

计算机图形学

Computer Graphics

第八讲 光照模型与明暗处理

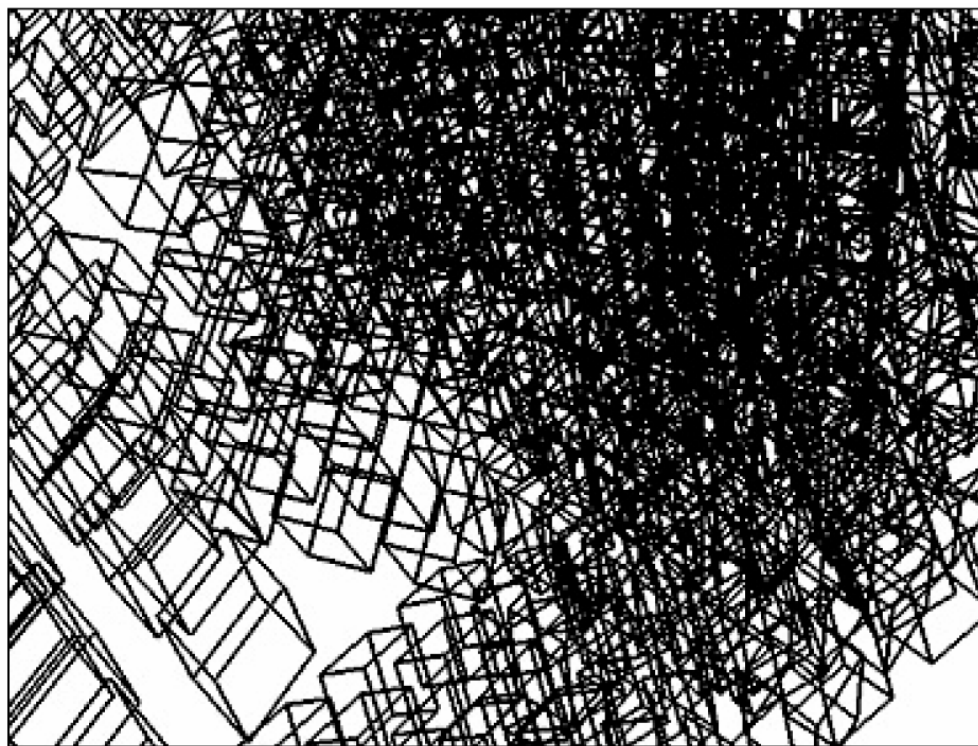
福州大学数计学院 软件工程系 陈昱

大纲

- 学习如何对物体进行明暗着色使得它们的图像显示出三维的效果
- 介绍光与材质相互作用
- 建立一个简单的、可以用于图像硬件实时处理的经验反射模型
 - Phong 模型
- 多边形的明暗着色方法

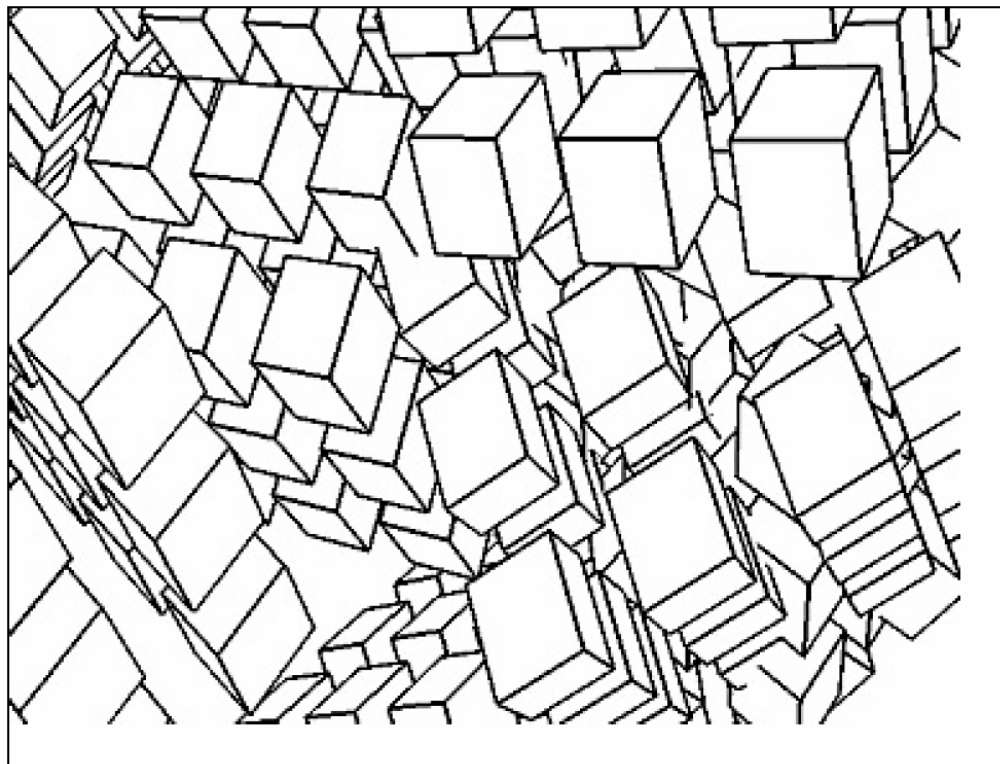
多边形网格模型

- 正如在第 6 讲所述，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

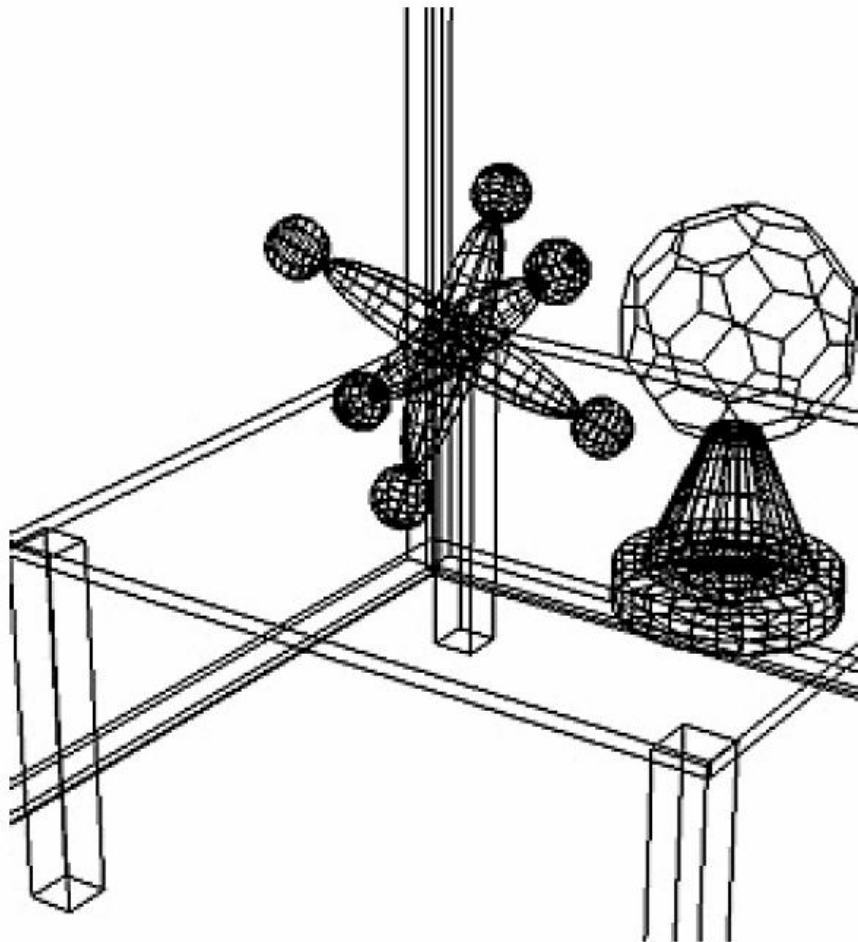
- 使多边形网格显得真实的第一种方法是隐藏面消除。该算法将在课本第八章中介绍
- 右图显示的是前一页场景经隐藏面消除后的结果
- 但结果仍然显得粗糙



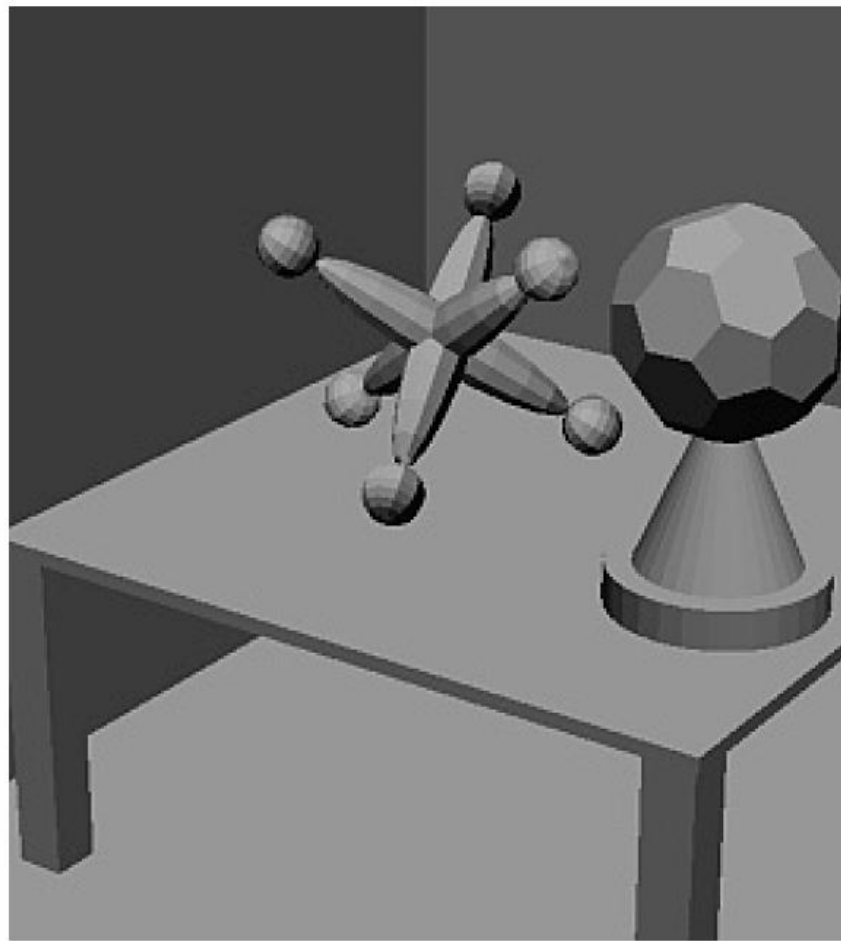
模拟光照

- 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



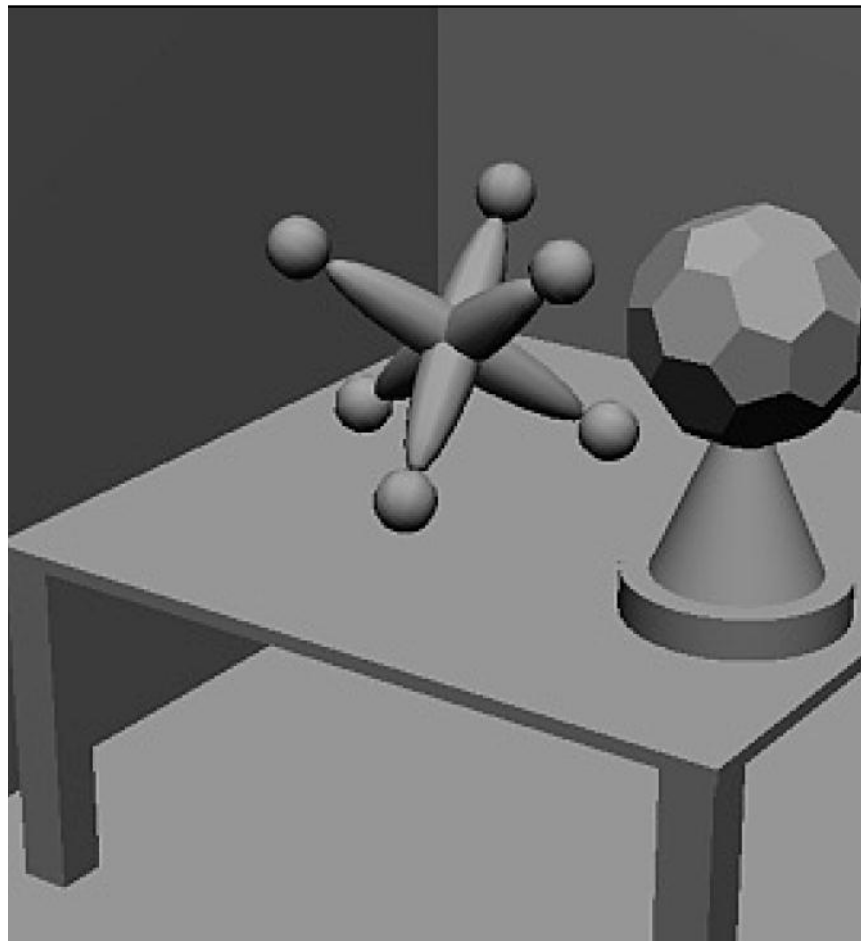
- 线框模型



经过了简单光照处理和隐藏面消除

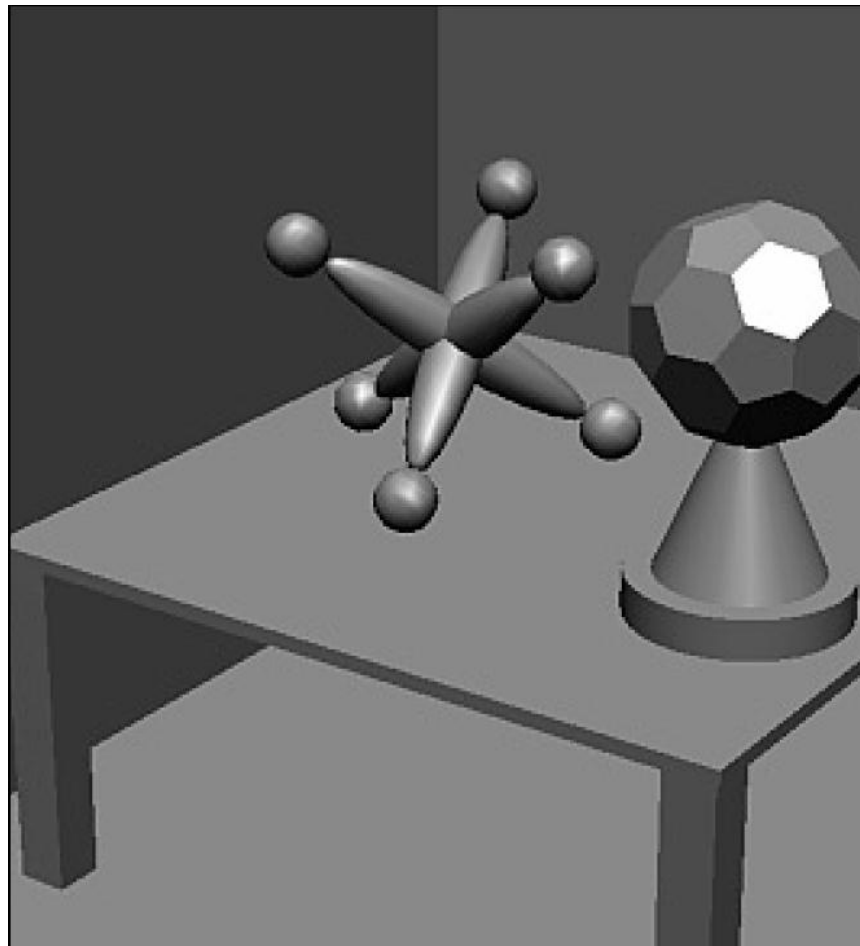
光滑明暗处理

- 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



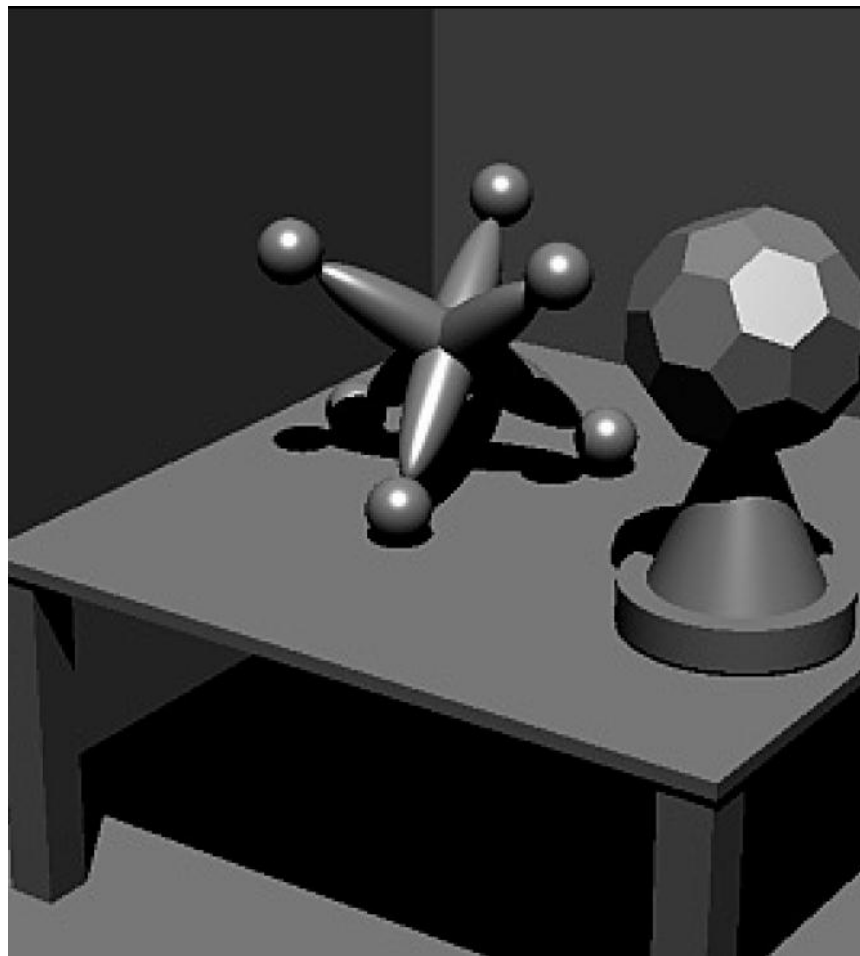
镜面光

- 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



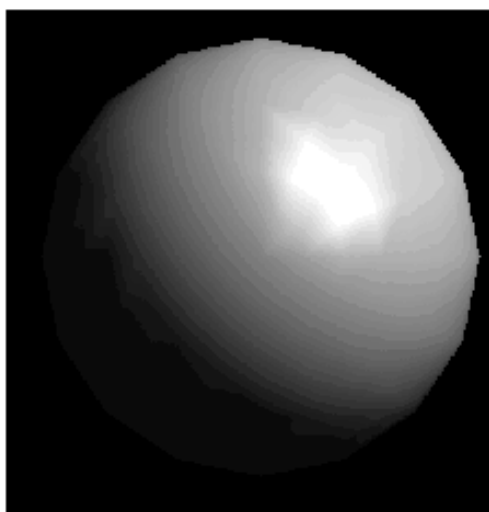
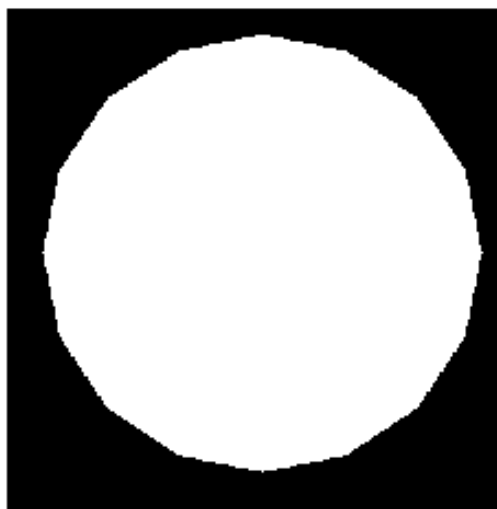
纹理映射

- 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



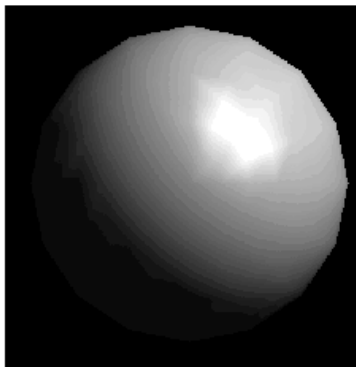
为什么我们需要光照和明暗处理

- 假设我们用许多多边形和 glColor 定义的颜色建立一个球的模型。我们得到的东西类似于左下图
- 但我们希望得到的是



光照和明暗处理

- 为什么下面的图像看起来更像真实的球：



- 因为光与材质的相互作用导致球上每个点有不同的颜色（明暗）
- 为了仿真这样的效果，用计算机生成图像时需要考虑：
 - 光源，材质，观察者位置，表面朝向等因素

光照模型 (Illumination Model)

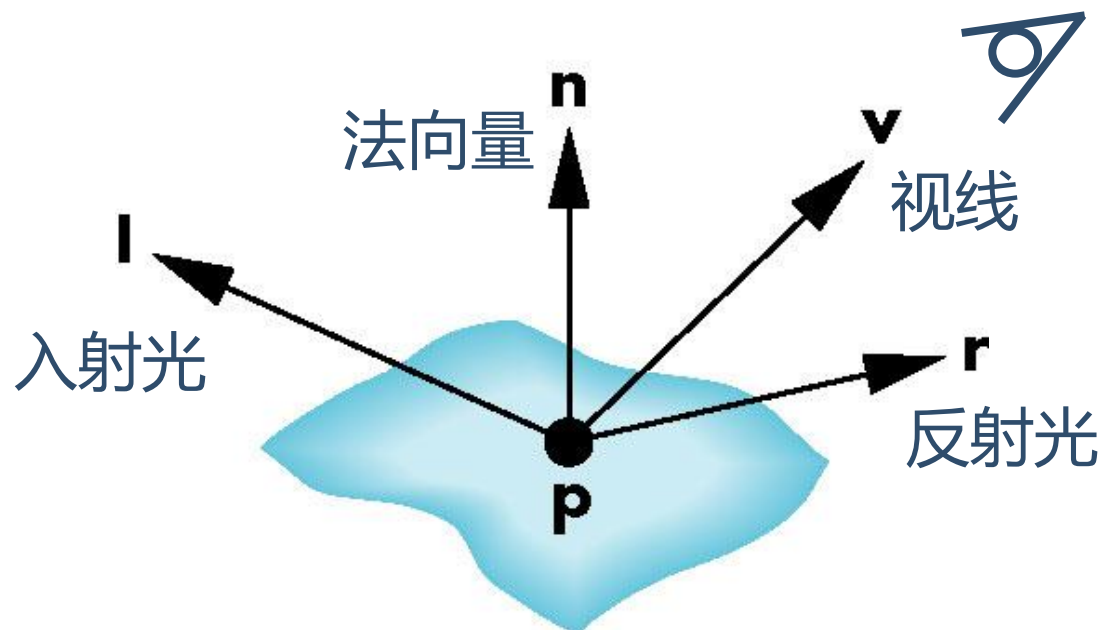
计算物体上某一点光强度的数学模型

真实感图形学早期发展

- 1967年
 - Wylie 等人第一次在显示物体时加进光照效果，认为光强与距离成反比
- 1970年
 - Bouknight 提出第一个光反射模型：Lambert 漫反射 + 环境光
- 1971年
 - Gouraud 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：入射角等于反射角，而且反射光线、入射光线与法向量在同一平面上

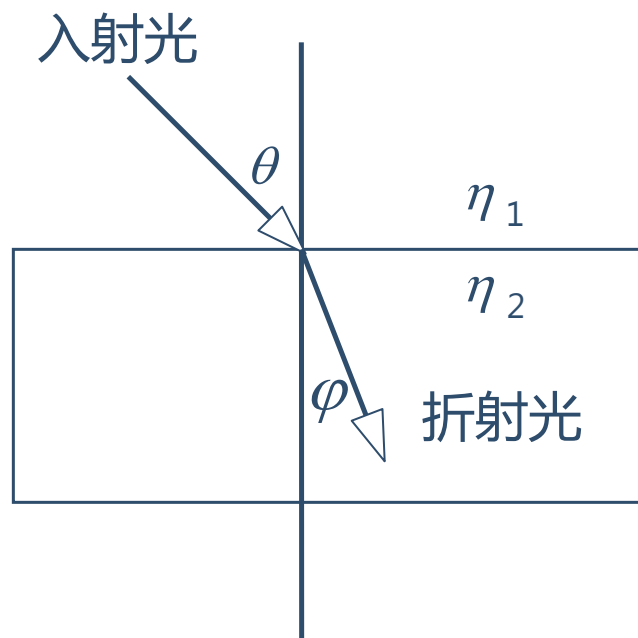


相关物理知识：折射定律

- 折射定律：折射线在入射线与法线构成的平面上，折射角与入射角满足

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

n_1 和 n_2 分别是第一种媒质和第二种媒质的折射率



相关物理知识：能量关系

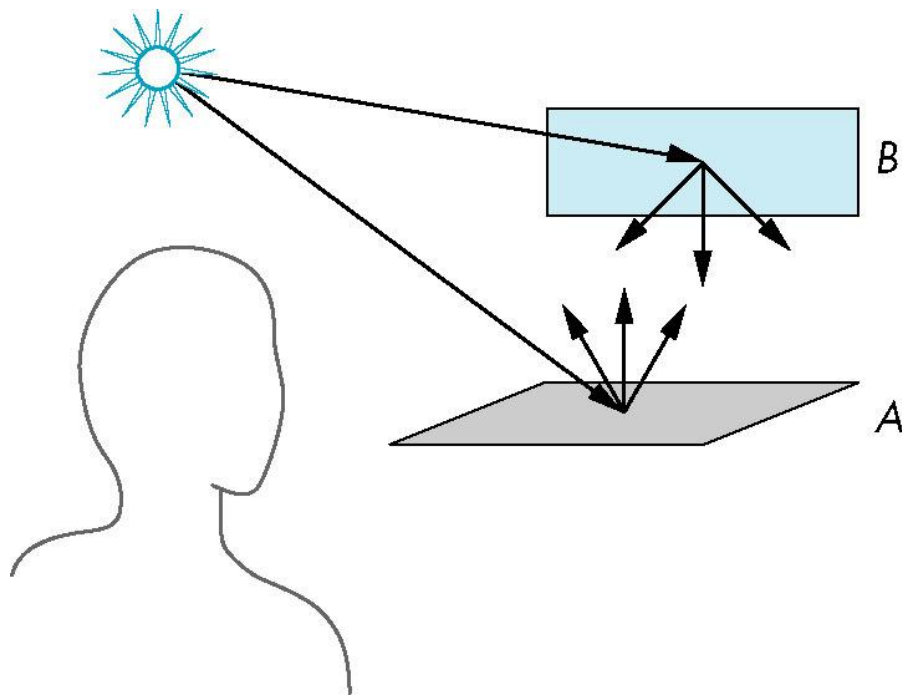
- 在光的反射和折射现象中的能量分布：

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

- 下标为 i, d, s, t, v 的能量项分别表示为入射光强，漫反射光强，镜面反射光强，透射光强，吸收光强
- 能量是守恒的

散射

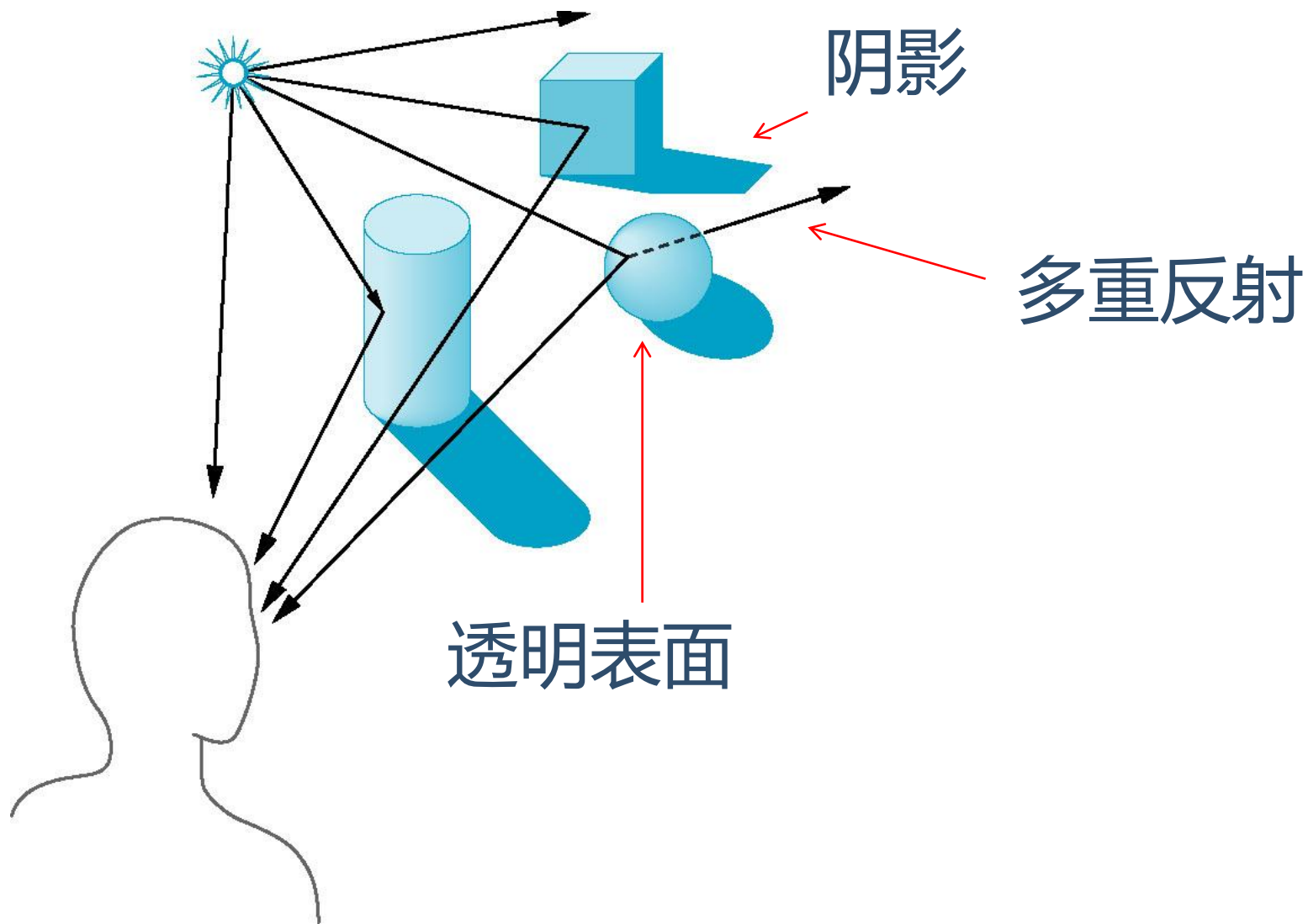
- 光照射到A点
 - 有些被反射
 - 有些被吸收
- 反射光中有些射到B点
 - 有些被反射
 - 有些被吸收
- 反射光中又有些射到A点，.....



光照方程和模型

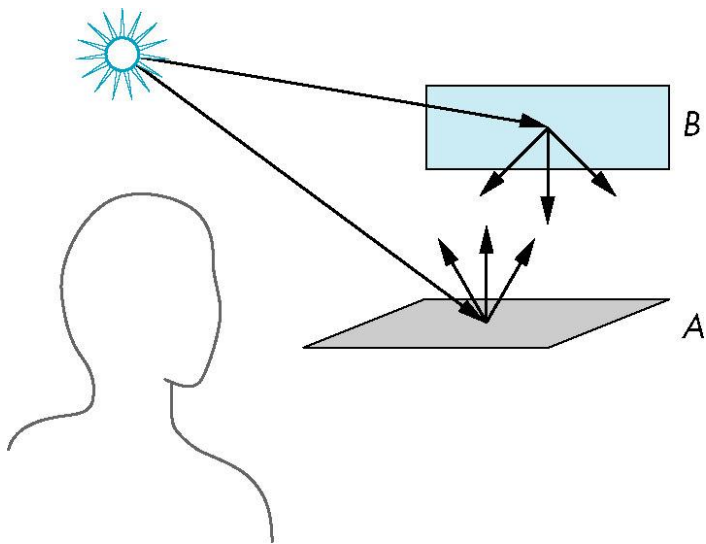
- 光照模型
 - 模拟物体表面的光照物理现象的数学模型
 - 光的无穷次反射和吸收过程可以用光照方程 (rendering equation) 描述
 - 一般是无法求解的，即使应用数值方法也是非常复杂的
- 光照方程是全局的，并且包含
 - 阴影
 - 对象间的多次反射

全局效果



全局光照模型

- 可以处理物体之间光照的相互作用的模型称为全局光照模型
 - 光线跟踪法
 - 辐射度方法



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接受的话，这种局部计算是可以接受的
 - 存在许多方法逼近全局效果

局部光照模型

- 光照射到物体表面，主要发生：
 - 反射
 - 透射（对透明物体）
 - 部分被吸收成热能
 - 反射光，透射光决定了物体所呈现的颜色
- 局部光照明模型
 - 假定物体是不透明的，只考虑光源的直接照射，而将光在物体之间的传播效果笼统地模拟为环境光

Phong 光照模型

经验上的反射模型

- 下面介绍的反射模型来自实验上的观察
- 虽然没有牢固的物理理论基础，但是仍可以产生出令人满意的图形
- 因此也被大多数的 3D 软件或函数库所支持

反射光的种类

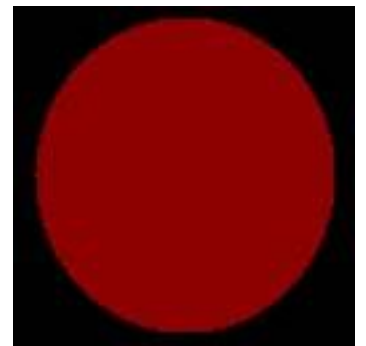
- 物体表面反射过来的光进入眼球使我们看到它的形状与颜色
- 在计算机图形学中，我们把反射光分为以下三个组成部分：
 - 环境光
 - 漫反射光
 - 镜面反射光

反射光的种类

- Ambient Reflection (环境光反射)
 - 环境光线所产生的反射光
- Diffuse Reflection (漫反射)
 - 由光源直接照射所产生的反射光，这类的反射光会朝四面八方散射出去
- Specular Reflection (镜面反射)
 - 由光源直接照射所产生的反射光。若物体表面光滑，反射光比较集中，会使得位于反射方向的观察者看到发亮的区域

环境光

- 即使没有直接的光源，一般的环境也不会黑得伸手不见五指，多多少少还有点亮光。这种光线称为“**环境光**”（ Ambient Light ）
- 假定物体是不透明的（ 即无透射光 ），物体全方位反射环境光，所以不同方位的观察者都会接收到强度相同的环境光反射



Example: sphere

环境光

环境光：在空间中近似均匀分布，即在任何位置、任何方向上强度一样，记为 I_a

环境光反射系数 K_a ：在分布均匀的环境光照射下，不同物体表面所呈现的亮度未必相同，因为它们的环境光反射系数不同

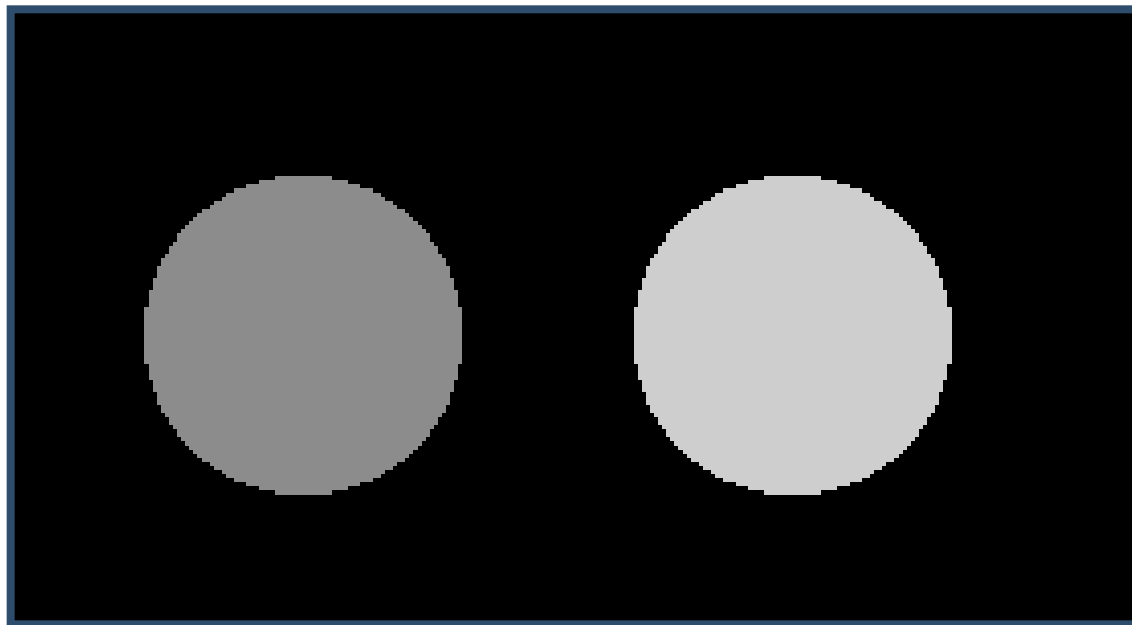
光照方程（仅含环境光）：
$$I = K_a I_a$$

I 为物体表面所呈现的亮度

环境光例子

- 具有不同环境光反射系数的两个球

$$I_a = 1.0$$

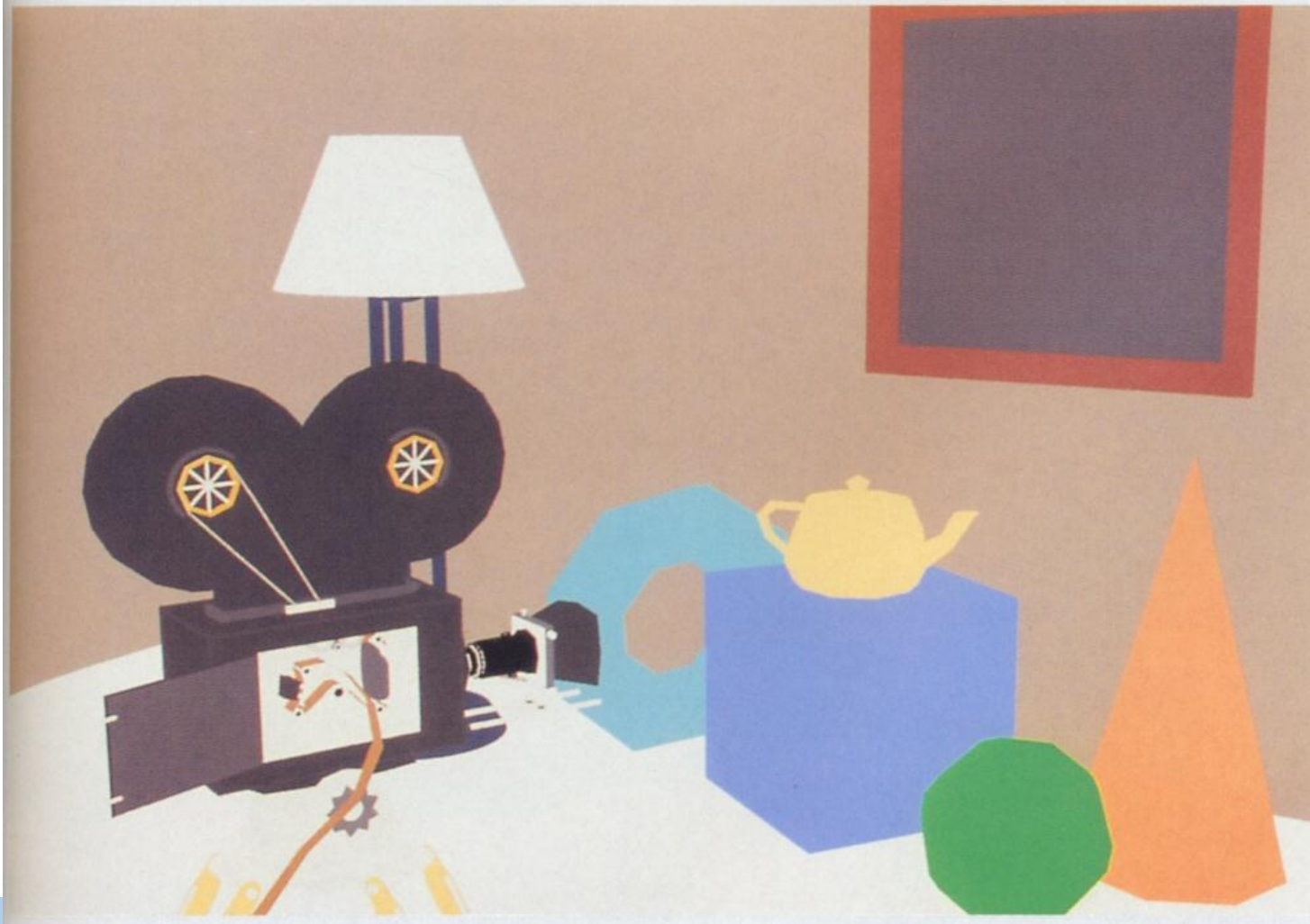


$$K_a = 0.4$$

$$K_a = 0.8$$

只有环境光渲染的场景

Plate II.28 *Shutterbug*. Visible-surface determination with ambient illumination only (Sections 14.4.1 and 16.1.1). (Copyright © 1990, Pixar. Rendered by Thomas Williams and H.B. Siegel using Pixar's PhotoRealistic RenderMan™ software.)

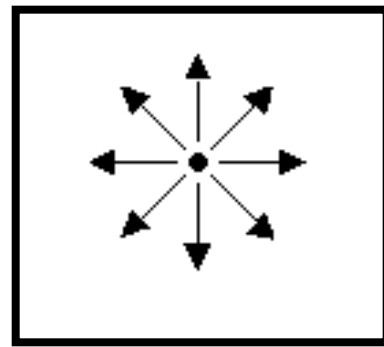


环境光的缺点

- 虽然不同的物体具有不同的亮度
- 但是同一物体的表面的亮度是一个恒定的值，没有明暗的自然过渡

改进的办法

- 考虑引入点光源
- 点光源：几何形状为一个点，位于空间中的某个位置，向周围所有的方向上辐射等强度的光，记其亮度为 I_p



- 点光源的照射：在物体的不同部分其亮度也不同，亮度的大小依赖于物体的朝向及它与点光源之间的距离

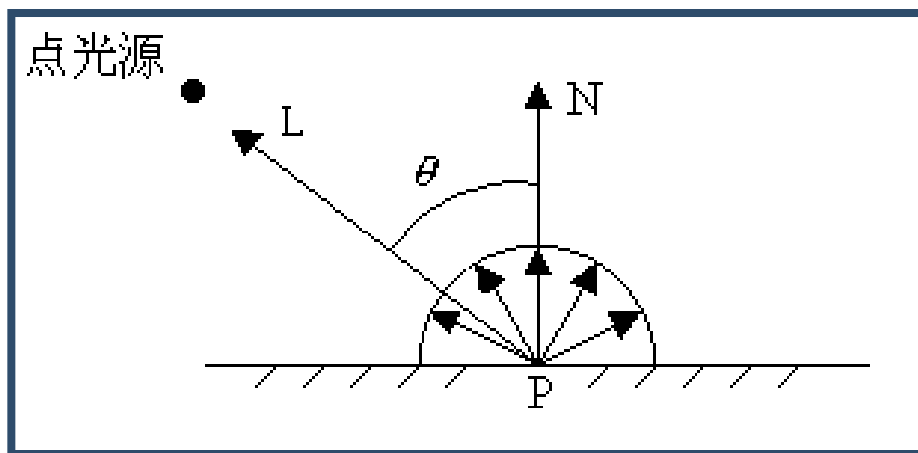
漫反射

- 漫反射

- 粗糙、无光泽物体（如粉笔）表面对光的反射
- 物体反射的光量与光线入射角的关系满足

Lambert 定律： $I = I_p K_d \cos \theta$, $0 \leq \theta \leq 90^\circ$

- I 漫反射的亮度
- I_p 点光源的亮度
- K_d 漫反射系数
- θ 入射角

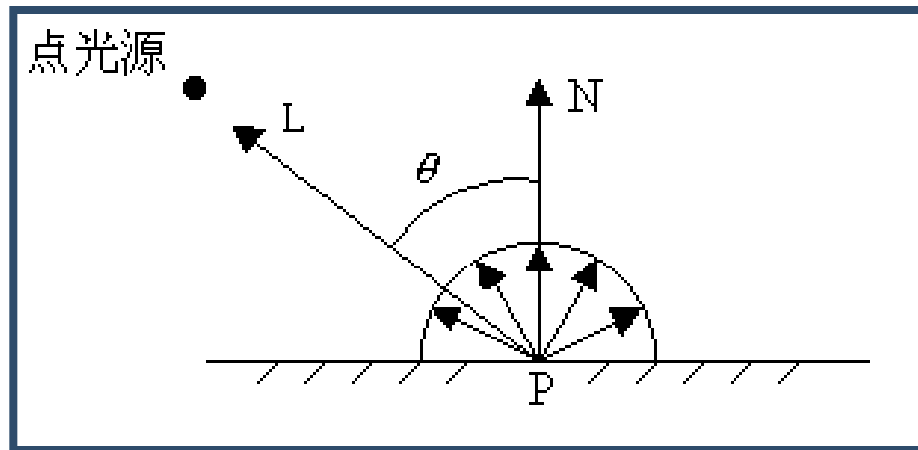


漫反射

- 漫反射光的强度只与入射角有关

$$I = I_p K_d \cos \theta, \quad 0 \leq \theta \leq 90^\circ$$

- 由上面的公式可知：入射角愈小，漫反射愈强；反之，漫反射愈弱



Lambert 反射模型

—将环境光与漫反射结合起来

- 表面粗糙的物体（如粉笔），只有环境光反射和漫反射
- 对这一类的物体，我们可以用如下的 Lambert 反射公式：

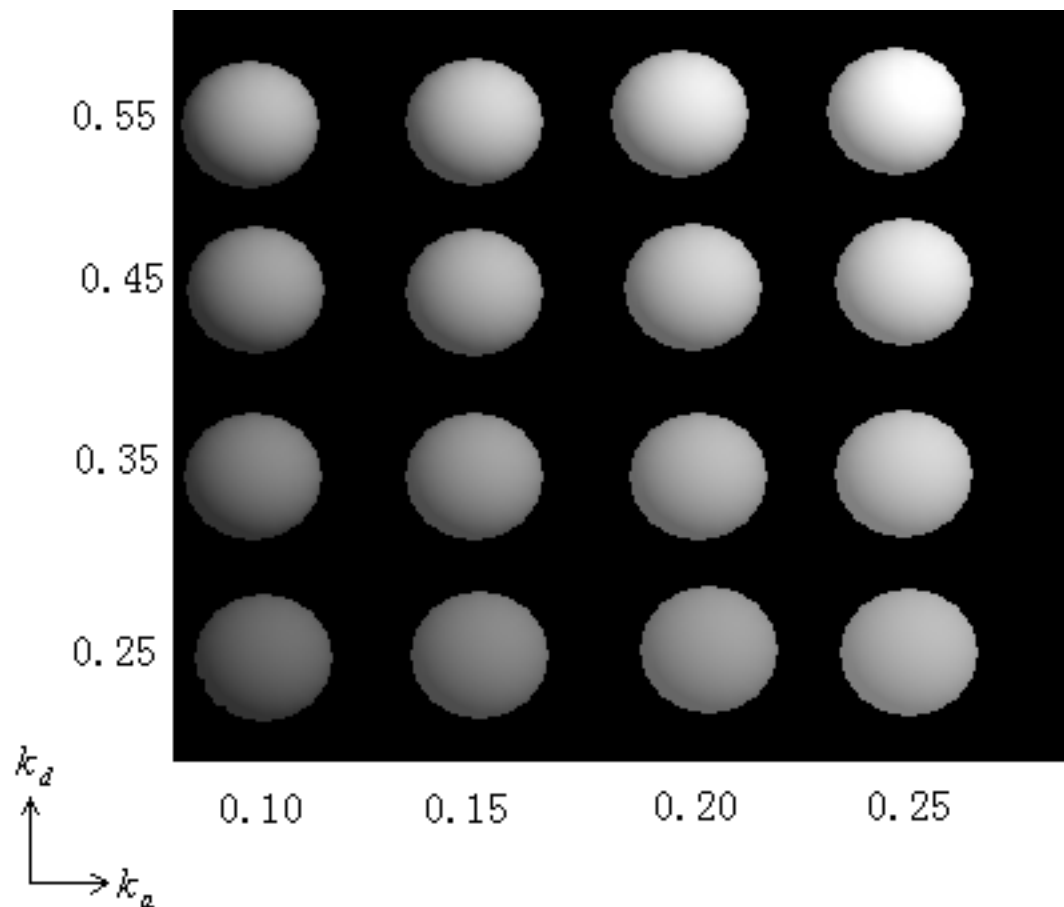
$$I = I_a K_a + I_p K_d \cos \theta, \quad 0 \leq \theta \leq 90^\circ$$

$$\cos \theta = \frac{|L \cdot N|}{|L| \times |N|} = \hat{L} \cdot \hat{N} \quad (\hat{L} = L/|L|, \hat{N} = N/|N|)$$

- 在向量上方加上符号 ^ 代表经过正规化（normalized）长度为 1 的单位向量

Lambert 反射模型的例子

- 一般取 $I_a = (0.02 \sim 0.2)I_d$

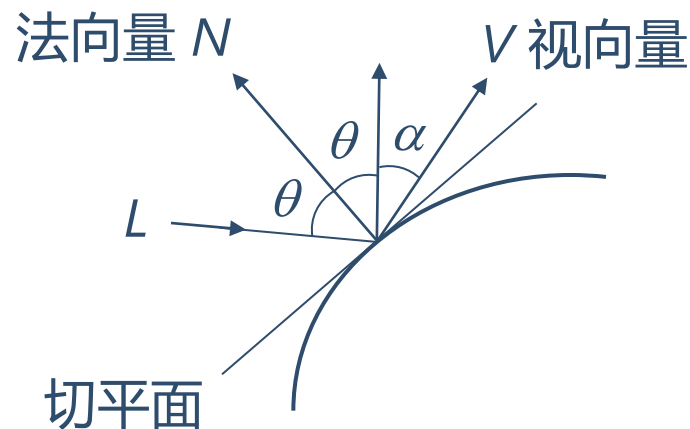
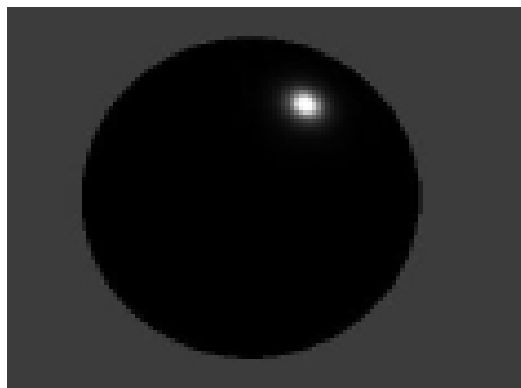


Lambert 反射模型的缺点

- 对于许多物体，使用上式计算其反射光是可行的
- 但对于大多数的物体，如擦亮的金属、光滑的塑料等是不适用的，原因是这些物体还会产生镜面发射

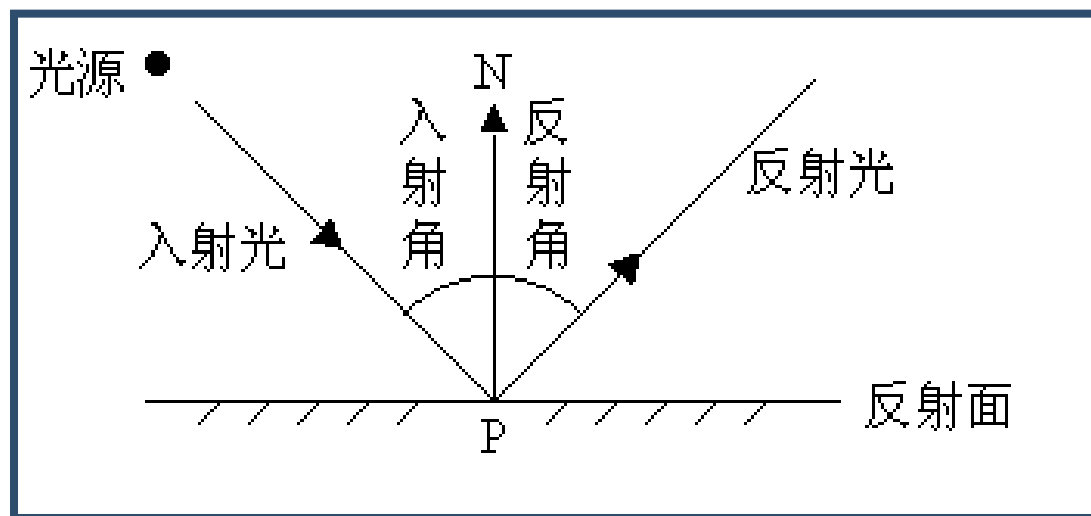
镜面反射

- 镜面反射
 - 光滑物体（如金属或塑料）表面对光的反射
- 高光 High Light
 - 入射光在光滑物体表面形成的特别亮的区域



镜面反射

- 理想镜面反射

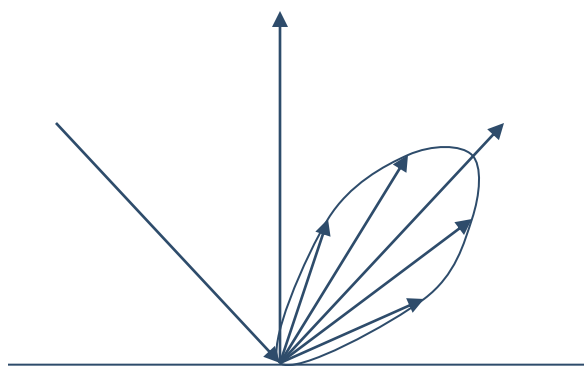


- 观察者只能在反射方向上才能看到反射光，偏离了该方向则看不到任何光

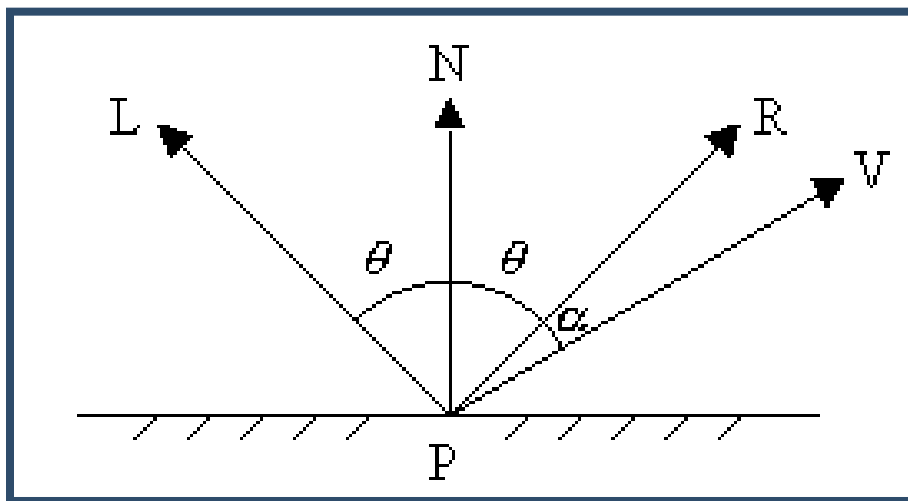
镜面反射

- 非理想镜面反射

$$I = I_p K_s \cos^n \alpha$$



光滑平面



镜面

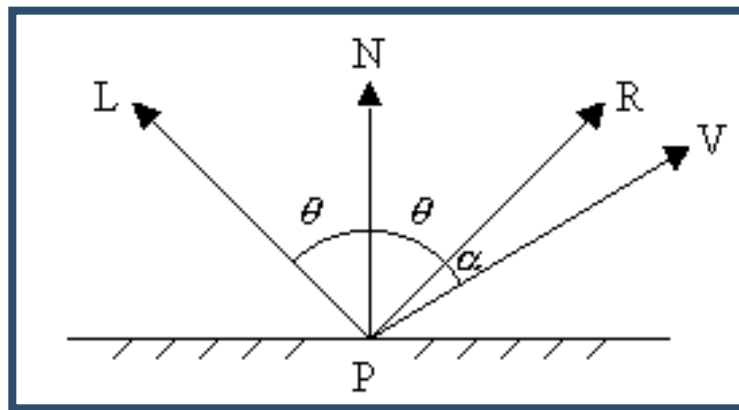
- P为物体表面上一点，L为从P指向光源的单位向量，N为单位法向量，R为反射单位向量，V为从P指向视点的单位向量

镜面反射

- 镜面反射公式

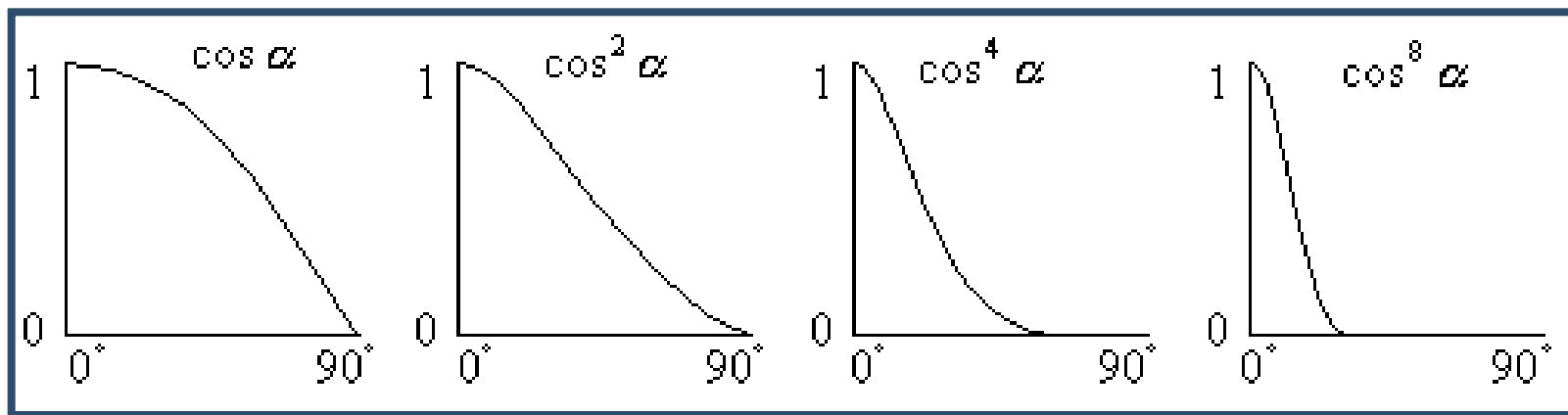
$$I_s = I_p K_s \cos^n \alpha \quad \text{或} \quad I_s = I_p K_s (V \cdot R)^n$$

- I_s 为镜面反射光强。 I_p 点光源的亮度
 - K_s 是与物体有关的镜面反射系数
 - n 为镜面反射指数, n 越大, 则 I_s 随 α 的增大衰减的越快



镜面反射

- n 的取值与表面粗糙程度有关
 - n 越大，表面越平滑（散射现象少，稍一偏离，明暗亮度急剧下降）
 - n 越小，表面越毛糙（散射现象严重）



Phong 光照模型

- Phong 局部光照模型模拟物体表面对光的反射作用，光源为点光源
- 这是由 Bui Tuong Phong 于 1975 提出的模型
- 反射作用分为
 - 物体间作用使用环境光 (Ambient Light)
 - 漫反射 (Diffuse Reflection)
 - 镜面反射 (Specular Reflection)

Phong 光照模型

- Phong 光照模型的综合表述：由物体表面上一点 P 反射到视点的光强 I 为环境光的反射光强 I_e 、理想漫反射光强 I_d 和镜面反射光 I_s 的总和。

$$I = I_e + I_d + I_s$$

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

镜面反射方向计算

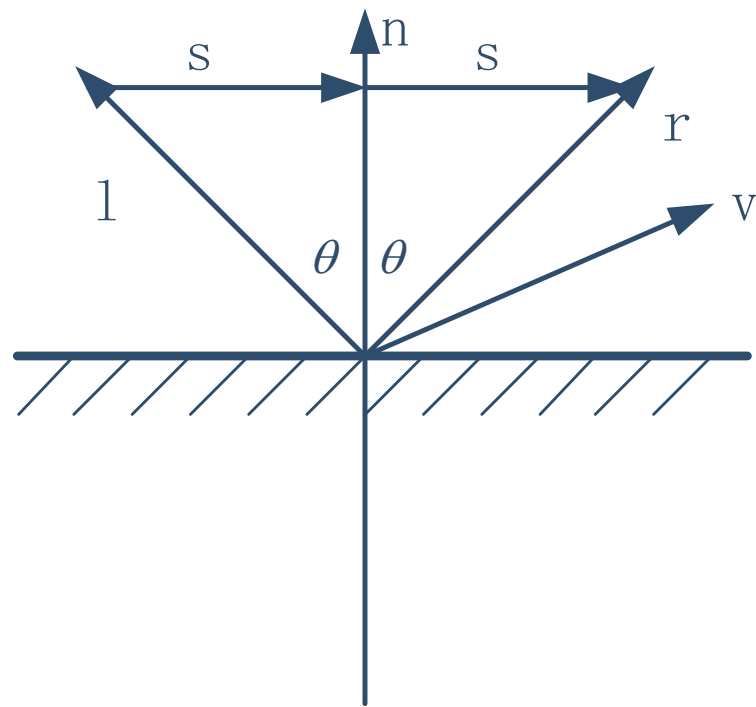
- 假定 l, n, r 都为单位向量
- l 在 n 上的投影向量为 $n \cos \theta$

则 $s + l = n \cos \theta$

- 记矢量 $s = n \cos \theta - l$

则有 $r = n \cos \theta + s$

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



Phong 光照模型的不足

- Phong 光照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
- 经验模型，Phong 模型存在不足：
 - 显示出的物体象塑料，无质感变化
 - 没有考虑物体间相互反射光
 - 镜面反射颜色与材质无关
 - 镜面反射时大入射角存在失真现象

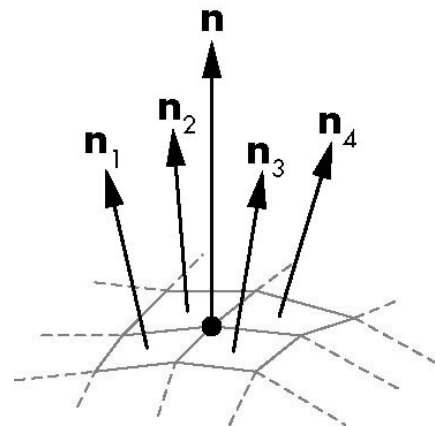
着色处理

多边形的着色方法

- 许多 3D 系统最终是用许多多边形来逼近 3D 模型（曲面物体或多面体）的形状
- 由于平面上每一点的法向量同方向，若用前述的反射模型来着色（shading），则同在一面上的点都会呈现相同的颜色与明暗
- 这使得原本平滑的模型呈现出块状不平滑的样子

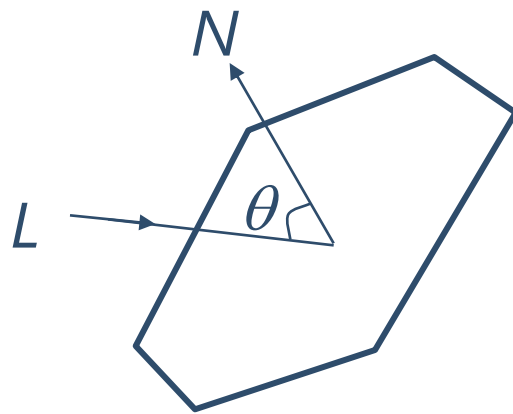
多边形的着色方法

- 此外，相邻两个多边形的法向不同，计算出来的颜色也不同，因此造成整个物体表面的颜色过渡不光滑
- 下面我们介绍几种着色的方法来处理：
 - 平面着色
 - 光滑着色，亦称插值着色
 - Gouraud 着色方法
 - Phong 着色方法



平面着色法 (Flat Shading)

- 我们取平面上的一点，用平面法向量及前述的模型公式来计算它的反射强度，然后用这个值当作平面上所有点的反射强度
- 这使得平面上每一点有相同的反射亮度与颜色



平面着色法 (Flat Shading)

- 这种着色方式适合满足下面三种条件的状况：
 - 光源离物体非常遥远，使得平面的光线入射角 θ 几乎相同。
 - 观察者也离物体非常遥远，使得视线与平面法向量的夹角在每一点上几乎相同。
 - 3D 物体模型本身就是多面体而非平滑的表面。

平面着色的场景（带漫反射）



Plate II.29 *Shutterbug*. Individually shaded polygons with diffuse reflection (Sections 14.4.2 and 16.2.3). (Copyright © 1990, Pixar. Rendered by Thomas Williams and H.B. Siegel using Pixar's PhotoRealistic RenderMan™ software.)

Gouraud 着色方法

- Gouraud 于 1971 年提出，又被称 Gouraud 明暗处理
- 基本思想：在每个多边形顶点处计算颜色，然后在各个多边形内部进行线性插值，得到多边形内部各点颜色
- 即它是一种颜色插值着色方法
- 注意：Gouraud 着色方法并不是孤立的处理单个多边形，而是将构成一个物体表面的所有多边形（多边形网格）作为一个整体来处理。

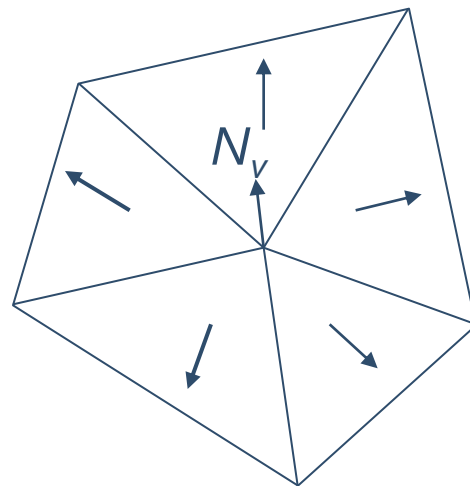
Gouraud 着色方法

- 对多边形网格中的每一个多边形，
Gouraud 着色处理分为如下四个步骤：
 - 1、计算多边形的单位法向量
 - 2、计算多边形顶点的单位法向量

顶点法向量计算

- 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

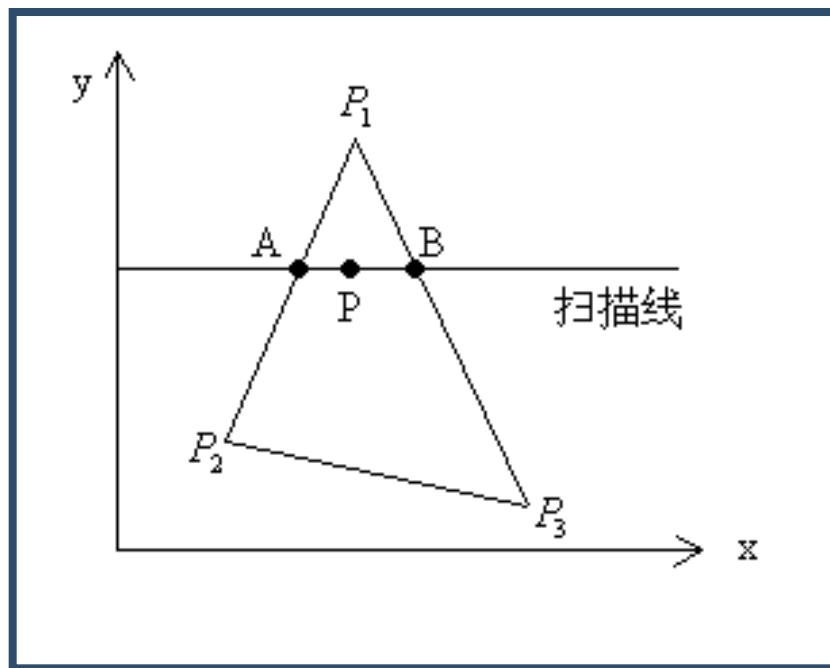
$$N_v = \sum_{i=1}^n N_i / \left| \sum_{i=1}^n N_i \right|$$



- 计算出的平均法向量一般与该多边形物体近似曲面的切平面比较接近

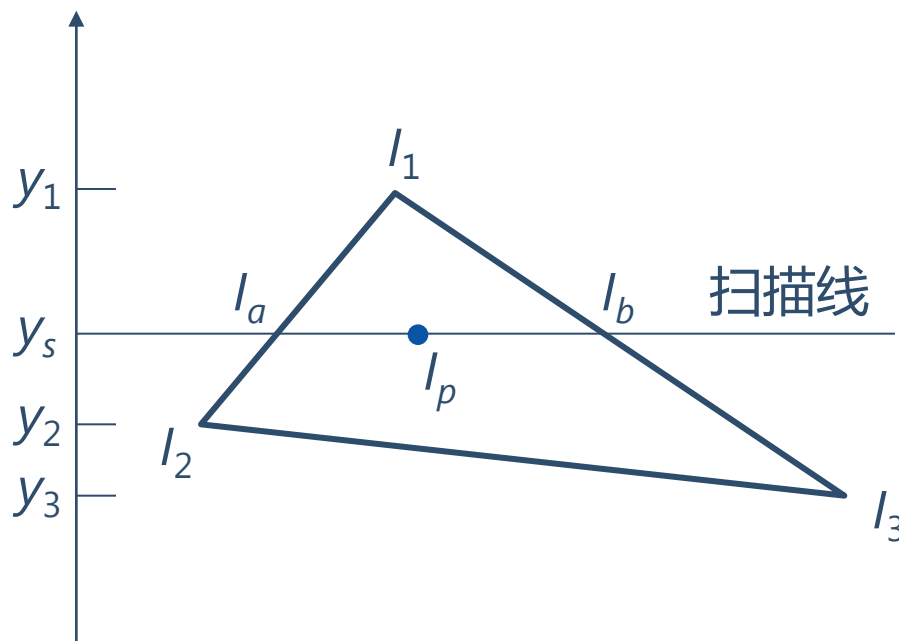
Gouraud 着色方法

- 3、利用光照方程计算顶点光强（颜色）
- 4、对多边形顶点光强（颜色）进行双线性插值，获得多边形内部各点的光强（颜色）



Gouraud 着色方法

- 我们可以用扫描线法 (scan-line method) 来计算各点的反射强度。比如, 假定下图的扫描线 $y=y_s$ 与三角形边线的交点是 a 和 b 。我们先用三个端点的反射强度以插值法计算出 I_a 与 I_b 。然后, 对任意的在三角面内部的点 p , 我们可用 I_a 与 I_b 算出 p 的反射强度



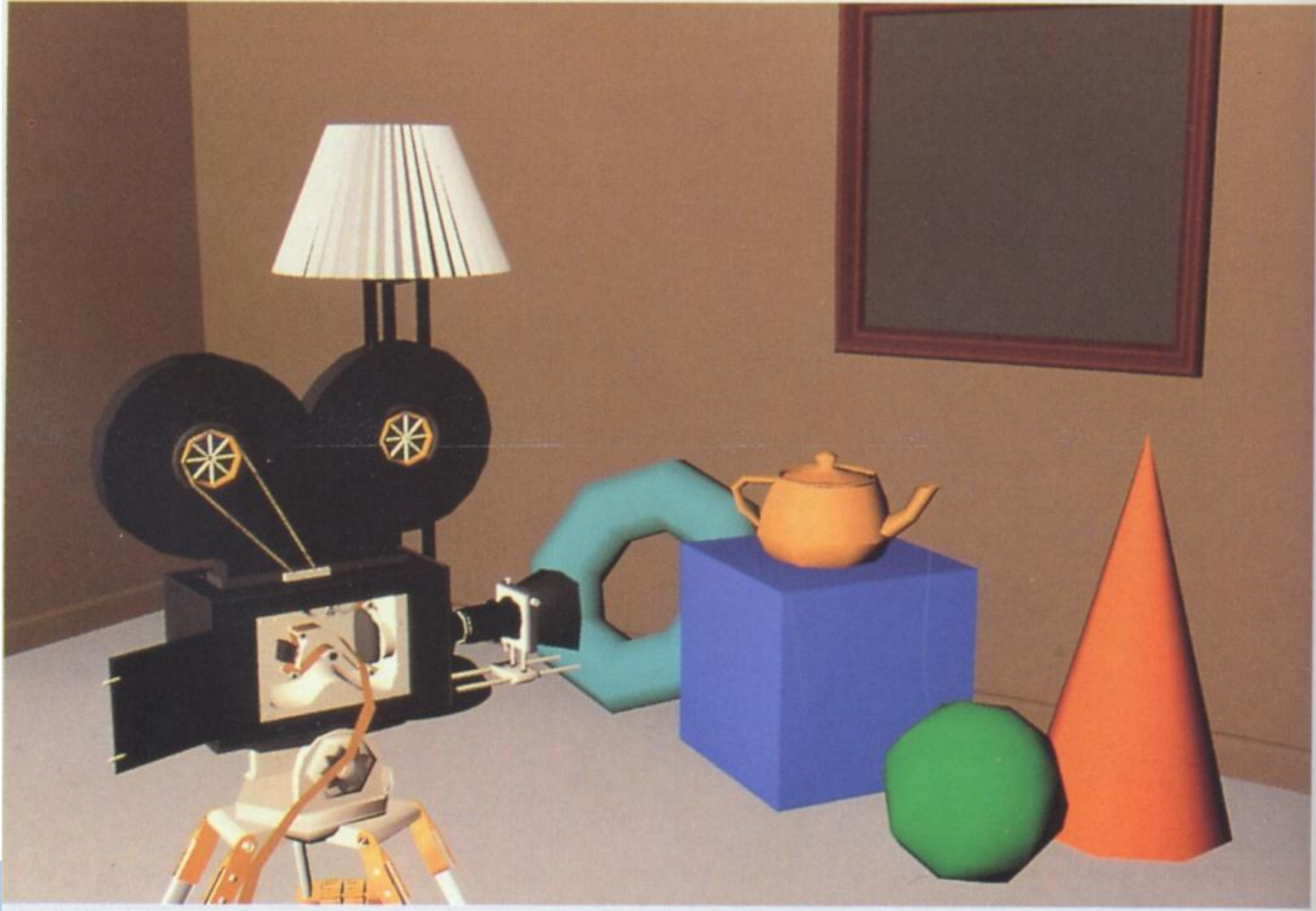
$$I_A = \frac{y_A - y_2}{y_1 - y_2} I_1 + \frac{y_1 - y_A}{y_1 - y_2} I_2$$

$$I_B = \frac{y_B - y_3}{y_1 - y_3} I_1 + \frac{y_1 - y_B}{y_1 - y_3} I_3$$

$$I_P = \frac{x_B - x}{x_B - x_A} I_A + \frac{x - x_A}{x_B - x_A} I_B$$

Gouraud 着色的场景（带漫反射）

Plate II.30 *Shutterbug*. Gouraud shaded polygons with diffuse reflection (Sections 14.4.3 and 16.2.4). (Copyright © 1990, Pixar. Rendered by Thomas Williams and H.B. Siegel using Pixar's PhotoRealistic RenderMan™ software.)



Gouraud 着色的场景（带镜面反射）

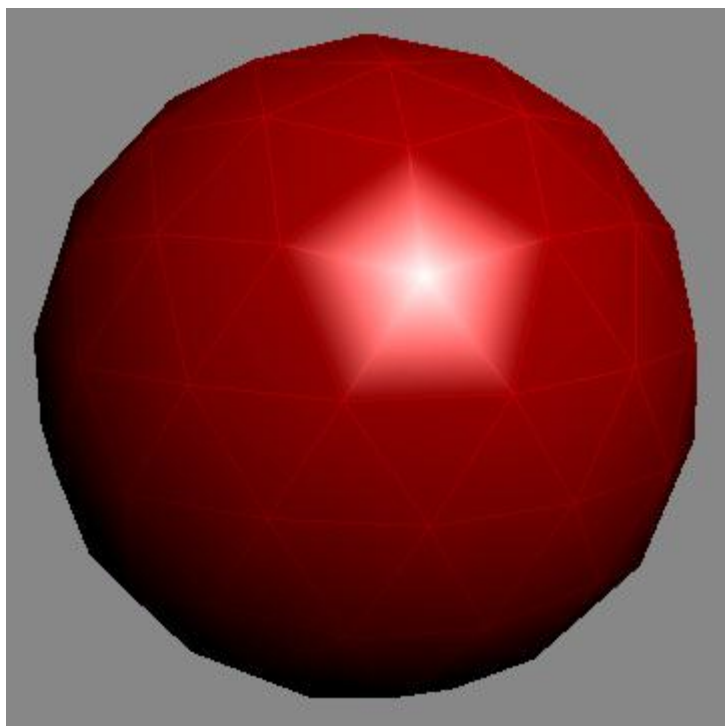


Plate II.31 *Shutterbug*. Gouraud shaded polygons with specular reflection (Sections 14.4.4 and 16.2.5). (Copyright © 1990, Pixar. Rendered by Thomas Williams and H.B. Siegel using Pixar's PhotoRealistic RenderMan™ software.)

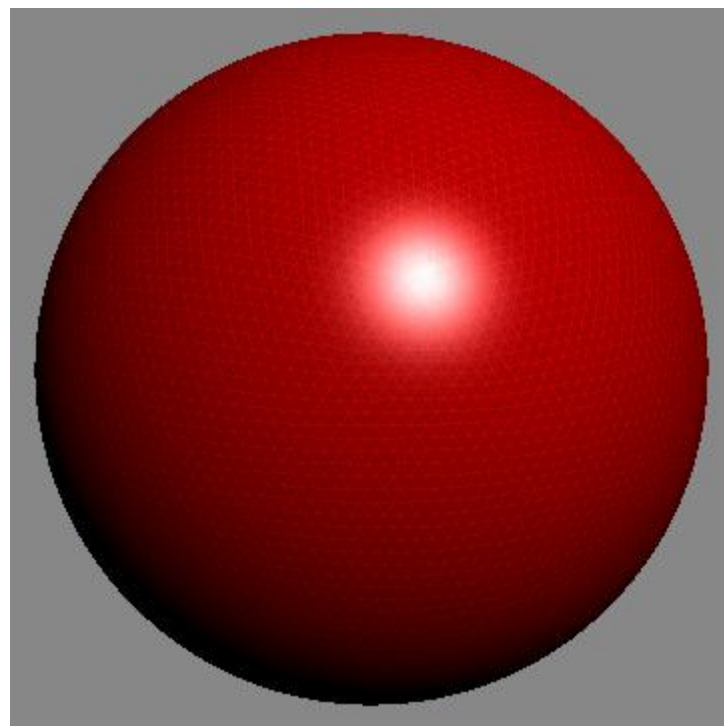
Gouraud 着色方法

- 优点：能有效的显示漫反射曲面，计算量小
- 缺点：
 - 高光有时会异常
 - 当对曲面采用不同的多边形进行分割时会产生不同的效果。
 - Gouraud 明暗处理会造成表面上出现过亮或过暗的条纹，称为马赫带（Mach_band）效应

Gouraud 着色方法——高光区域



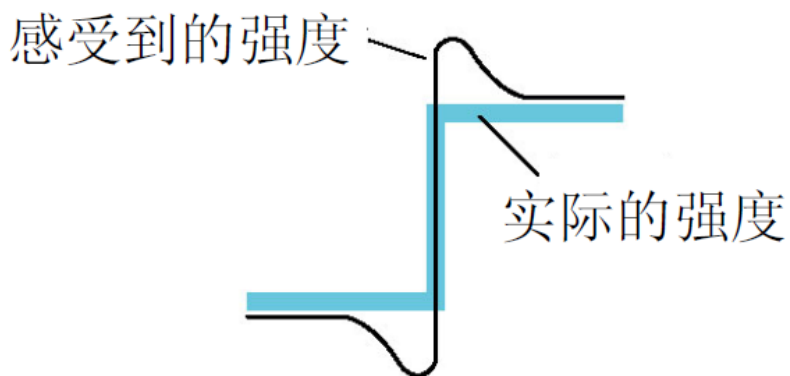
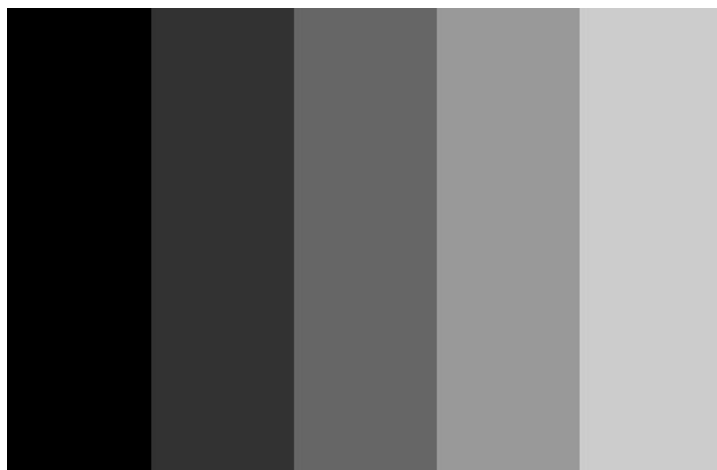
注意在镜面反射的高光区域呈现的比較差的效果



同样的球体采用非常高的多边形数量渲染的结果

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 着色方法——马赫带效应

- 马赫带 (Mach band) 效应



- 改进：Phong 提出双线性法向插值，以时间为代价，解决高光问题

Phong 着色方法

- 基本思想：通过对多边形顶点的法向量进行插值，获得其内部各点的法向量，又称为法向插值着色方法
- 步骤
 1. 计算多边形单位法向量
 2. 计算多边形顶点单位法向量
 3. 对多边形顶点法向量进行双线性插值，获得内部各点的法向量
 4. 利用光照方程计算多边形内部各点颜色

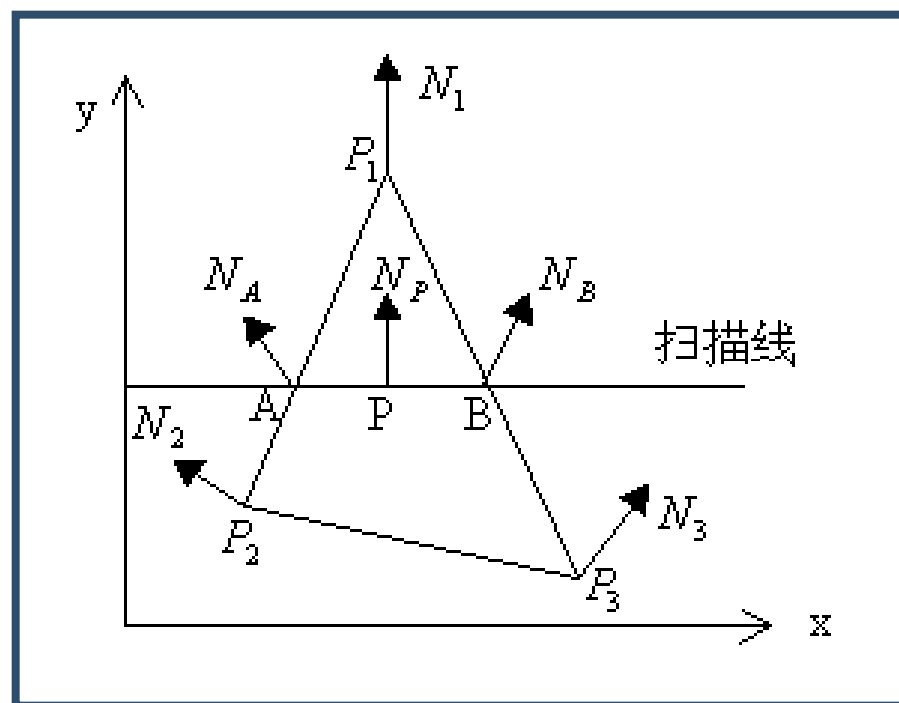
Phong 着色方法——法向插值

- N_A 由 N_1 、 N_2 线性插值得到：

$$N_A = \frac{y_A - y_2}{y_1 - y_2} N_1 + \frac{y_1 - y_A}{y_1 - y_2} N_2$$

$$N_B = \frac{y_B - y_3}{y_1 - y_3} N_1 + \frac{y_1 - y_B}{y_1 - y_3} N_3$$

$$N_P = \frac{x_B - x}{x_B - x_A} N_A + \frac{x - x_A}{x_B - x_A} N_B$$



Phong 着色方法渲染的场景（带镜面反射）

Plate II.32 *Shutterbug*. Phong shaded polygons with specular reflection (Sections 14.4.4 and 16.2.5). (Copyright © 1990, Pixar. Rendered by Thomas Williams and H.B. Siegel using Pixar's PhotoRealistic RenderMan™ software.)



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
- OpenGL 实现的是 Gouraud 方法
- 所花费时间通常是 Gouraud 方法的 6 到 8 倍
 - 影响实时性能
 - 目前可以采用 GPU 编程的方式实现

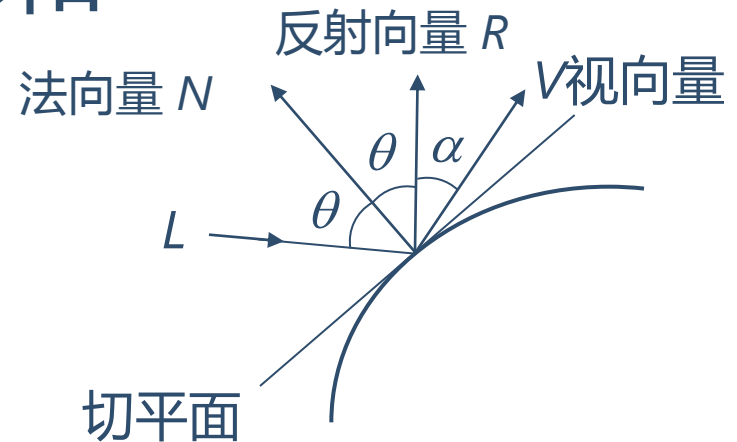
改进的 Phong 光照模型

Phong 光照模型

- Phong 局部光照模型模拟物体表面对光的反射作用，光源为点光源
- 这是由 Bui Tuong Phong 于 1975 提出的模型
- 反射作用分为
 - 物体间作用使用环境光模拟 (Ambient Light)
 - 漫反射 (Diffuse Reflection)
 - 镜面反射 (Specular Reflection)

Phong 光照模型

- Phong 光照模型的综合表述：由物体表面上一点 P 反射到视点的光强 I 为环境光的反射光强 I_a 、理想漫反射光强 I_d 和镜面反射光 I_s 的总和



$$I = I_a + I_d + I_s$$

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

距离衰减

- 对于现实世界的光照，随着光源距离的增加，光的强度也随之衰减
- 点光源发出的光线到达一个表面时的强度与它们之间的距离的平方成反比

距离衰减

- 计算光照时可对点光源所反射的光进行上述计算，把漫反射和镜面反射的强度乘以衰减因子，对它进行衰减

$$\text{衰减因子} = \frac{1}{k_c + k_l d + k_q d^2}$$

- d 为光源和顶点之间的距离，常量项 k_c 和线性项 k_l 可以柔和点光源产生的作用

光源属性

- 在 Phong 模型中，我们将每个光源产生的结果进行叠加
- 每个光源有独立的漫反射，镜面反射和环境光分量，这样可以带来最大的灵活性，尽管这个形式没有物理依据
- 对三原色中每种分量单独处理
- 因此，对每个点光源有 9 个系数

$$-I_{dr'} \quad I_{dg'} \quad I_{db'} \quad I_{sr'} \quad I_{sg'} \quad I_{sb'} \quad I_{ar'} \quad I_{ag'} \quad I_{ab}$$

材质 (*Material*) 属性

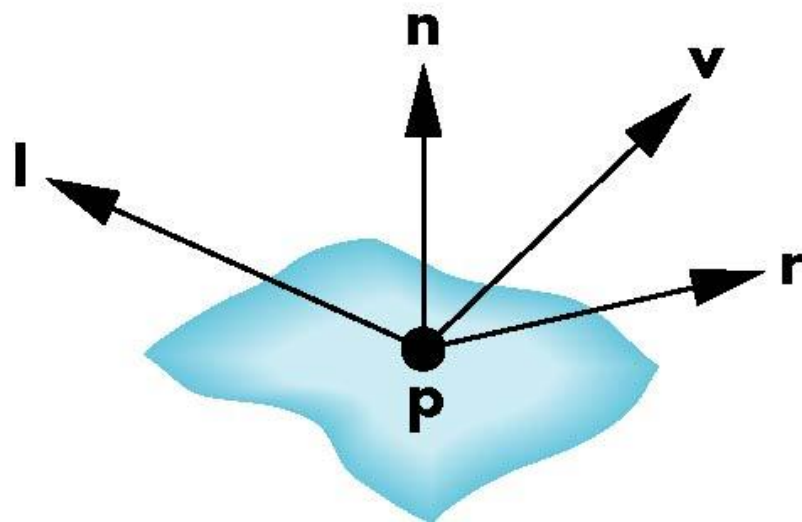
- 模型中由物体表面决定的系数统称为“材质”属性
- 材质属性与光源属性相匹配
 - 九个吸收系数 k_{ar} , k_{ag} , k_{ab} , k_{dr} , k_{dg} , k_{db} , k_{sr} , k_{sg} , k_{sb}
 - 镜面反射高光系数 α

把各种分量叠加在一起

- 对每个光源和每个颜色分量，Phong模型可以写成如下形式（不包括距离因素）：

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

对每一个颜色分量，
我们可以将所有光源
产生的结果进行叠加



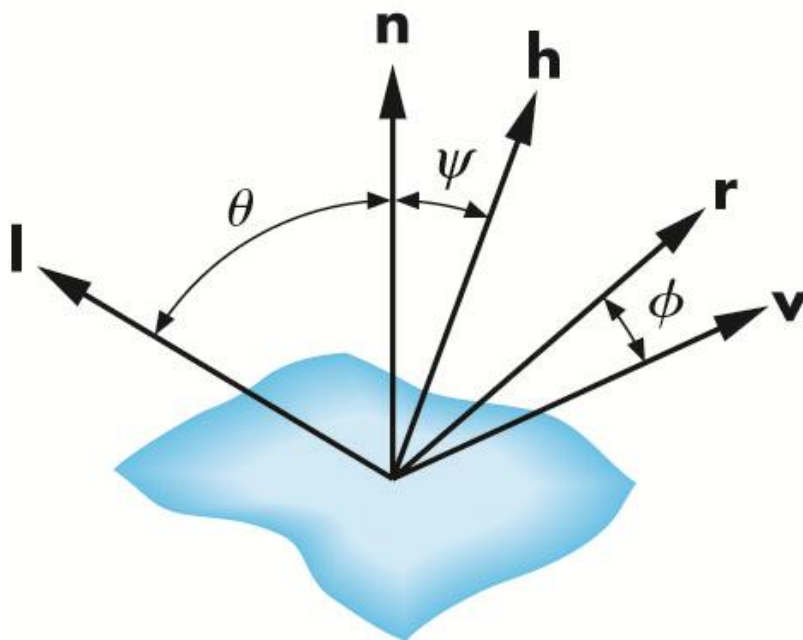
改进的 Phong 模型

- 原 Phong 模型中的镜面反射分量有些问题，因为它需要对每个顶点都计算新的反射向量和视线向量
- Blinn 建议使用一个半角向量来近似，使得计算更有效率
- 70，80年代计算机运算速度普遍偏慢，这样的改进具有很高的意义

半角向量 (Halfway Vector)

- **h** 是位于 **l** 和 **v** 正中间的单位向量

$$\mathbf{h} = (\mathbf{l} + \mathbf{v}) / |\mathbf{l} + \mathbf{v}|$$

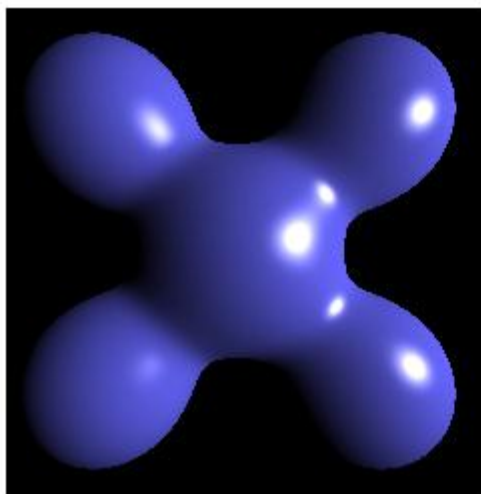


使用半角向量

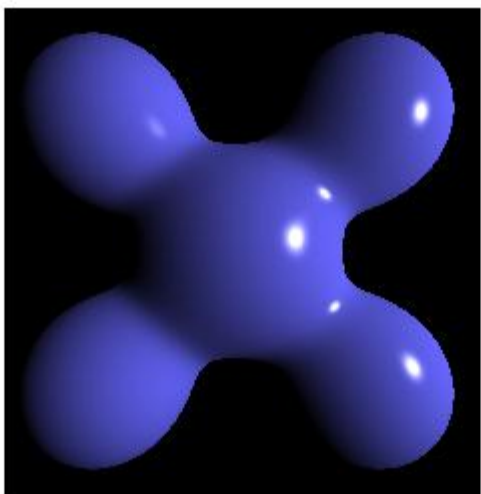
- 用 $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^\beta$ 替换 $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha$, 这样无需计算 r
- β 是选择的系数, 用来匹配原来的高光系数 α
 - 通常要实现与原来方程类似的效果, β 要取比 α 更大
- 注意: 如果 \mathbf{v} 位于 \mathbf{l} 、 \mathbf{n} 、和 \mathbf{r} 所在平面时, 角 ψ 是 \mathbf{r} 与 \mathbf{v} 之间的角 Φ 的一半 (习题6.7)

Blinn Phong

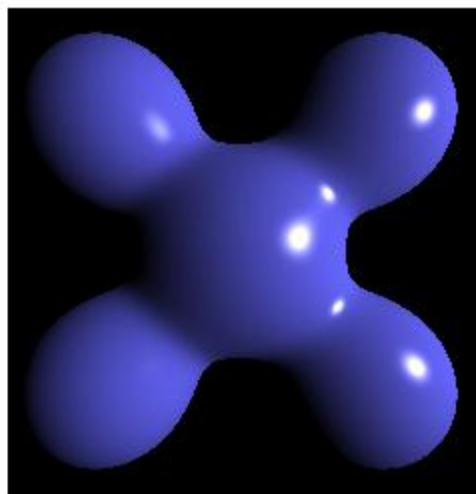
- 得到的模型称为改进的 Phong 模型或是 Blinn-Phong 光照模型
 - 它是 OpenGL 中的光照模型标准



Blinn-Phong



Phong



Blinn-Phong
(higher exponent)

OpenGL 中利用改进的 Phong 模型绘制的一组 Utah 茶壶

这些茶壶之所以看起来彼此不同，是因为它们在改进的Phong光照模型中的参数不同

课本彩图 29

