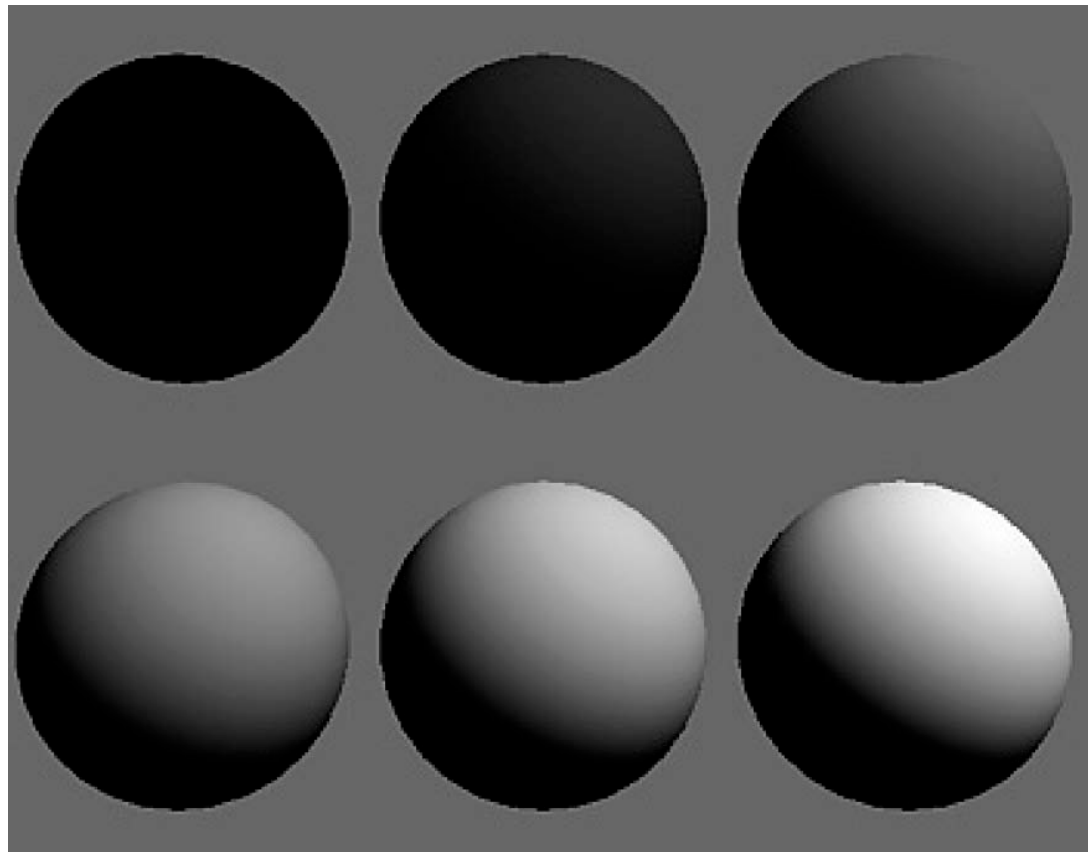
- 粗糙表面之所以可见，主要是来自于表面的漫反射
- 基于简单Lambertian漫反射模型所生成的对象图形显得比较暗淡
 - 因为此时相当于假定在视点处有一个点光源，那些光源无法直接照到的地方显得较黑
 - 在真实的场景中，对象也接受到其它对象反射过来的光

漫反射参数的影响



漫反射系数依次为
0.0, 0.2, 0.4, 0.6,
0.8, 1.0

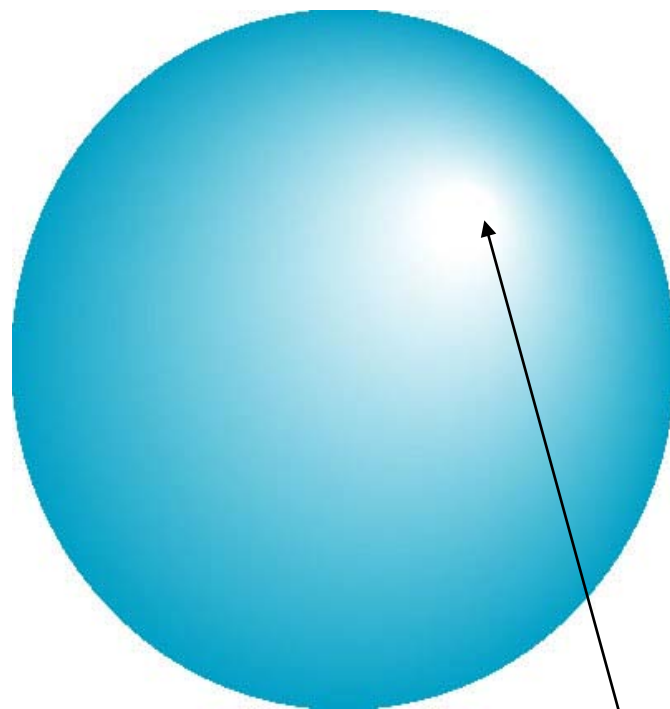
光强为1.0, 背景光强
为0.4



镜面光



- 大多数曲面既不是理想的漫反射型曲面，也不是真正的镜面（理想反射）
- 光滑表面之所以显出镜面高光，是因为入射光被反射后，绝大多数集中在反射方向周围



镜面高光

镜面光的模型



n : 法向量

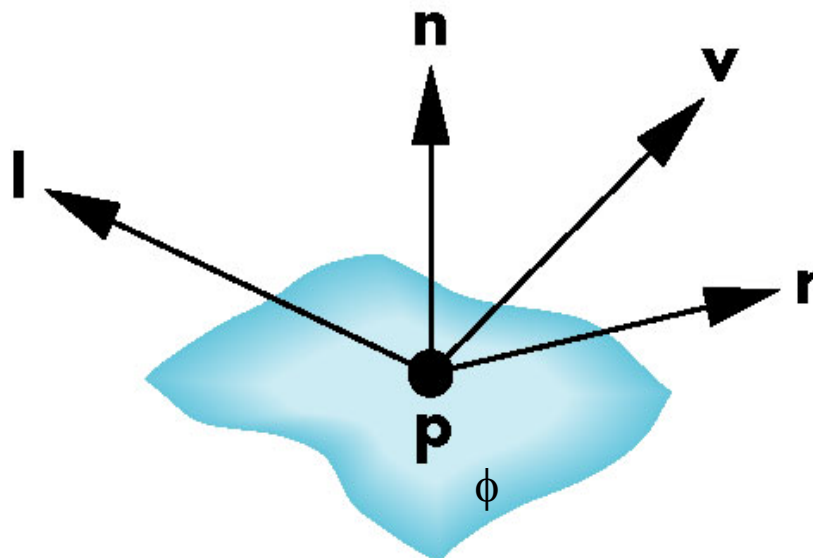
l : 入射光方向

r : 反射方向

v : 视点方向

ϕ : r 与 v 的夹角

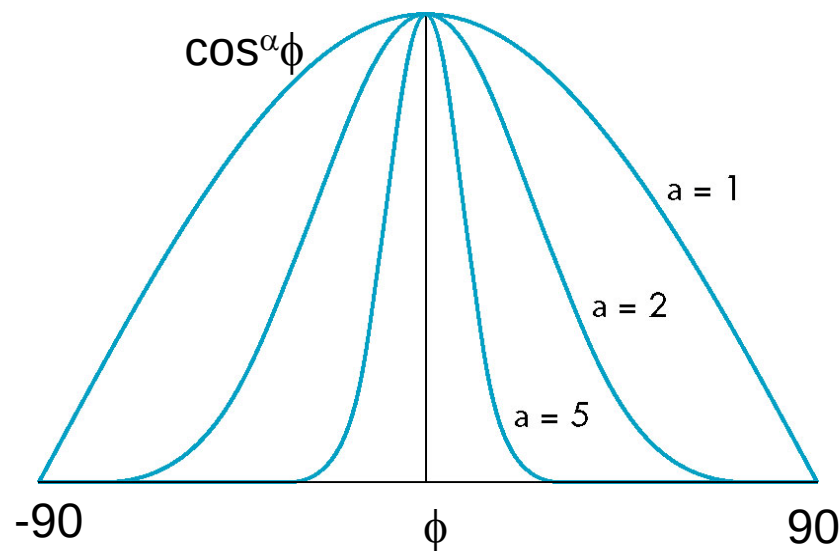
$$I_r = k_s I \cos^\alpha \phi$$



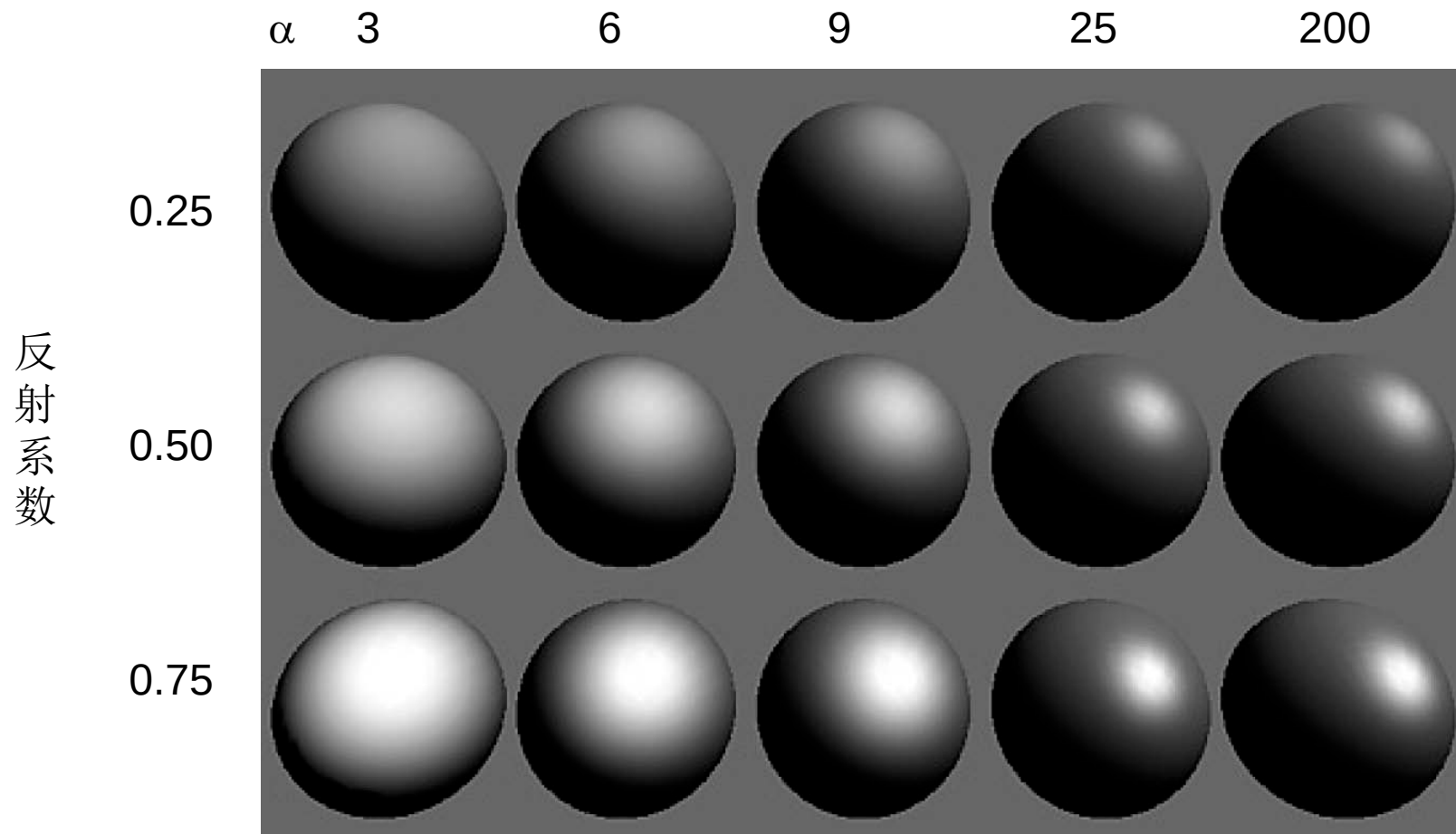
明亮系数



- 如果 α 的值介于100到200之间，那么对应于金属材料
- 如果 α 的值介于5到10之间，材料类似于塑料

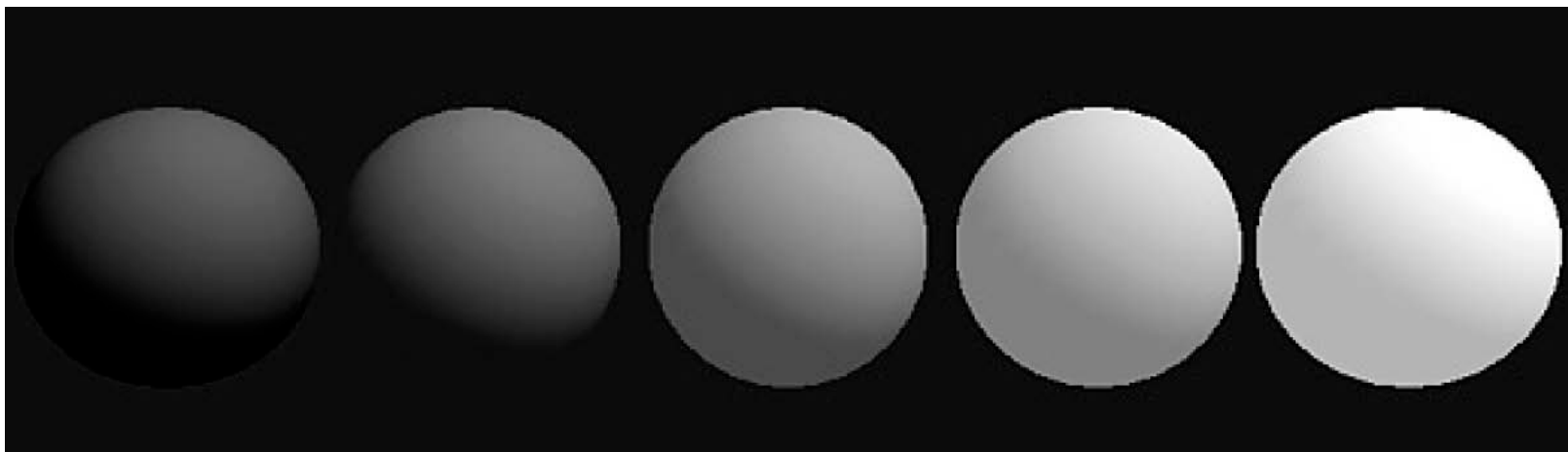


镜面反射参数的影响



- 环境光是由于在场景中光源与对象间的多次反射而导致的
- 环境光的量与颜色依赖于光源的颜色和对象的材料属性
- 向漫反射和镜面项中添加上 $k_a I_a$ 项
 - k_a : 反射系数
 - I_a : 环境光强

环境光的影响



向漫反射光中加入不同的环境光的效果

两种光强都是1.0, 漫反射系数为0.04

环境光反射系数依次为0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7

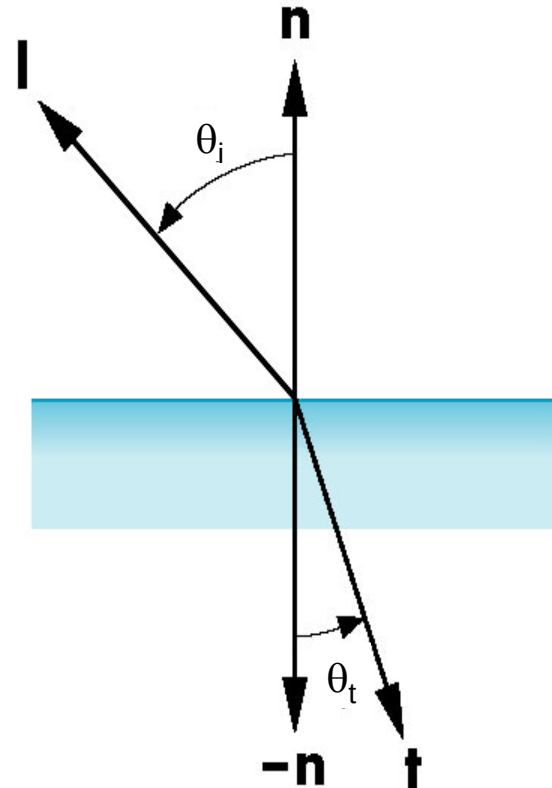
折射光



■ Snell定律

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{\eta_t}{\eta_i}$$

η_t, η_i 分别表示两种物质的折射系数



折射方向



■ 令 $\eta = \eta_t / \eta_i$, 则

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \frac{1}{\eta^2} (1 - \cos^2 \theta_i)}$$

$$\mathbf{t} = -\frac{1}{\eta} \mathbf{l} - \left(\cos \theta_t - \frac{1}{\eta} \cos \theta_i \right) \mathbf{n}$$

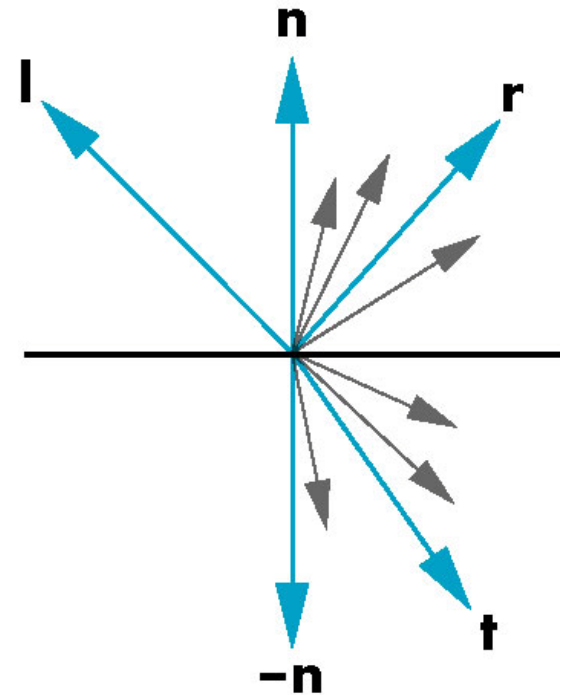
常见材料的折射率

真空	1	空气	1.0003
水	1.33	酒精	1.36
冕牌玻璃	1.52	石英	1.54
无色玻璃	1.65	红宝石	1.77
钻石	2.42		

多种光的综合



- 在简单光照模型中，漫反射光、镜面光和折射光同时并存
- 即使在折射光中也有一部分光类似于漫反射光向各个方向发射



距离项



- 从点光源到达对象表面的光强反比于两者之间距离的平方
- 向漫反射项和镜面项中添加形式为 $1/(a + bd + cd^2)$ 的因子，其中d表示距离
- 常数与线性项软化点光源的效果

- 在光照模型中，把每个光源的结果叠加在一起
- 每个光源具有不同的漫反射、镜面和环境光项，从而充分发挥各自最大的弹性，虽然这种处理没有任何物理上的理由
- 对三原色中每种分量单独处理
- 因此每个点光源有九个系数
 - 分别相应于三色光的三种反射系数

■ 材料属性与光源属性完全匹配

- 九个吸收系数 k_{dr} , k_{dg} , k_{db} , k_{sr} , k_{sg} , k_{sb} , k_{ar} , k_{ag} , k_{ab}
- 明亮系数 α

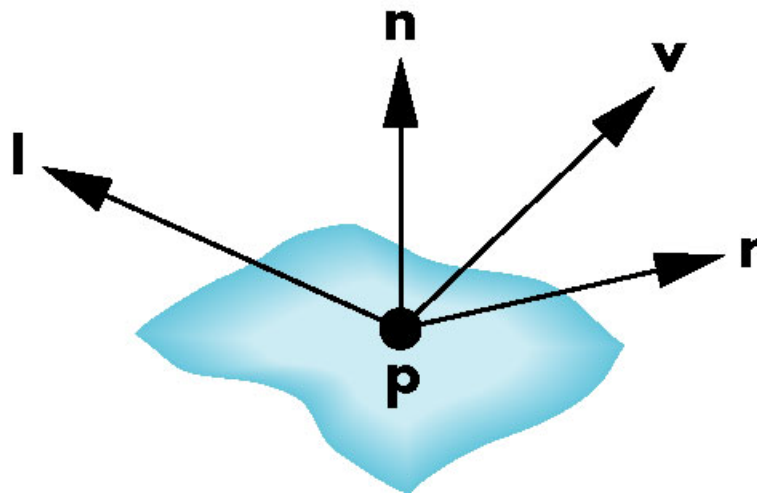
把各种分量叠加在一起



对每个光源和每种颜色成分的光，光照模型可以表示为(没有距离项)

$$I = k_d I_d l \cdot n + k_s I_s (v \cdot r)^\alpha + k_a I_a$$

对每个颜色分量，把所有来源的值加在一起



把各种分量叠加在一起



- 对每个光源和每种颜色成分的光，光照模型可以表示为（没有距离项）

$$I = k_d I_d \mathbf{l} \cdot \mathbf{n} + k_s I_s (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha + k_a I_a$$

- 对每个颜色分量，把所有来源的值加在一起

Phong模型的修正



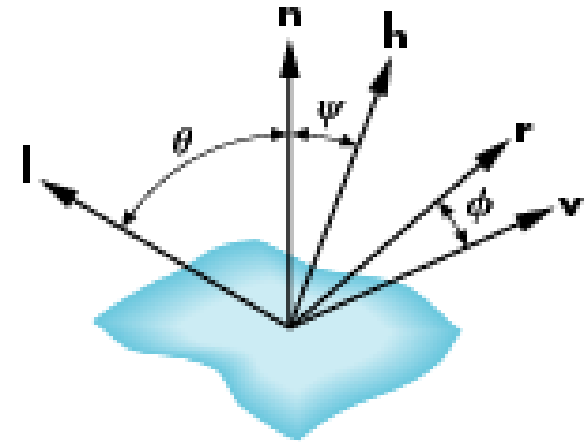
- 在Phong模型中，镜面光项有一个问题，因为它需要为每个顶点计算一个新的反射向量和视点向量
- Blinn利用中分 (halfway) 向量给出了一个近似，从而使得效果更高

中分向量



- h 是 l 和 v 的平分单位向量，即

$$h = (l+v)/|l+v|$$



中分角的应用



- 用 $(n \cdot h)^\beta$ 代替 $(v \cdot r)^\alpha$
 - 参数 β 恰当选取，以匹配明亮度
- 注意：中分角就是 r 和 v 的平分角
- 由此得到的模型称为修正的Phong模型或者Blinn光照模型
 - 在OpenGL标准中定义

向量的计算

- l 和 v 由应用程序指定
- 可以从 l 和 n 计算 r
- 问题就剩下如何确定 n
- 对于简单曲面, n 可以被确定。但确定的方式要根据曲面的表示有所不同
- OpenGL把法向量的计算留给应用程序
 - 例外: GLU中的二次曲面和Bézier曲面

法向计算

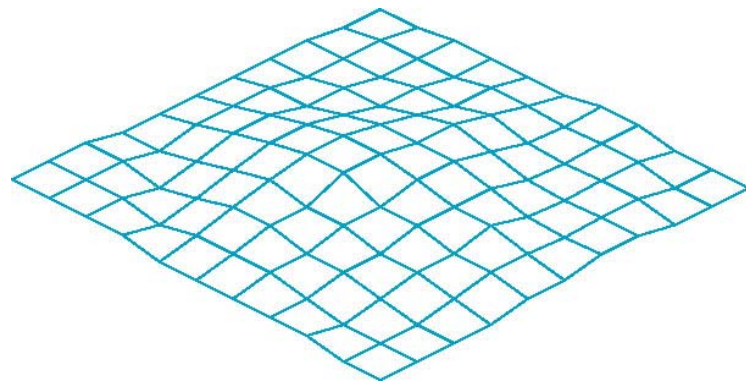


- 当给定一组光源以及视点的位置，并可以计算出法向量，那么根据前面的模型可以计算出每点的颜色
- 但是在每点计算法向量是相当费时的工作
- 绝大多数模型是用多边形网格构成的，那么法向的计算可以大大节省

多边形网格



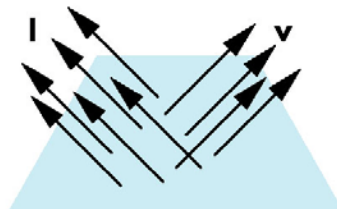
- 在多边形网格中每个多边形为平面，那么存在唯一的法向量
- 这样存在三种明暗处理的方法
 - 平坦处理
 - Gouraud方法(插值方法)
 - Phong方法



平坦方法

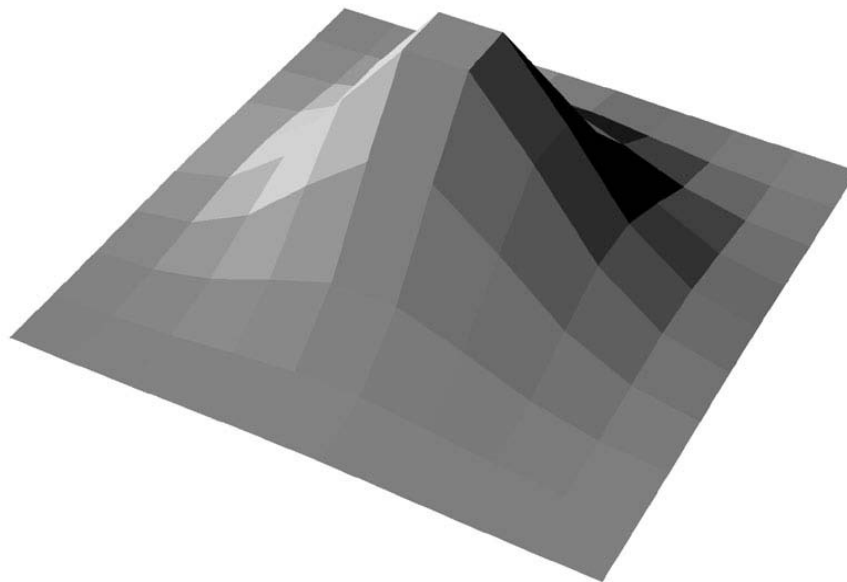


- 在同一多边形上法向为常向量
- 视点在无穷远，视点方向 v 是常向量
- 光源在无穷远，入射方向 l 也是常向量
- 从而对于每个多边形，只需要计算其上一点的颜色，其它点的颜色与它相同



■ 网格中每个多边形的颜色不同

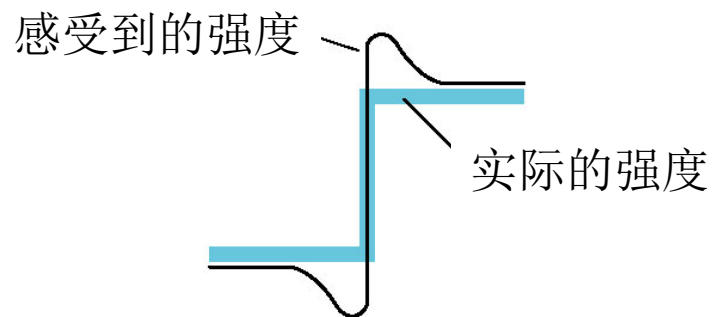
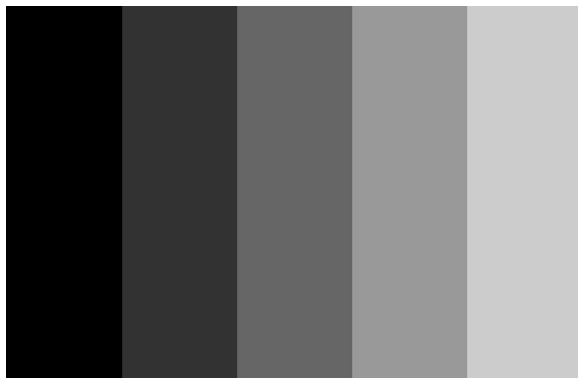
- 如果多边形网格表示的是一个光滑曲面，那么这种效果显然是不令人满意的



人类视觉系统



- 人类视觉系统对光强的变化非常敏感
 - 称为lateral inhibition性质
- 观察到下图边界上的条状效果，称为Mach带
- 没有办法避免这种情形，只有给出更光滑的明暗处理方法



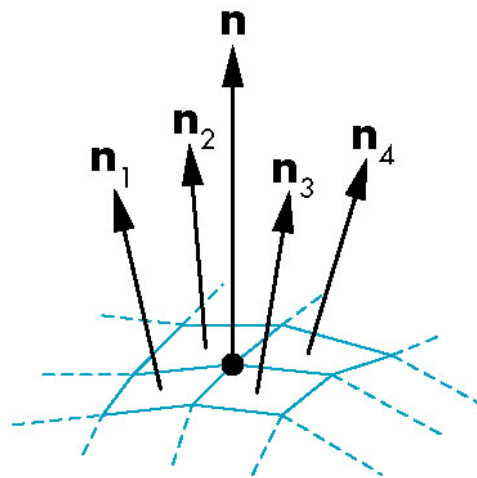
Gouraud 方法



- 在网格中每个顶点处有几个多边形交于该点，每个多边形有一个法向，取这几个法向的平均得到该点的法向

$$n = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}{|n_1 + n_2 + n_3 + n_4|}$$

- 然后利用简单光照模型计算出顶点的颜色
- 对于多边形内的点，采用线性插值确定颜色

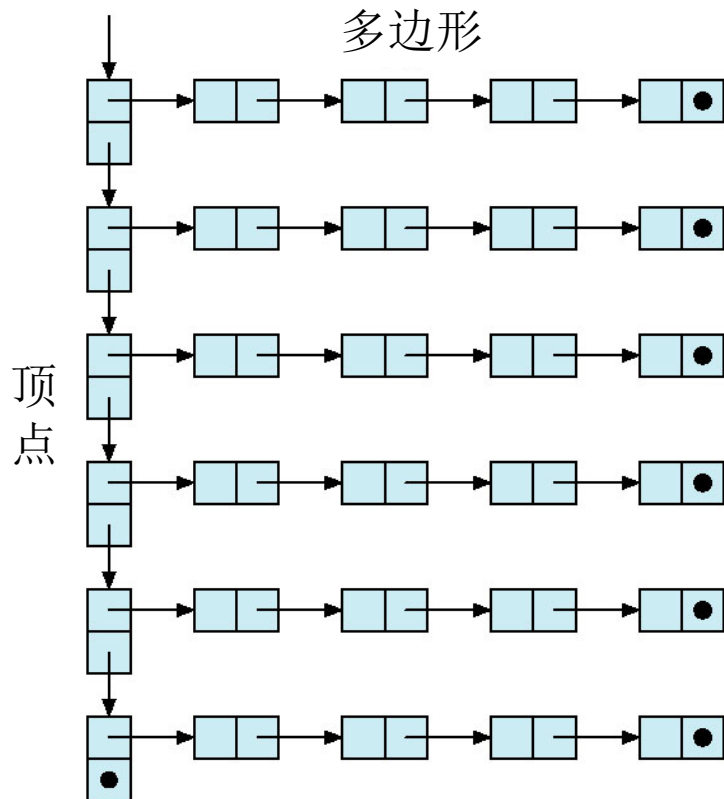


如何确定法向?



■ 如何找出与某个顶点相邻的各多边形?

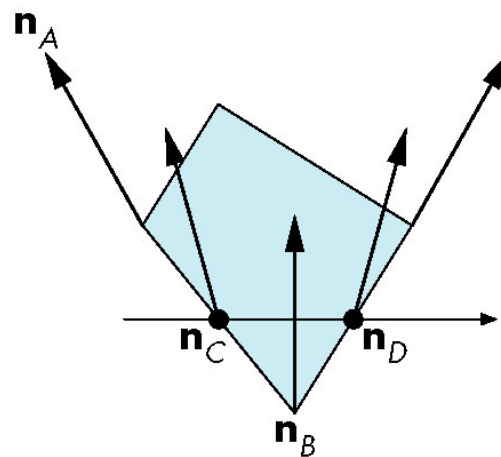
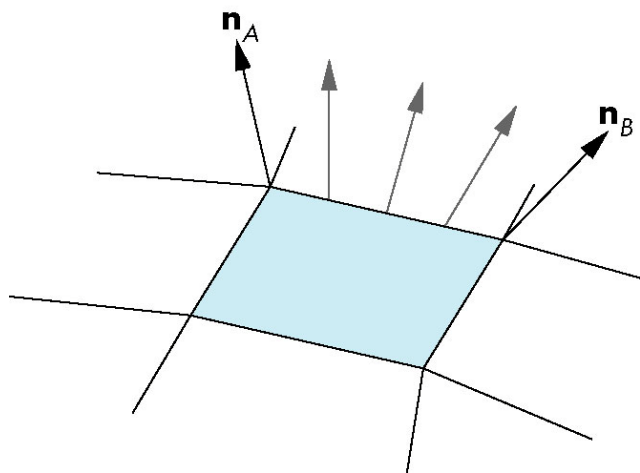
- 如果程序中只是列出各顶点，那么没有信息找到上述多边形
- 如右所示数据结果却可以做到这一点



Phong方法



- 与Gouraud方法不同，Phong方法是根据每个顶点的法向，插值出多边形内部各点的法向，然后基于光照模型计算出各点的颜色

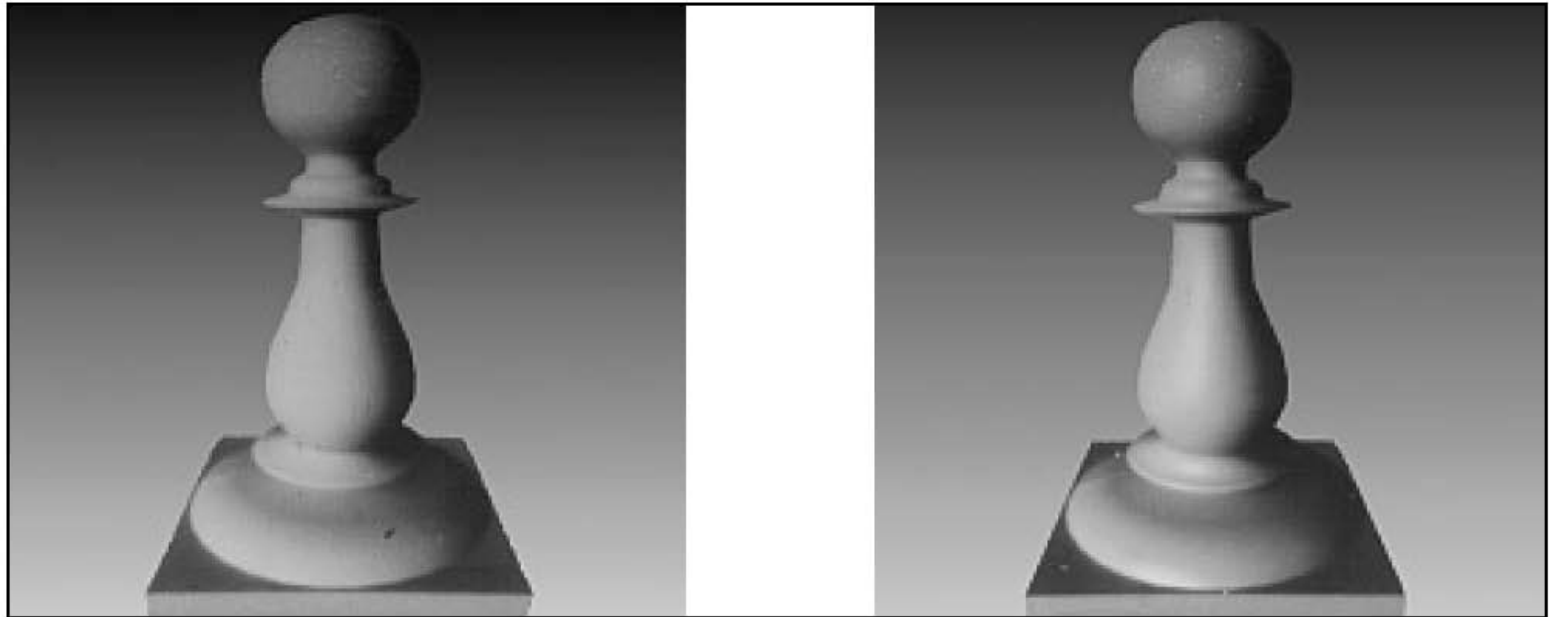


特点



- 通常会有效地降低Mach带效应
- 得到的图形比应用Gouraud方法的结果更光滑
- 但是由于法向的计算还是很复杂，一般无法得到实时图形
 - 所花费时间通常是Gouraud方法的6到8倍
- OpenGL实现的是Gouraud方法

Gouraud v.s. Phong



比较

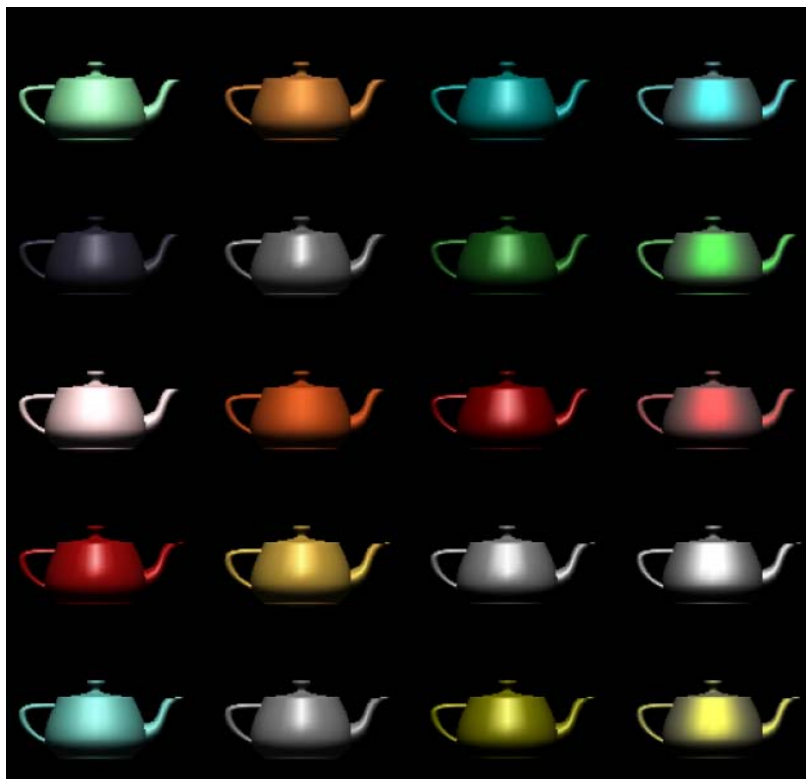


- 如果用多边形网格逼近大曲率曲面，Phong方法的结果可能看起来光滑一些，而Gouraud方法就会使边有些明显
- Phong方法比Gouraud方法的复杂度高
 - 直到最近，在实时系统中还不可用
 - 目前可以用片段处理器实现
- 两种方法都需要特定数据结构表示网格，从而可以获得顶点法向量

示例



- 这些茶壶的差别就在于光照模型中参数



Thanks for your attention!

