

第五章 真实感绘制

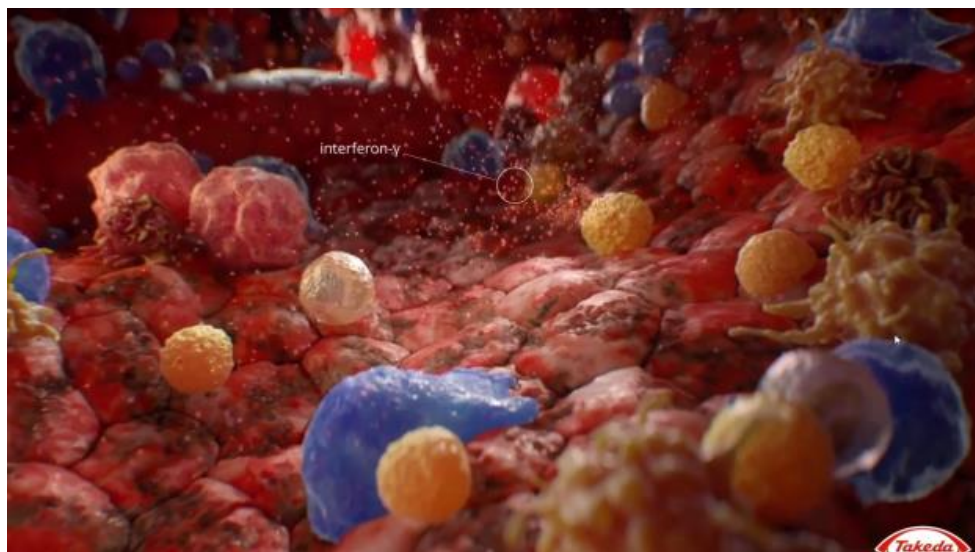
5.1 光照和明暗绘制

内容提要

- 基本概念
- 光照 (illumination)
- 明暗绘制 (shading)

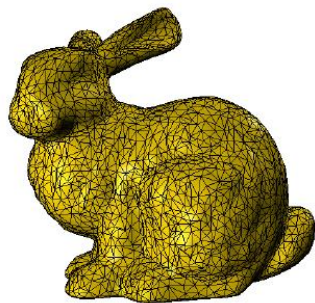
绘制的基本概念

- 计算机图形学中的绘制是指用计算机程序从2D或3D模型生成屏幕可显示的图像的过程。



绘制

- 真实感绘制
 - 计算机绘制结果能像照片一样具有真实场景效果
- 非真实感绘制
 - 生成具有数字艺术化表现形式的图像



真实感绘制



非真实感绘制

真实感绘制

- 目标

- 根据场景的几何造型、材质和光源分布等,将其转变成跟真实场景在视觉效果上非常相似的图象



照片or绘制?

真实感绘制

- 特点

- 能够反应物体表面颜色和亮度变化
- 能够表现物体表面的质感
- 能够表现深度、层次、遮挡、阴影等
- 能够表现反射、（半）透明等

真实
≈
物理



真实感绘制

- 因素

- 光照

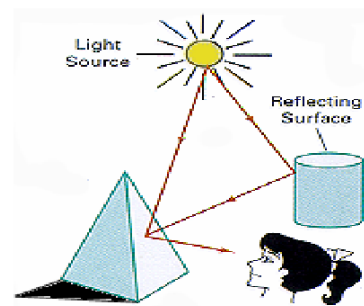
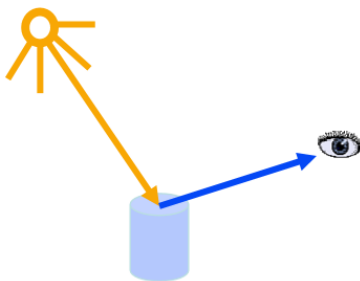
- 形状

- 位置

- 材质

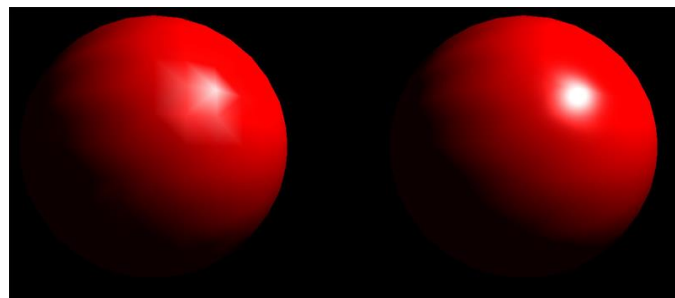
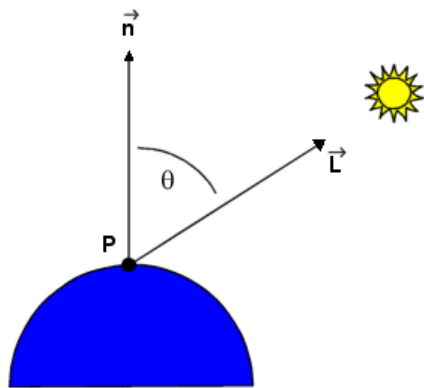
- 环境

- ...



真实感绘制

- 两个概念
 - 光照模型 (illumination model)
 - 计算物体表面任一点上的光强度和色彩组成的数学模型
 - 着色模型 (shading model)
 - 计算并确定图像中每个像素的光强度和色彩的数学模型



真实感绘制

- 两种绘制技术

- 局部技术

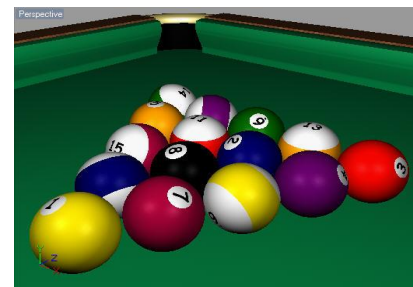
- 考虑光源和表面性质

- Phong着色, Gouraud着色

- 结合类似阴影图、阴影体等复杂技术

- 速度快

- 用于实时性要求高的应用, 如3D电脑游戏



真实感绘制

- 两种绘制技术

- 全局技术

- 不仅可以模拟直接照明，还可以模拟间接照明

- 蒙特卡罗光线追踪

- 热辐射、光子映射

- 可以更准确地模拟

- 反射

- 折射（斯涅耳定律）

- 阴影

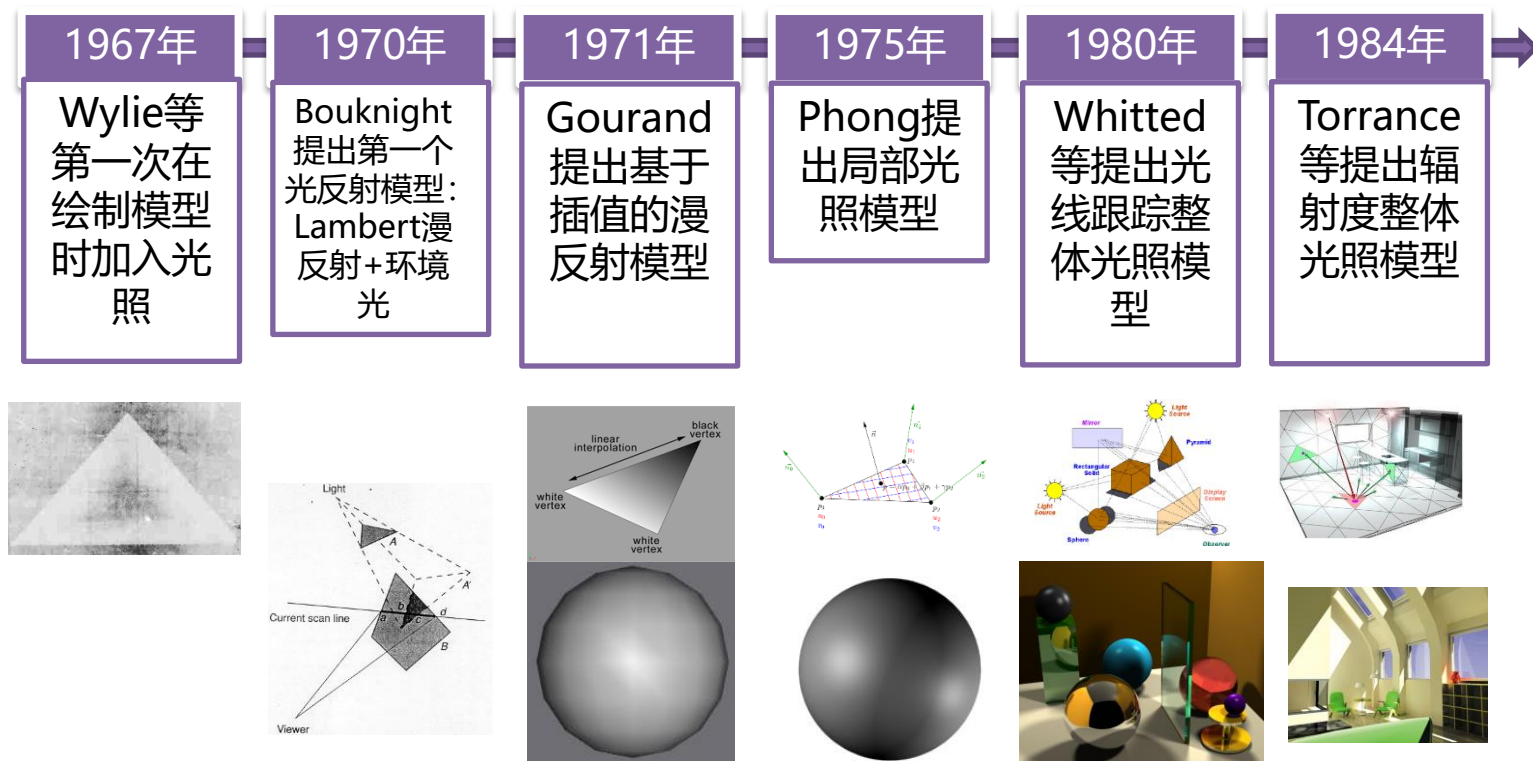
- 颜色扩散

- 需要复杂的计算，效率低



真实感绘制

• 发展历史



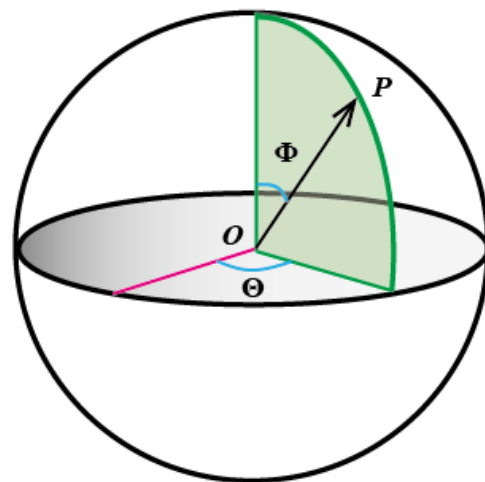
内容提要

- 基本概念
- **光照 (illumination)**
- 明暗绘制 (shading)

光源的描述

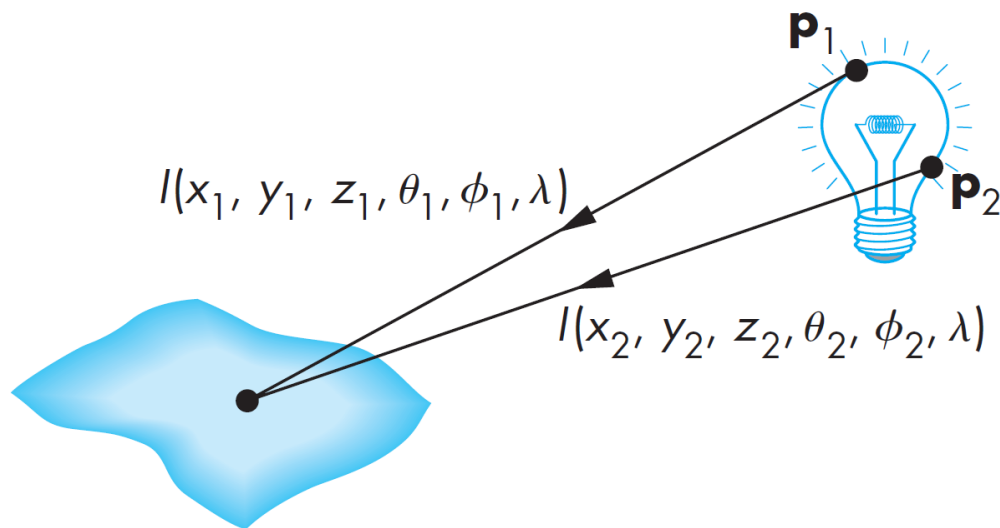
- 光线从光源表面离开的方式有两种：
 - 自发射（通过内部能量来源发射光线）
 - 反射（在简单光源模型里不考虑）
- 在表面上任一点 (x, y, z) 所发出的光可以用 θ, ϕ 两个方位角表示以及每个波长 λ 的强度确定
 - 照明函数有六个变量

$$I(x, y, z, \theta, \phi, \lambda)$$



光源的总贡献

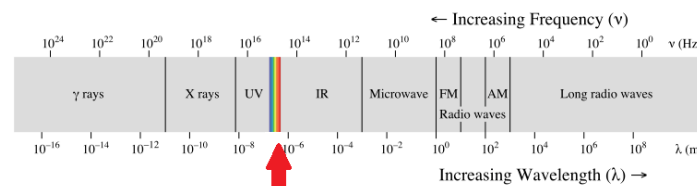
- 对于被光源照射的一个对象，我们需要对在光源面上的所有点进行光强积分得到光源对对象的总贡献



- 一般情况下，求这样的积分都是很困难的
- 通常用多个基本简单光源来近似

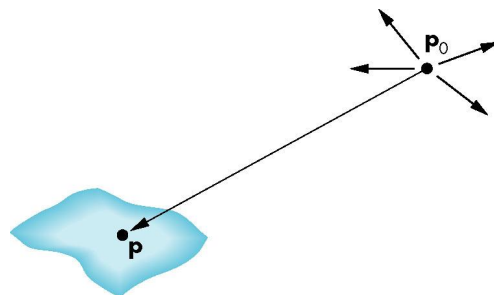
光源的颜色

- 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
 - 真正的物理模型会比较复杂
- 人的视觉系统
 - 我们感知的只是光谱上有限的一部分，而不是光线能量按波长的完整分布
- 在大多数应用中，可以用RGB三种成分的强度表示光源
 - 光亮度 (luminance) 函数为 $I = [I_r, I_g, I_b]$
- 在后面建模中，对三个颜色分量进行独立但相似的计算

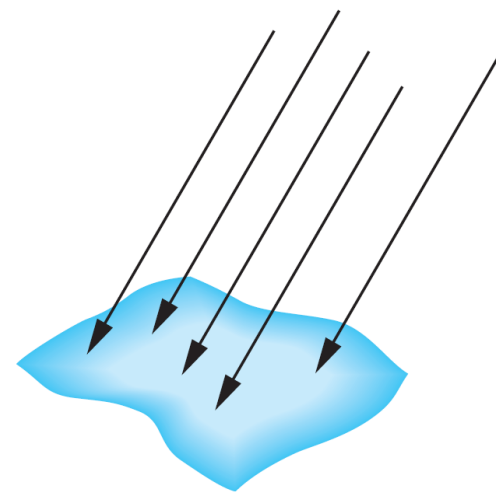


简单光源模型

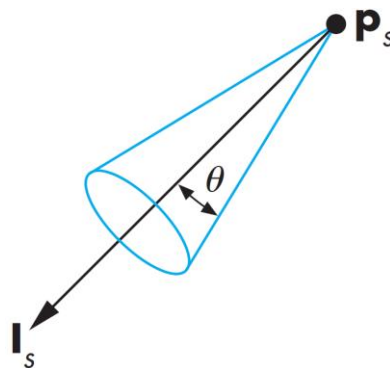
- 基本光源：
 - 环境光
 - 点光源
 - 聚光灯
 - 远距离光源



点光源



远距离光源

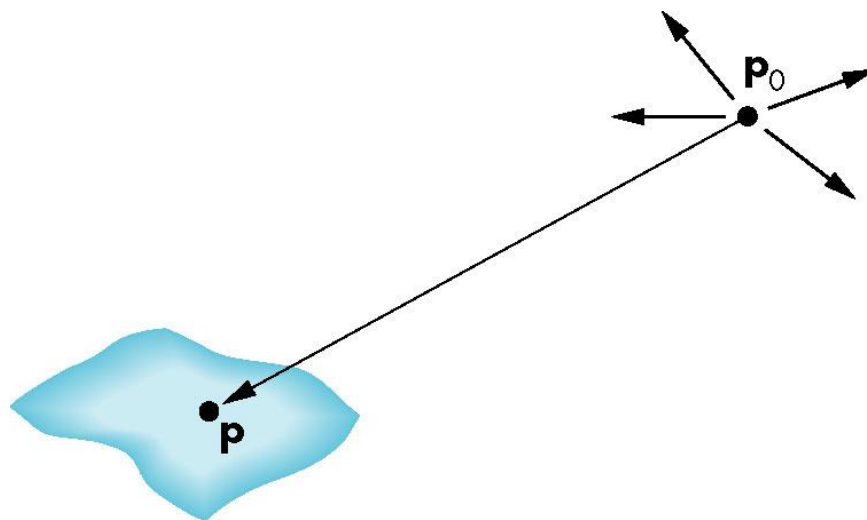


聚光灯

点光源

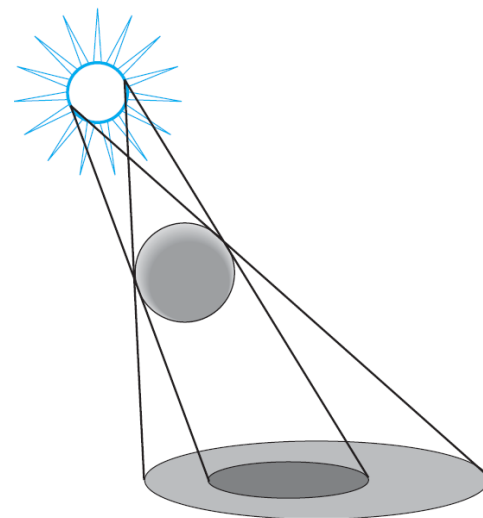
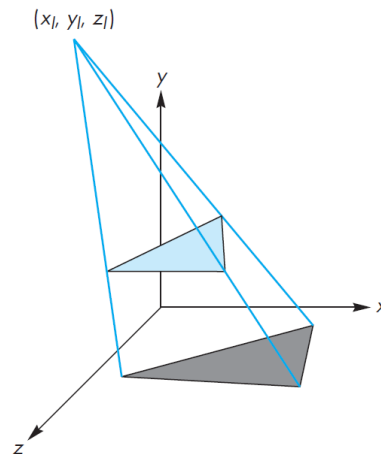
- 理想的点光源向各个方向发射的光线的强度相等
- 由位置和颜色表示：
$$I(p_0) = \begin{bmatrix} I_r(p_0) \\ I_g(p_0) \\ I_b(p_0) \end{bmatrix}$$
- 在点p接收的光亮度反比于光源与点的距离的平方

$$I(p, p_0) = \frac{1}{|p - p_0|^2} I(p_0)$$



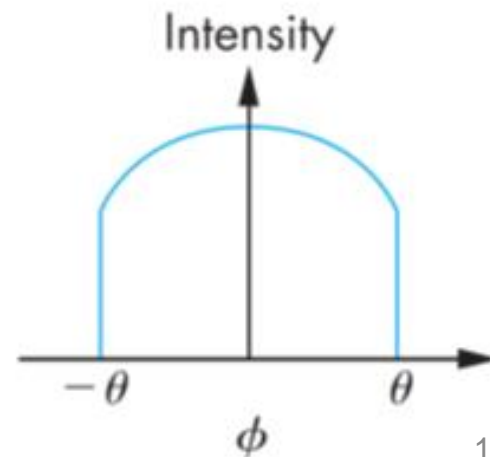
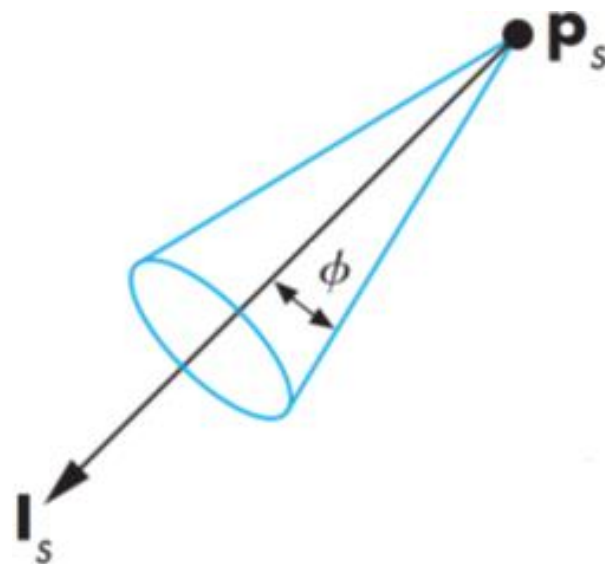
点光源

- 在计算机图形学中大量应用点光
 - 易于使用
- 但不能很好地反映物理现实
 - 对比度比较高
 - 不够柔和
- 可以在点光源中加入环境光，降低高对比度的问题



聚光灯

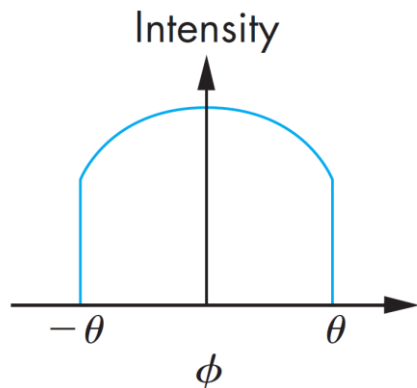
- 具有一个比较窄的照明范围，通常为圆锥形半无穷区域
 - 可以给点光源加上一定的限制得到
 - 锥的定点在 P_s , 而中心轴方向为 I_s
 - 如果 $\phi = 180^\circ$, 聚光灯成为点光源
- 光亮度的分布
 - 通常绝大多数光集中在照明锥的中心
 - 照明强度是定点指向材料表面的向量 s 与中心轴的夹角 ϕ 的函数



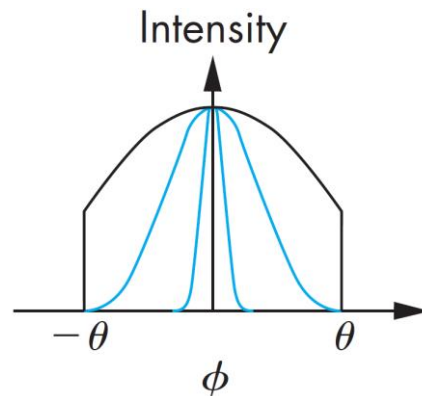
聚光灯

- 可以采用各种方式定义照明强度函数
 - 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, 它的计算非常方便: $\cos \phi = s \cdot l$

真实衰减



具体实现

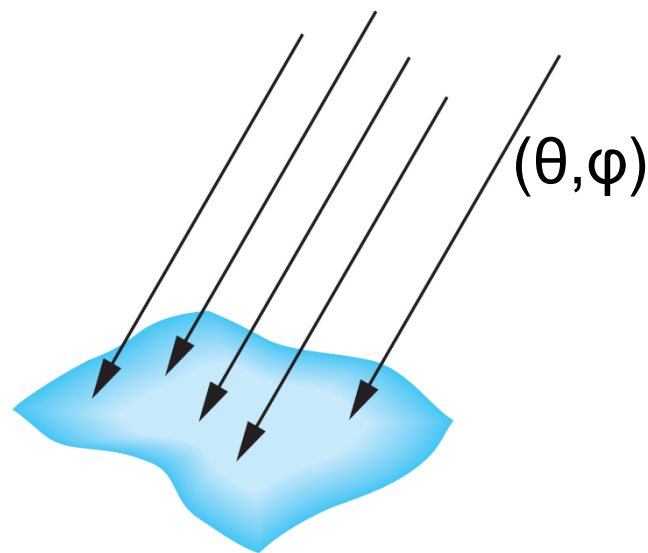


远距离光源

- 远距离光源即在无穷远处的光源，光线为平行线
 - 在光照计算中，需要计算从光源到当前点的向量
 - 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

- 远距离光源的齐次坐标描述：

$$P_0 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 0 \end{bmatrix}$$



环境光

- 环境光是指多个经过复杂的漫反射形成的背景光强
 - 在图形管线中采用简单的均匀光强描述
- 光照模型
 - 由三个颜色分量确定
 - 环境光强是由下式确定的，环境中每个位置的环境光强度完全相同

$$I_a = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{ag} \\ I_{ab} \end{bmatrix}$$

光源模型

- 整体/局部光照模型中的光源
 - 在实际光照模型中，往往包含不同类型的多个光源，影响最终的绘制效果



材质模型

- 物体的材质即物体的物理属性，影响与光线的相互作用

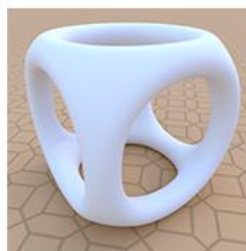
- 反射率

- 透明度

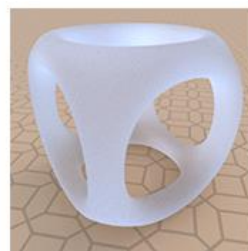
- 吸收率

- 折射率

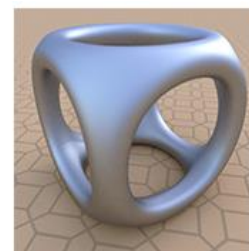
- ...



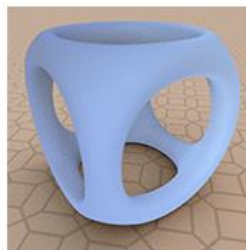
Diffuse Reflection



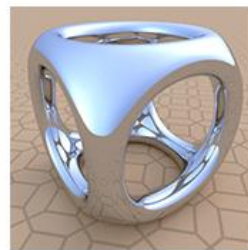
Diffuse Transmission



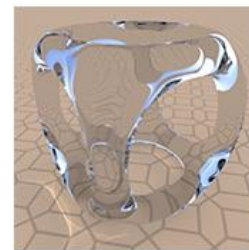
Simple Glossy



Backscattering Glossy



Specular Reflection

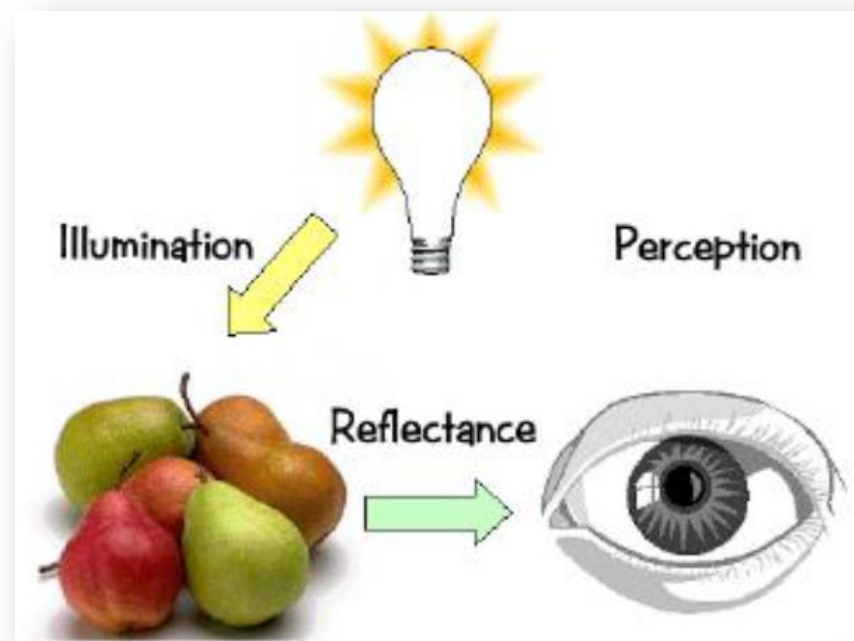


Reflect & Transmit

不同材质产生的绘制效果不同

光照与材质的作用

- 光和材质的相互作用导致物体表面的点具有不同的颜色或阴影效果
- 绘制时需要考虑：
 - 光源
 - 材料特性
 - 观察的位置
 - 表面方向
 - ...



光照与材质的作用

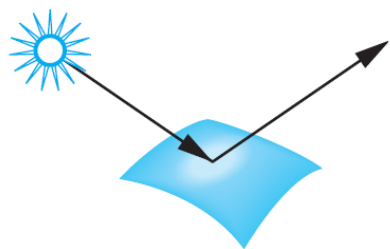
- 当我们看物体上的一个点，所看到的颜色是由光源和物体表面的多重相互作用确定的



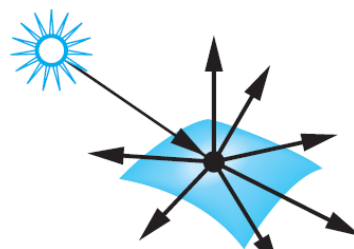
Photo credit: Jessica Andrews, flickr

光线与材质

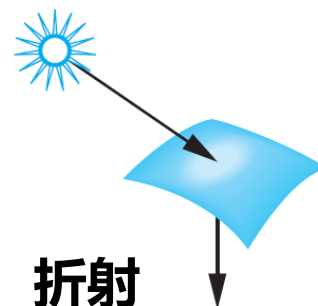
- 曲面上某一点的颜色取决于光照与材质之间的多次作用
- 相互作用的三大分类：
 - 镜面反射：如镜子
 - 可能有一部分入射光线被吸收，但是所有反射出去的光线都沿着同一个方向，反射光线的方向服从入射角等于反射角这一规律
 - 漫反射：如墙面
 - 向各个方向散射的光线强度都相等
 - 折射：如玻璃和水
 - 半透明表面，允许入射光线的一部分进入表面并且从对象的另一个位置再发射出去



镜面反射



漫反射

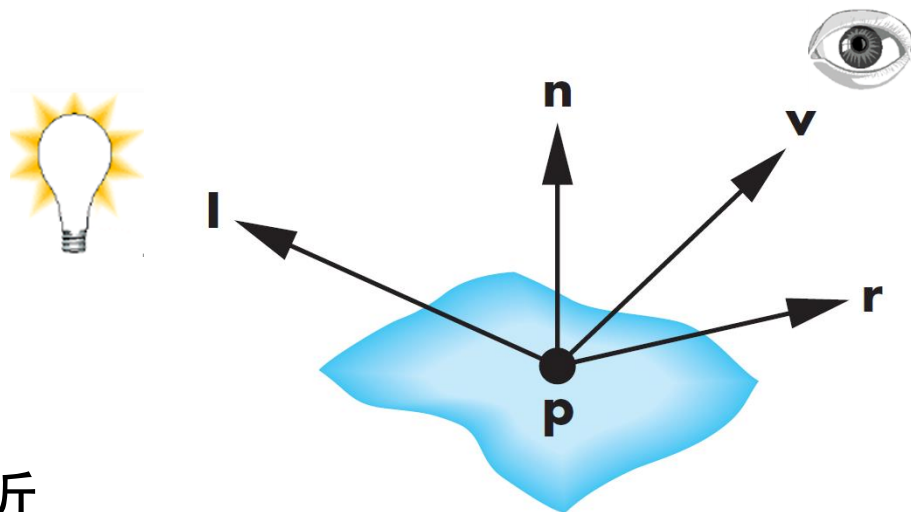


折射

Phong反射模型

- 该模型使用四个向量描述曲面上 p 点的光照效果：

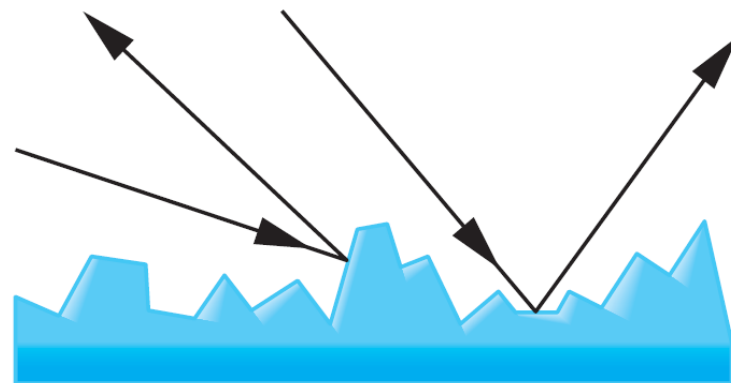
- 曲面法向量 n
- 视线方向 v
- 入射方向 L
- 反射方向 r



- 真实光照的简化
 - 计算效率高
 - 和物理事实足够接近
 - 适合图形管线实现
 - 不考虑折射
 - 只考虑局部

漫反射

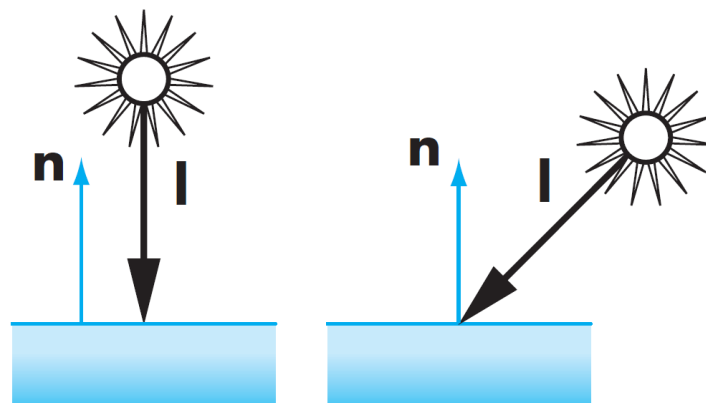
- Lambert表面
 - 光线向各个方向均匀地反射
 - 在所有的观察者看来亮度都一样
 - 模拟粗糙表面
 - 理想的漫反射



- Lambert定律:
 - 只有入射光线的垂直分量才对照明起作用
 - 光强取决于垂直分量

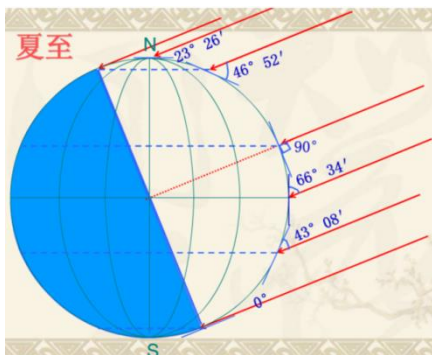
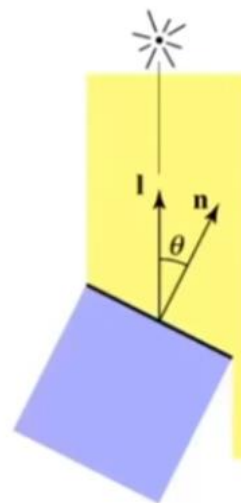
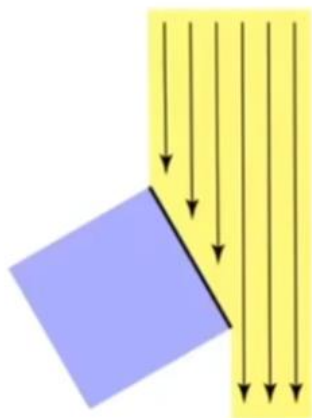
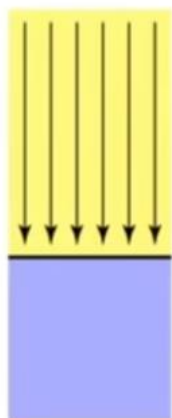
$$\cos \theta = 1 \cdot n$$

$$R_d \propto \cos \theta$$



正午时最亮，黎明和黄昏时最暗

漫反射



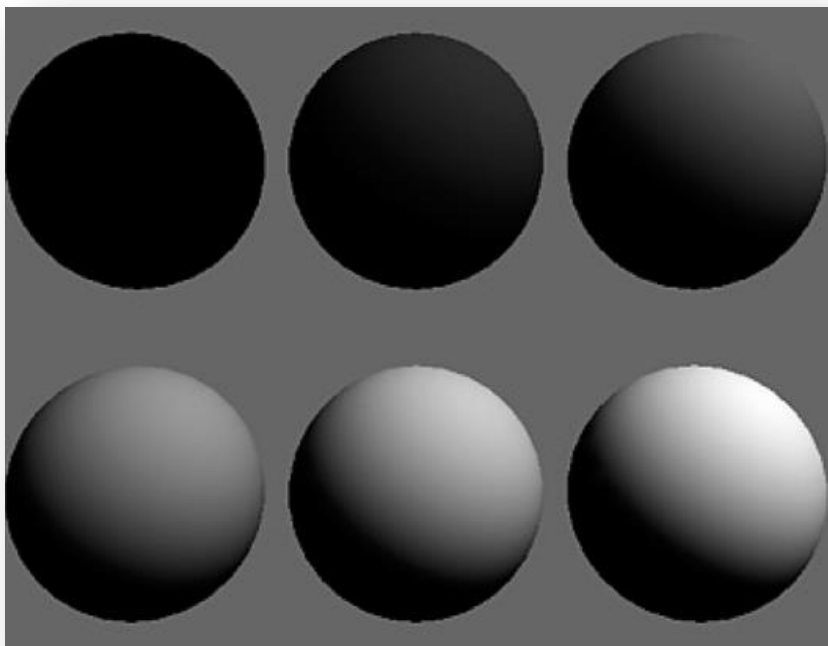
- 为什么南北半球季节相反？
 - 主要是太阳光对地球直射的角度造成
 - 不同部分接收到的太阳能量不同

*例子来自games 101

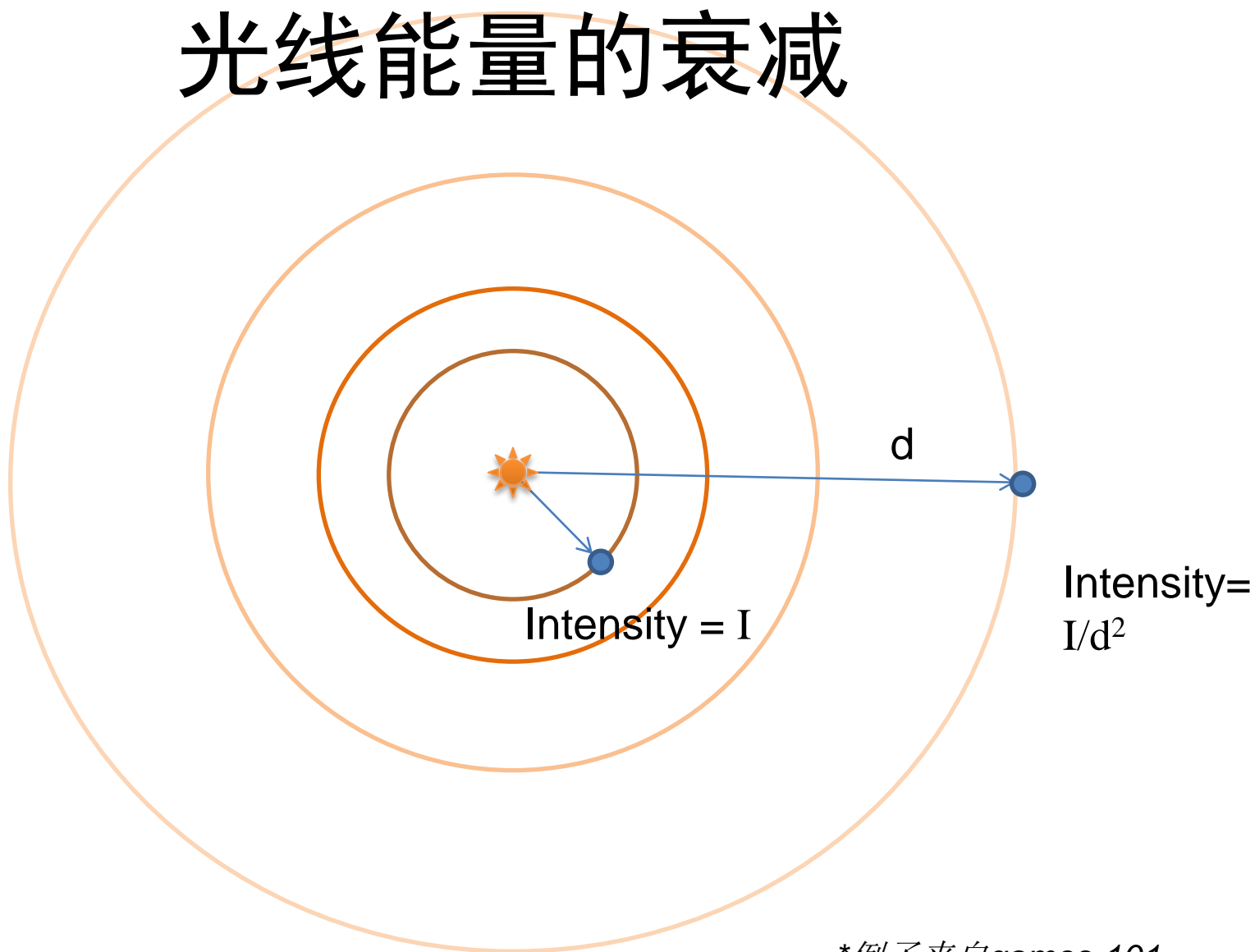
漫反射

- 漫反射光强公式: $I_d = k_d(1 \cdot n)L_d$
- k_d 为漫反射系数
 - 表示在入射的漫反射光中有多大一部分被反射出去

漫反射系数依次为
0.0, 0.2, 0.4,
0.6, 0.8, 1.0



光线能量的衰减



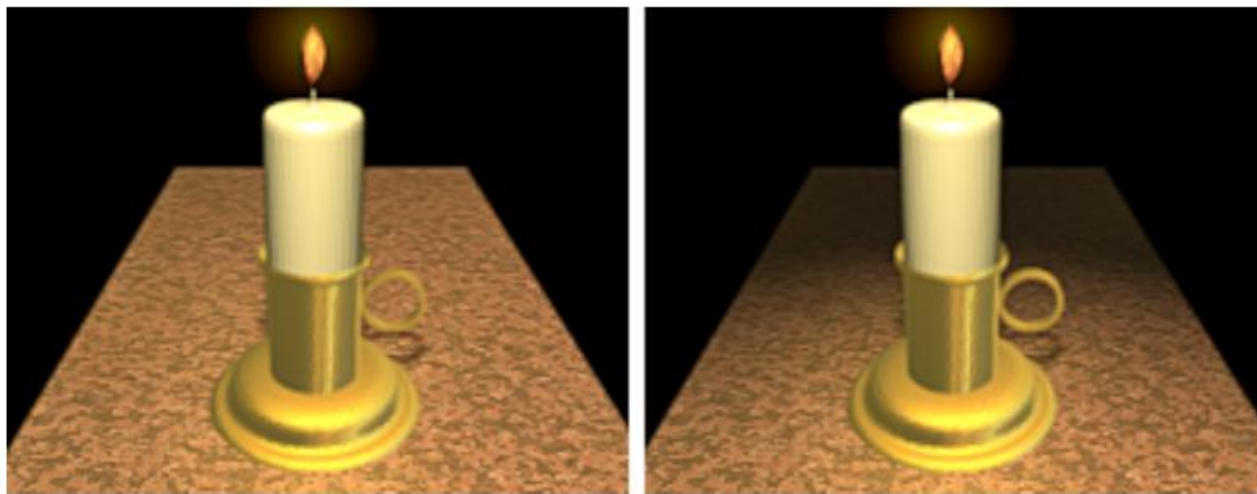
*例子来自games 101

衰减因子

- 考虑传播过程的衰减
 - 衰减方式：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，添加衰减因子，其中 d 表示距离

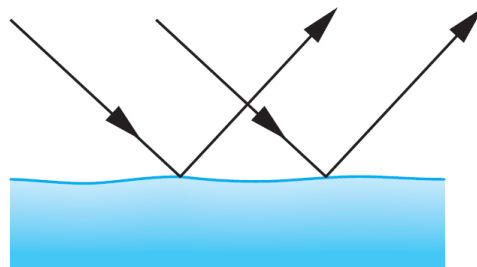
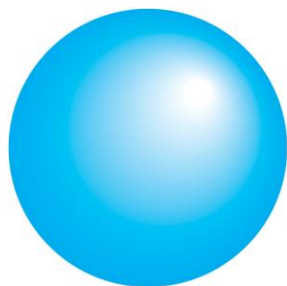
$$I_d = \frac{k_d}{a + bd + cd^2} (1 \cdot n) L_d$$

- 衰减因子使照明效果更加柔和



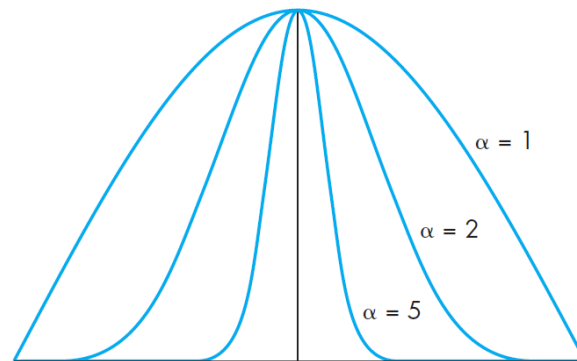
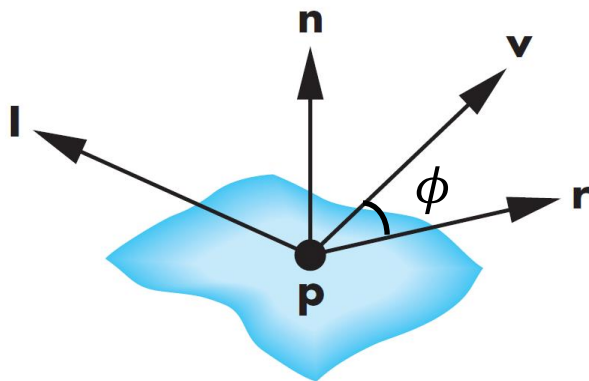
镜面反射

- 镜面反射
 - 光滑表面显出镜面高光
 - 因为入射光被反射后，绝大多数集中在反射方向周围
 - 这些高光通常表现出与环境光和漫反射不同的颜色
- 如蓝色球在白光照射下的白色高光
- 大多数曲面既不是理想漫反射曲面，也不是真正的镜面



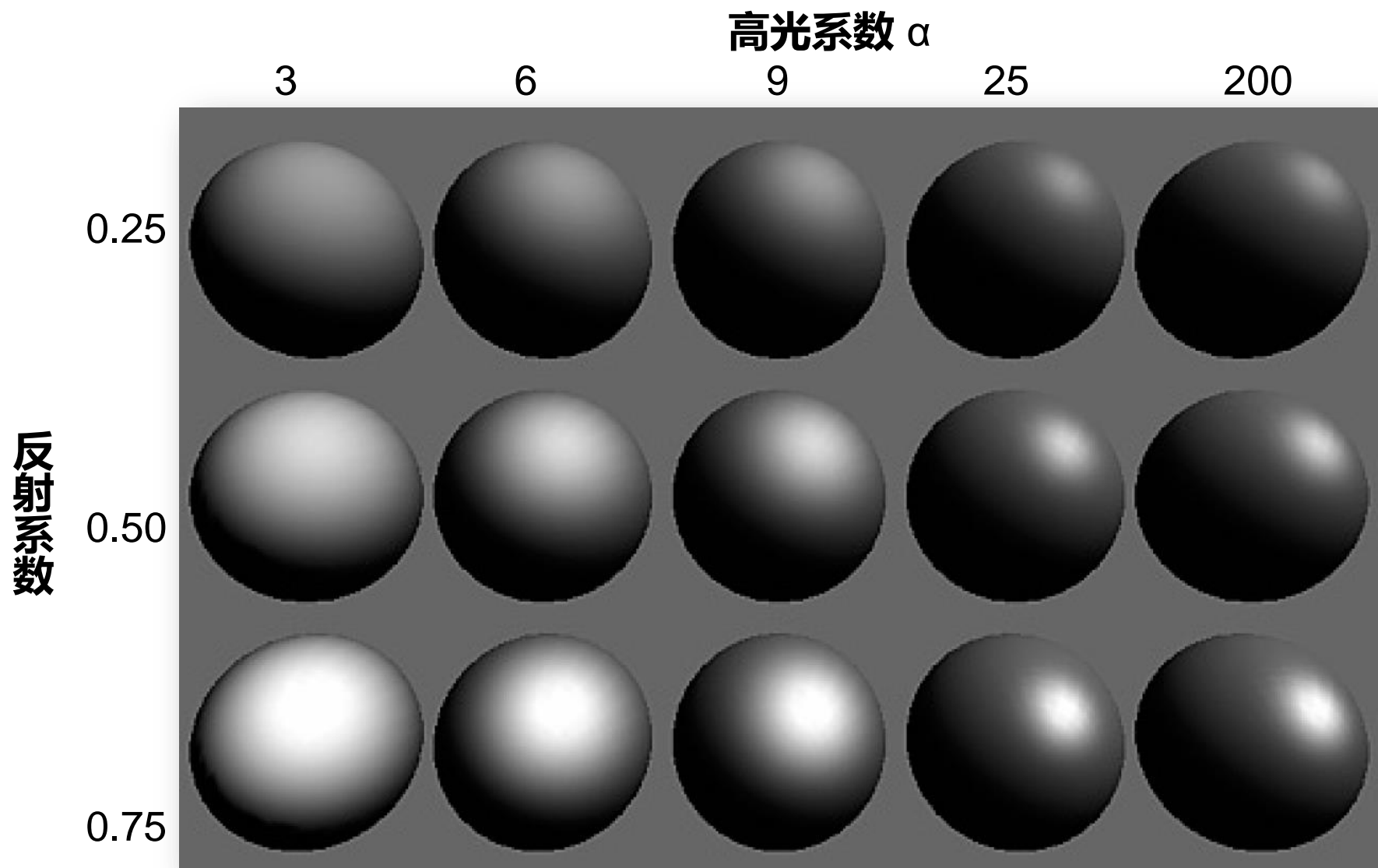
镜面反射

- 镜面反射系数 k_s :
 - 表示在入射的镜面射光中有多大一部分被反射出去
- 镜面反射光强公式: $I_s = k_s L_s \cos^\alpha \phi$
 - ϕ : 视线与反射光线的夹角
 - α : 高光系数, 决定了反射光的衰减程度



- 同样可以考虑传播过程中的衰减

镜面反射参数的影响

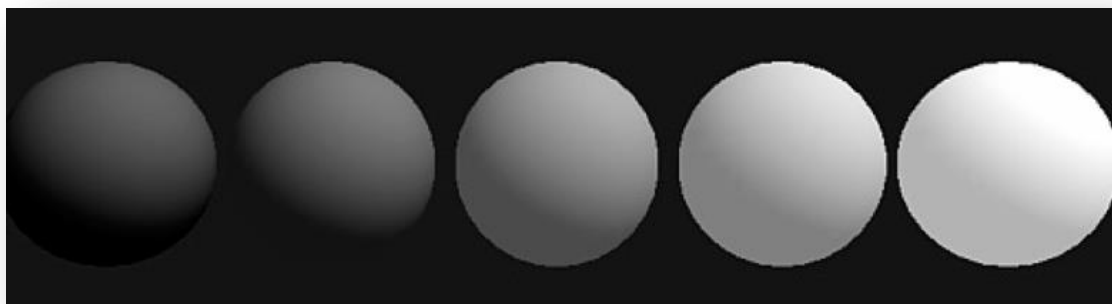


环境光反射

- 环境光是由场景中光源与对象间的多次反射而导致
- 环境光的量与颜色依赖于光源的颜色和对象的材料属性
- 在表面上所有点处的环境光强度 I_a 都是相同的
- 反射率由环境光反射系数 k_a 确定，即 $R_a = k_a$

$$I_a = k_a L_a, 0 \leq k_a \leq 1$$

L_a 可以代表任何单独的光源，也可以代表全局环境光

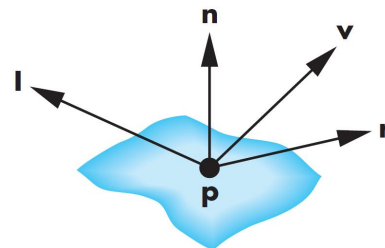


环境光反射系数依次为0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7

Phong模型总结

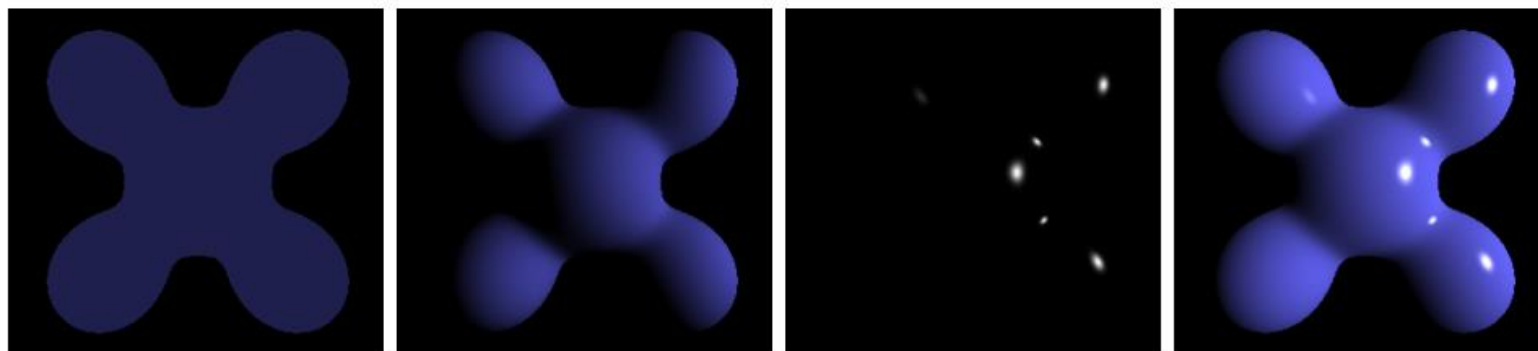
- 对每个光源和每种颜色成分的光，光照模型可以表示为三种光分量的效果叠加

– 环境光反射+漫反射+镜面反射：



$$I = \frac{1}{a + bd + cd^2} (k_d L_d \max(1 \cdot n, 0) + k_s L_s \max((r \cdot v)^\alpha, 0)) + k_a L_a$$

– 需要针对每一个光源以及图元进行计算



环境光反射

+

漫反射

+

镜面反射

=

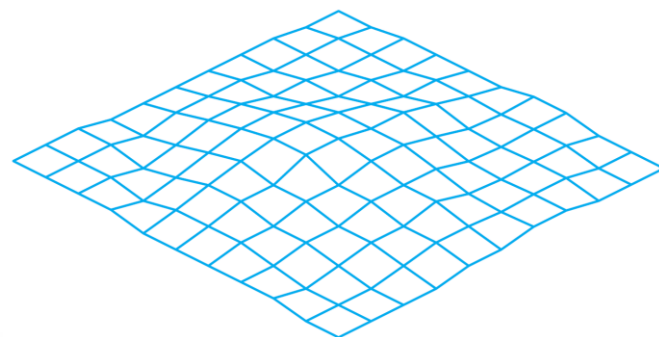
Phong反射

内容提要

- 基本概念
- 光照 (illumination)
- 明暗绘制 (shading)

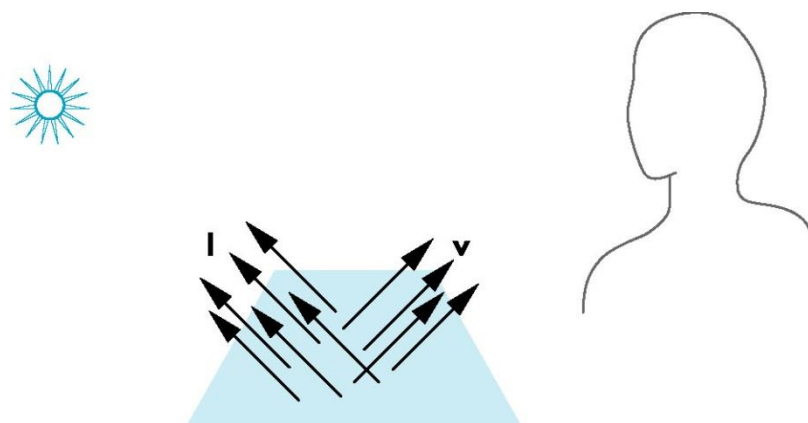
多边形着色

- 着色（Shading）：
 - 根据光源与材质决定场景中某一曲面点的观测颜色
- 多边形着色：
 - 曲面的离散表示
 - 如何获得连续or光滑的着色效果？



均匀着色 (flat shading)

- 在同一平面多边形上，法向 n 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，其他点的颜色与它相同，这种明暗绘制方式就叫均匀着色



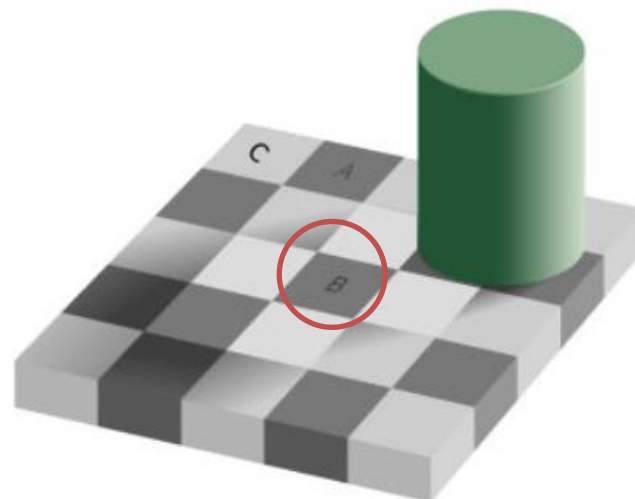
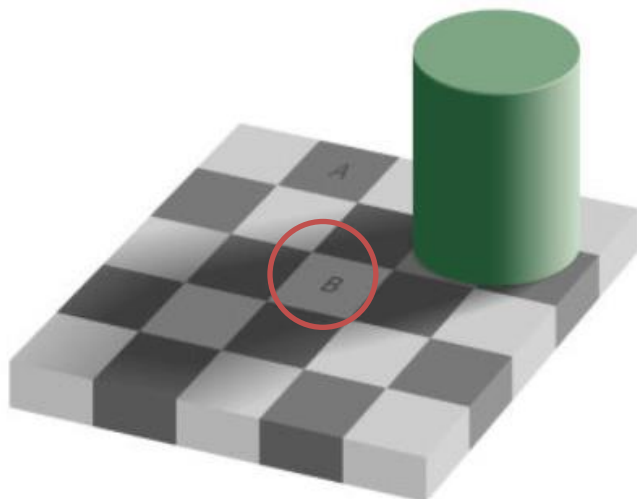
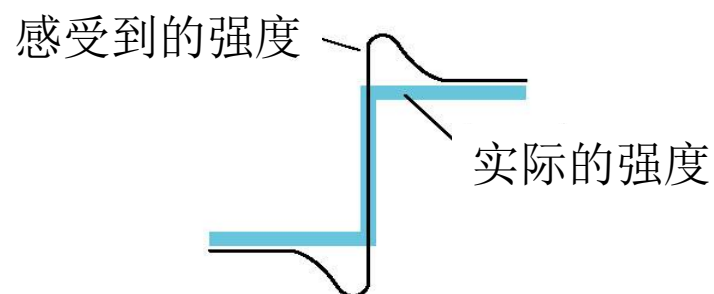
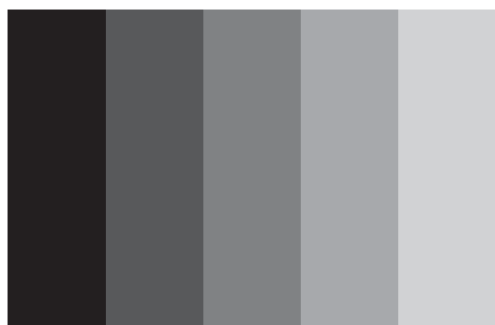
均匀着色 (flat shading)

- 均匀着色会使多边形网格中不同的多边形具有不同颜色



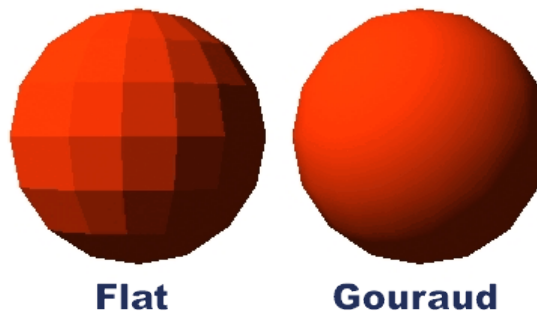
Mach带效应

- 人类的视觉系统有增强边缘对比度的机制



光滑着色（Gouraud shading）

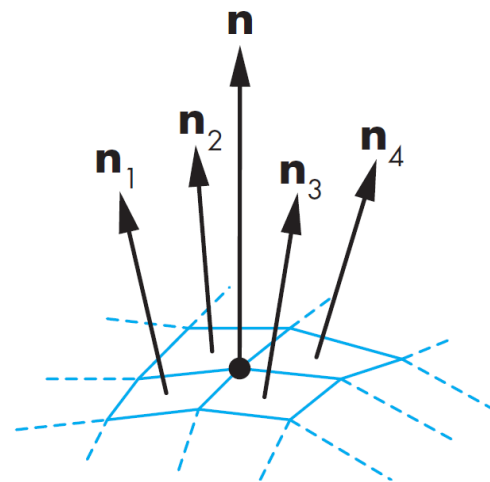
- 通过插值物体表面离散点的颜色生成连续的绘制效果
- Henri Gouraud，法国计算机科学家，美国犹他大学，1971年博士论文提出



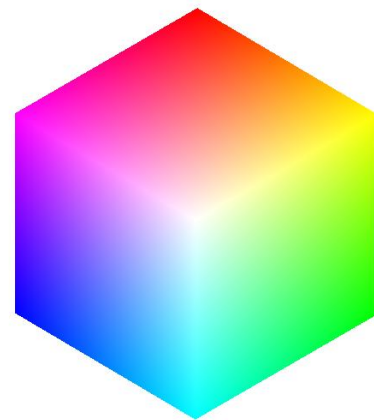
光滑着色 (Gouraud shading)

- 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：

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



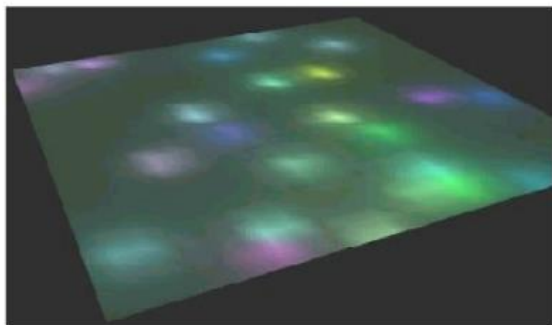
- 然后利用简单光照模型计算出顶点的颜色
- 对于多边形内的点，光栅化模块可以采用线性插值确定颜色



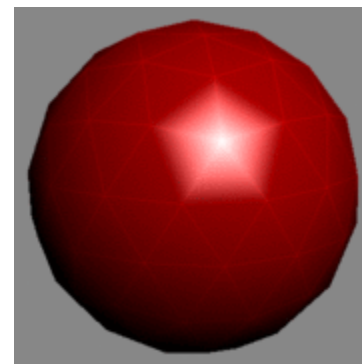
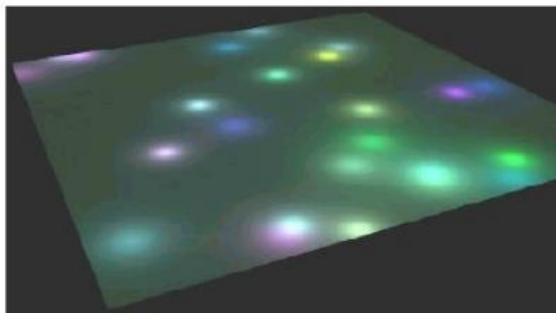
Gouraud 着色的问题

- 可能产生范围过大的高光
- 可能丢掉中心的高光
- 不适合光滑物体

Gouraud Shaded Floor



Phong Shaded Floor

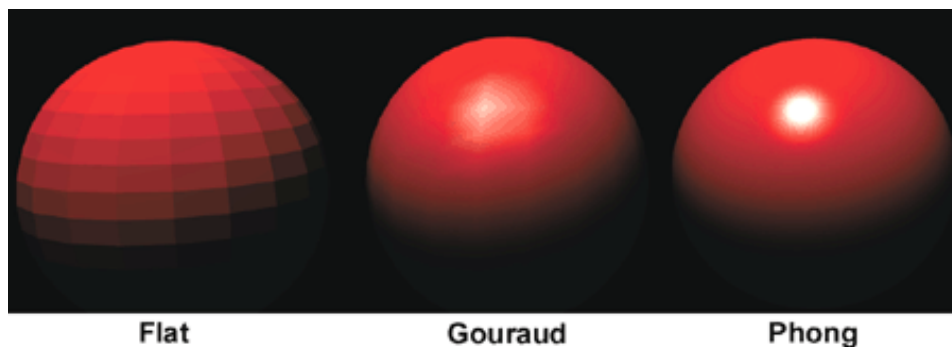


Phong 着色

- 通过插值物体表面法向得到更加准确的绘制效果
- 是对真实局部光照情况的逼近模型
- Bui Tuong Phong, 越南人, 美国犹他大学, 1973年博士论文提出



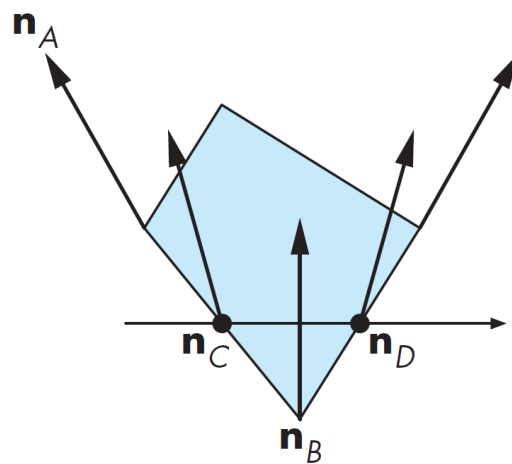
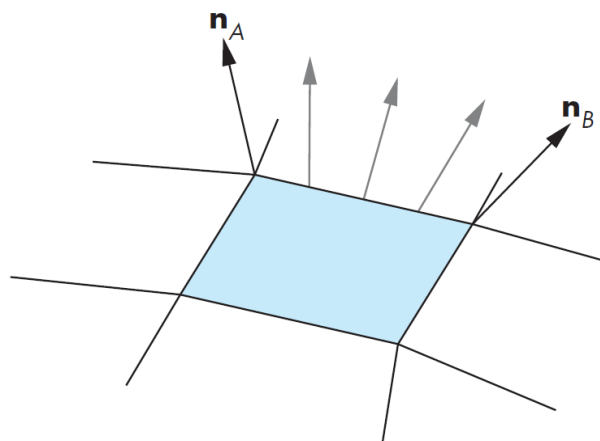
Bui Tuong
Phong



Phong 着色

- 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：

$$n(\alpha, \beta) = (1 - \beta)n_c + \beta n_D$$

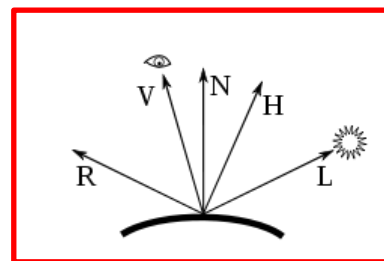
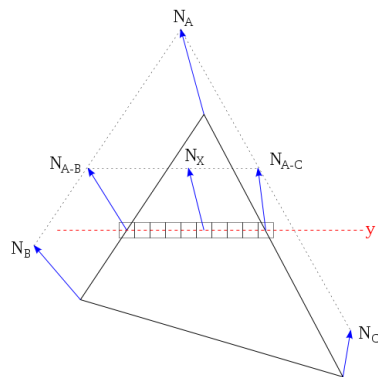
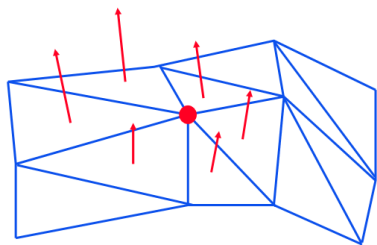


法向插值

Phong 着色

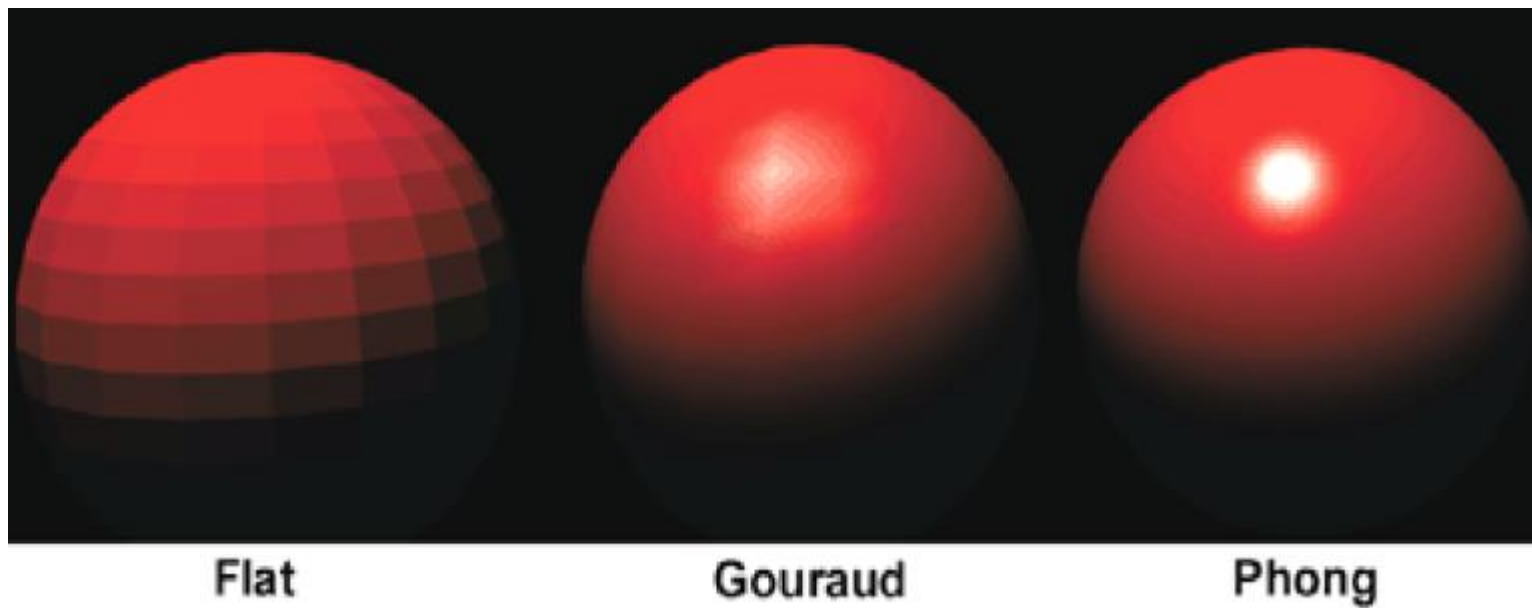
— 算法流程

- 计算多边形顶点的法向量
- 双线性插值计算每个像素点的法向量
- 通过每个像素的法向量计算光照



Phong 着色

- 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



方法对比

- Gouraud着色
 - 对每个顶点求平均法向量
 - 对每个顶点应用Phong模型
 - 用顶点颜色的线性插值求取每个多边形的颜色
- Phong着色
 - 求取顶点的法向量（方法和Gouraud一样）
 - 用顶点法向量线性插值求取多边形的边上各点的法向量
 - 用多边形的边上各点的法向量线性插值求取多边形内部各点的法向量
 - 对每个片元应用Phong模型

方法对比

- Phong方法比Gouraud方法的复杂度高
 - 但是由于法向的计算比较复杂，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
 - 目前可以用片元着色器实现
- 两种方法都需要特定数据结构表示网格，从而可以获取顶点法向量

Phong-Blinn shading

- 如果采用Phong模型计算镜面反射光，就需要对表面上的每点计算矢量点积 $r \cdot v$ 。
- 计算 r 比较耗时
- Blinn建议采用近似方法，通过中值矢量(halfway)给出了近似的镜面反射分量，从而计算更加有效。



Jim Blinn
Steven Anson Coons奖

Phong-Blinn shading

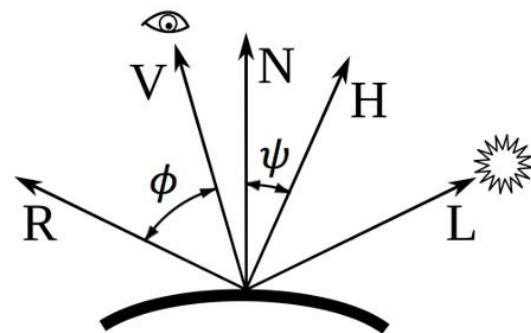
– 中值矢量

- \mathbf{h} 是 \mathbf{l} 和 \mathbf{v} 的中值单位向量，即

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

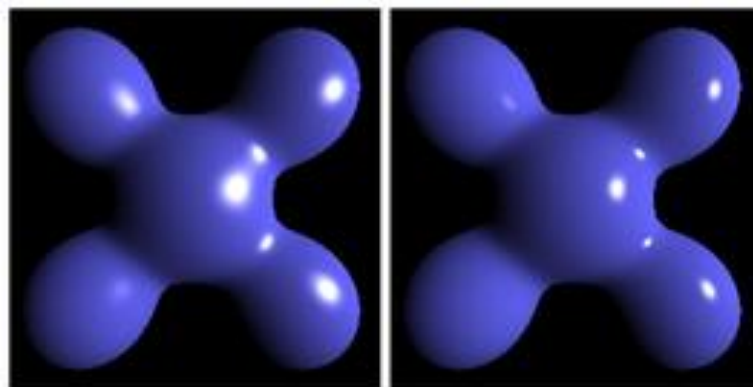
\mathbf{l} , \mathbf{n} , \mathbf{v} 共面时，
角度间的关系：

- $2\psi = \phi$



Phong-Blinn shading

- 使用中值矢量 $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^\beta$ 替代 $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha$
- 加快计算：计算 \mathbf{h} 比计算 \mathbf{r} 更快
- 由此得到的模型称为改进的Phong模型或者 Phong-Blinn光照模型

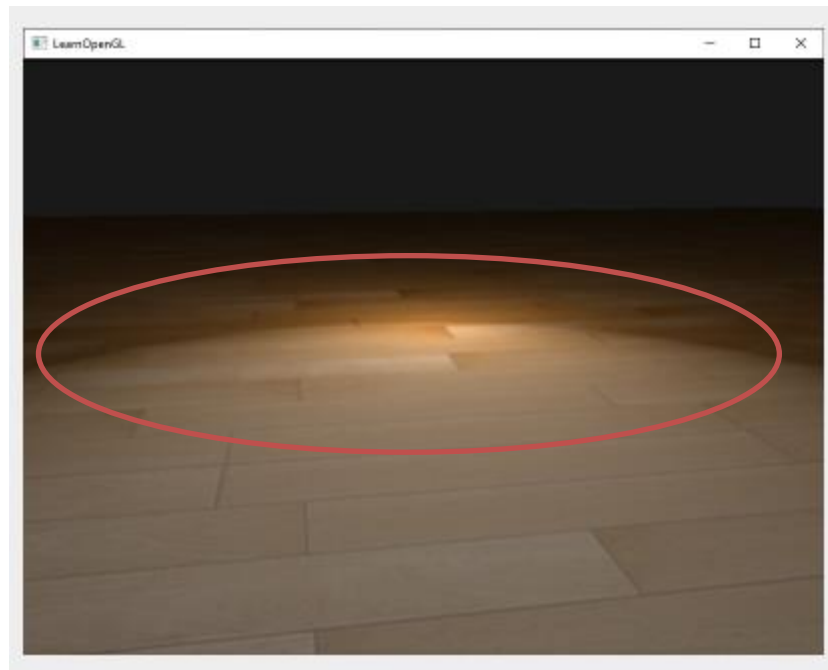
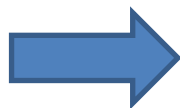
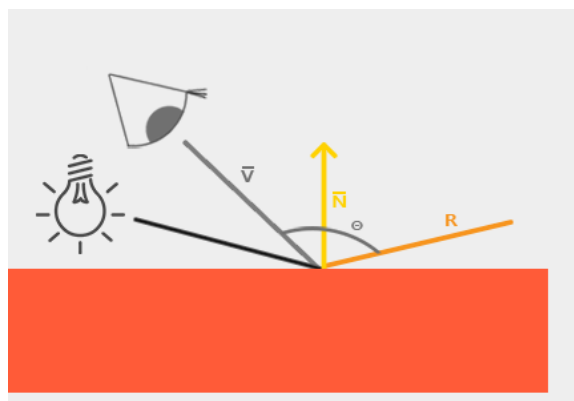


Blinn-Phong

Phong

Phong-Blinn shading

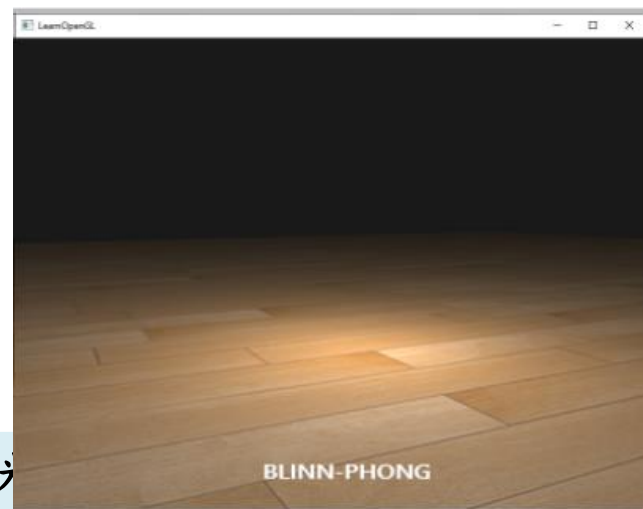
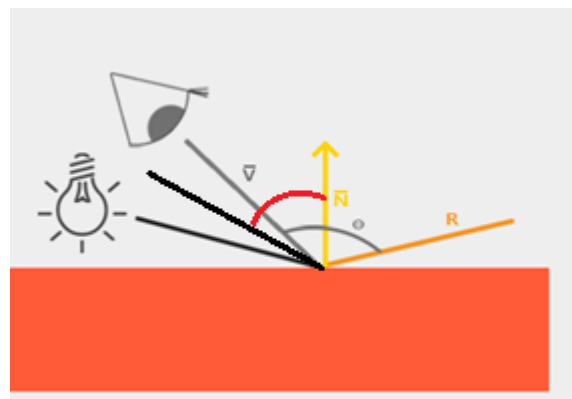
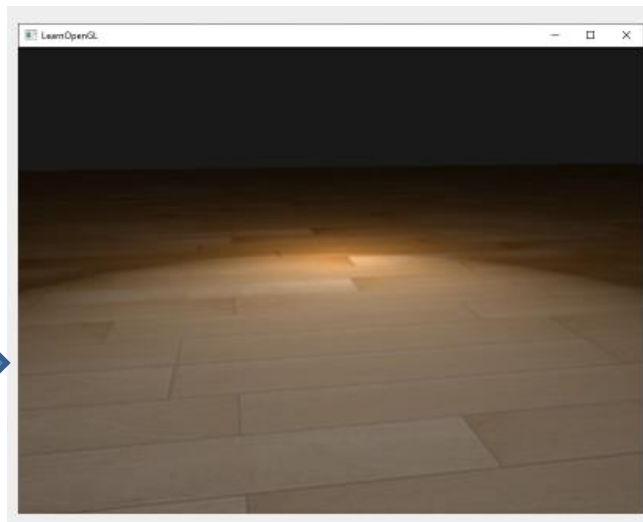
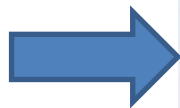
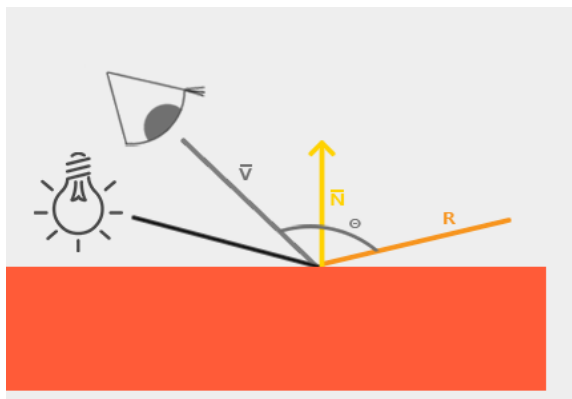
- 不用 $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha$ 的另外一个好处



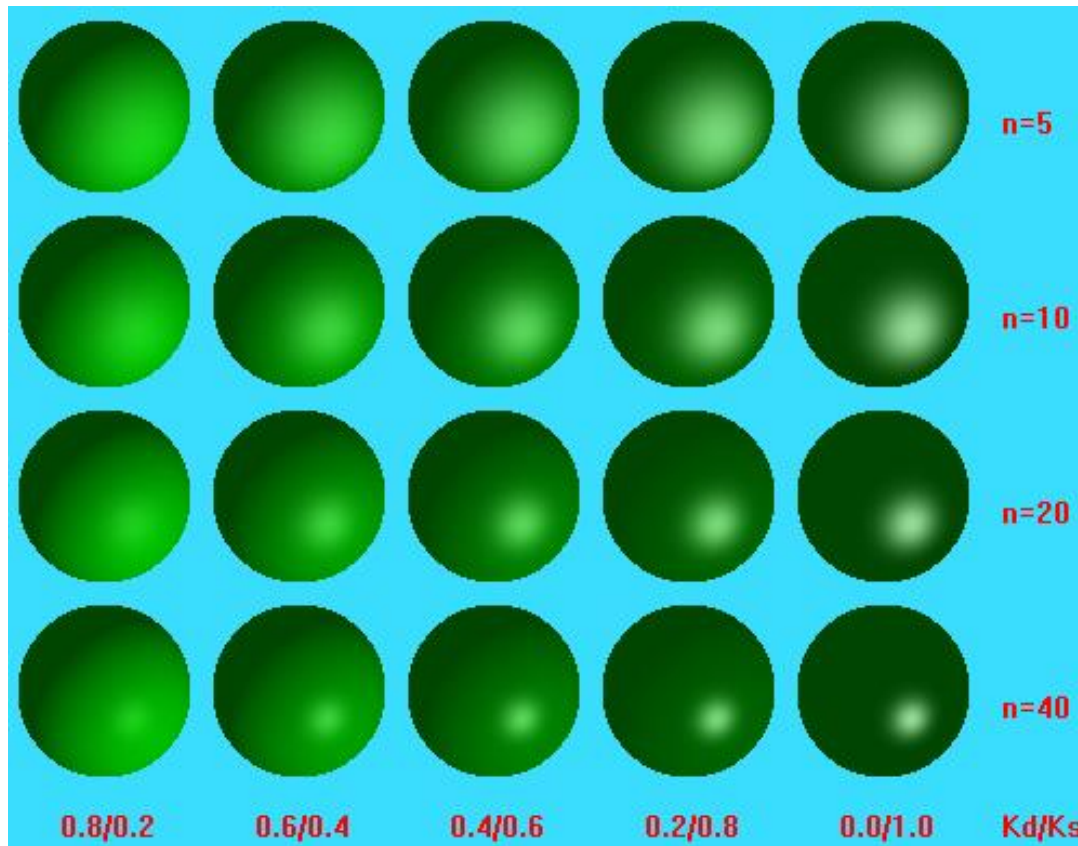
当使用反射光线和视线的夹角时，这个夹角可能大于90度，使得镜面反射的分量为负，被置零，出现了截断现象

Phong-Blinn shading

- 不用 $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha$ 的另外一个好处



Phong-Blinn shading



([Demo](#) video3)

球面的着色

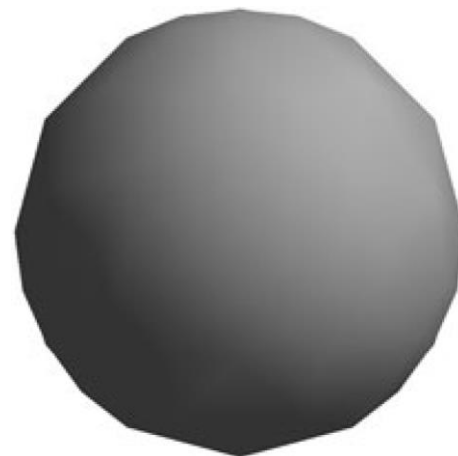
- 球面的着色

- 多边形离散化模型
- Blinn-Phong光照模型
- 计算多边形法向



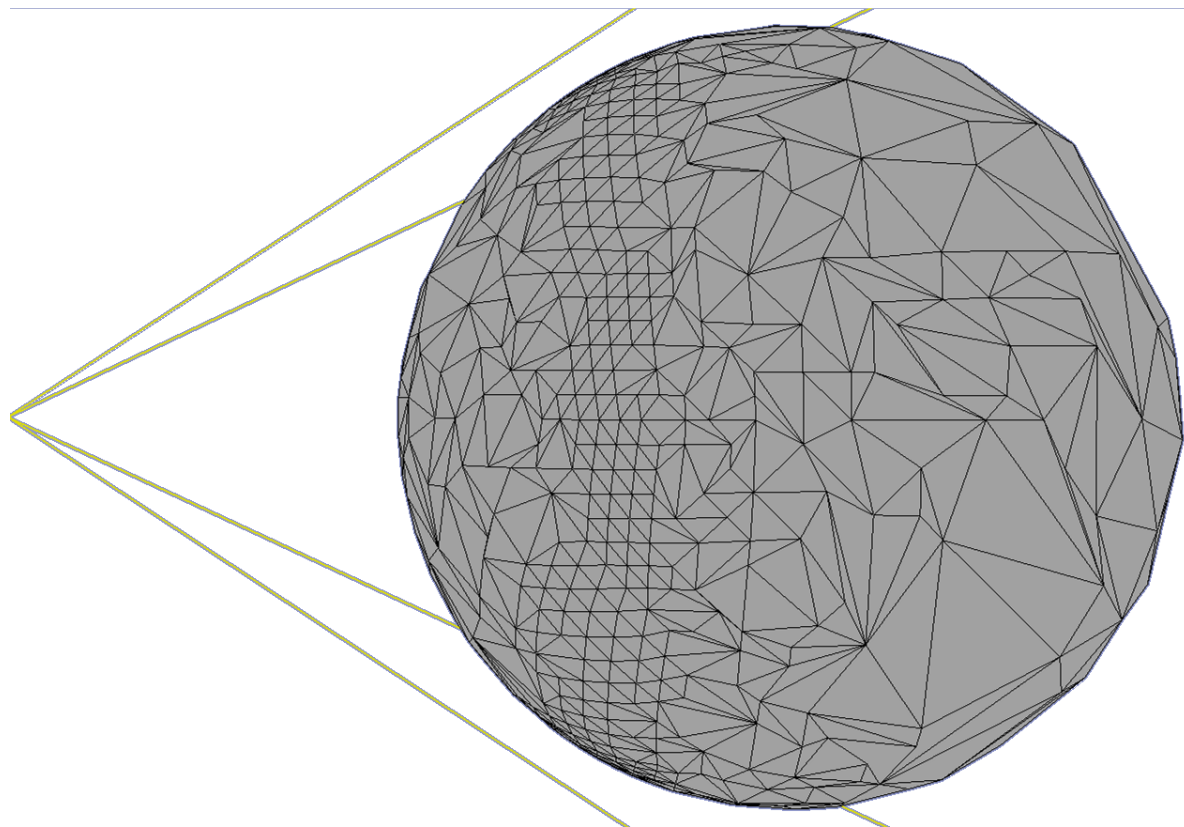
- 着色的光滑性

- 球面内部平面片的光滑程度取决于着色方式
- 但仍能够观察到轮廓边缘(silhouette)
- 解决方案?



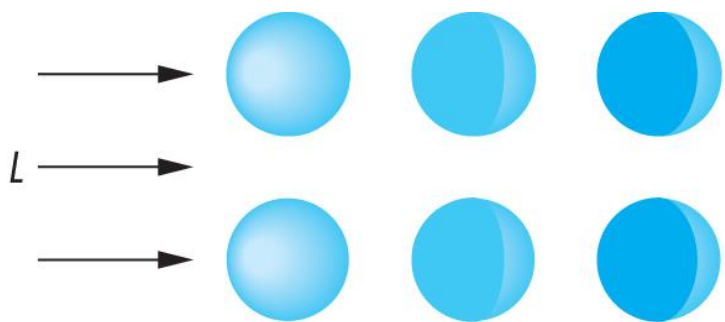
轮廓边缘

- 在轮廓边缘附近进行进一步细分：



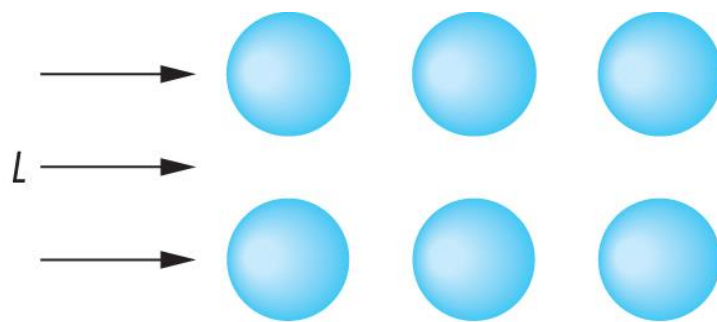
局部光照模型的局限性

- 如果使用局部光照模型，场景中每个物体是独立的
- 但是，物体间可能会存在光线遮挡、反射成像的情况，并产生阴影



(a)

全局光照模型



(b)

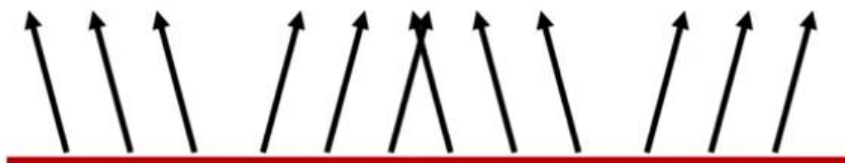
局部光照模型

Normal Mapping

法向映射

法向

- 渲染的结果取决于法向
- 如果我们改变一下形状表面的法向：



Normal mapping 的两种 map



bump map

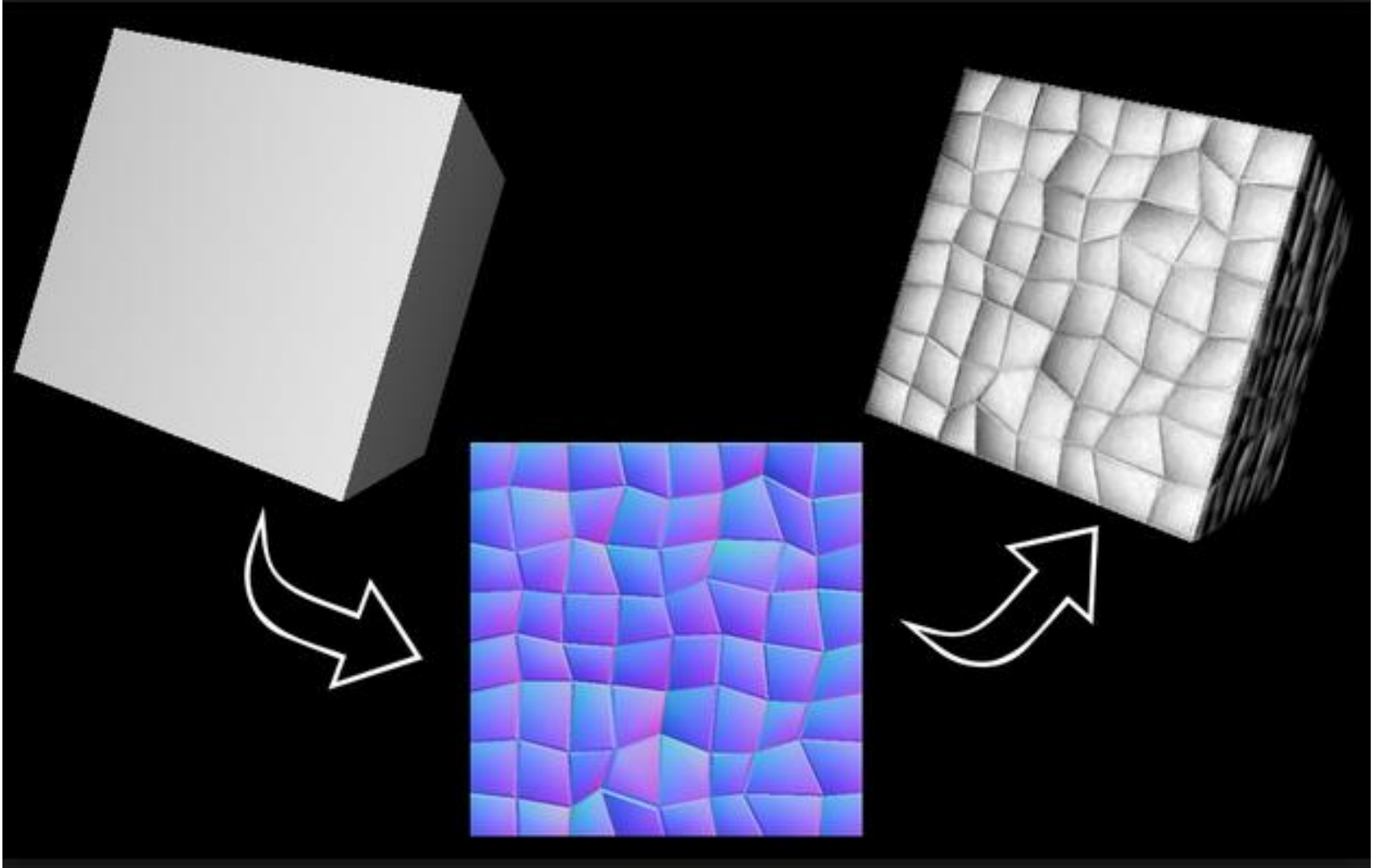


normal map

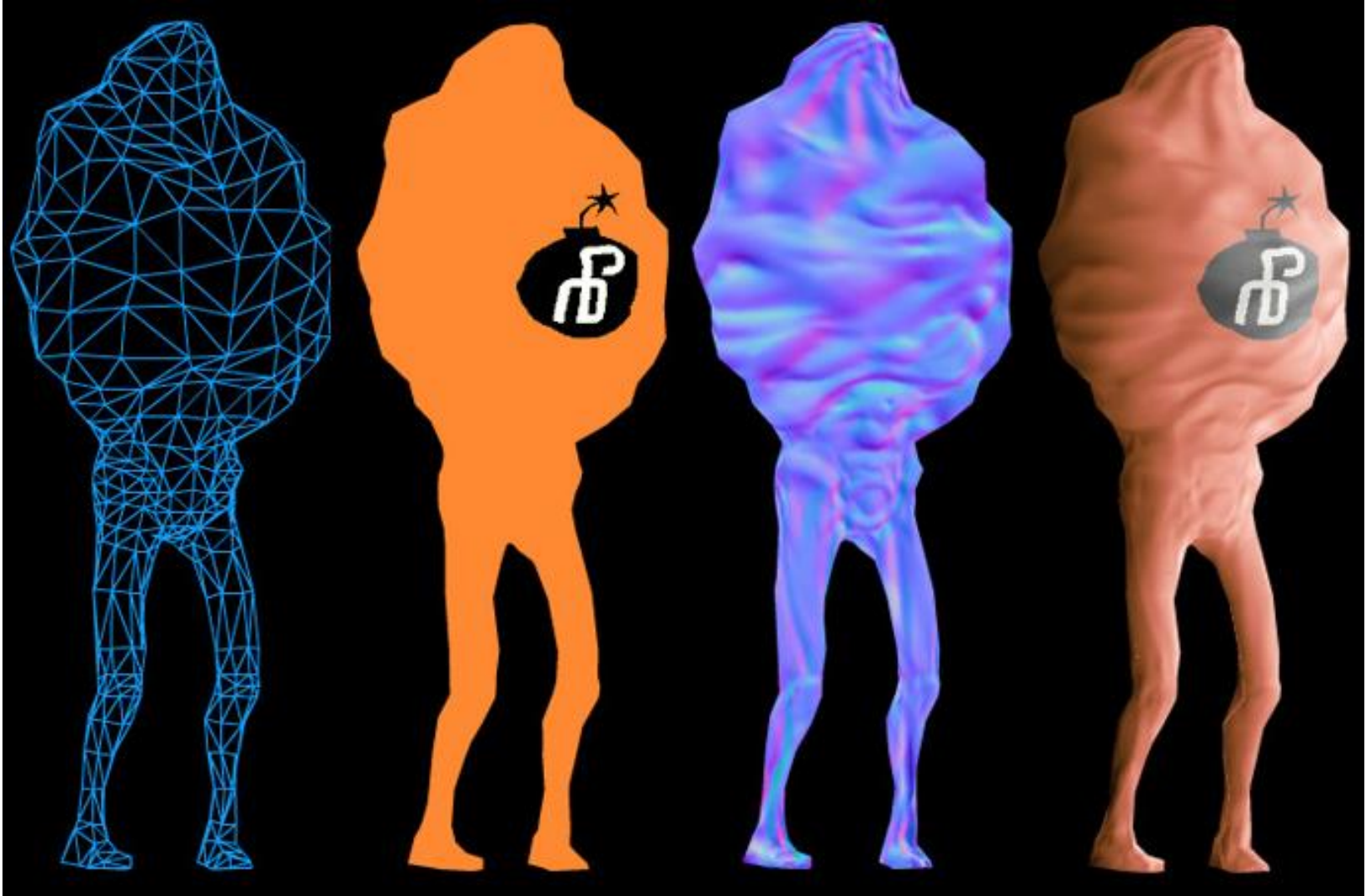
存高度（由逻辑上的高度计算法线）

存法线

Normal mapping



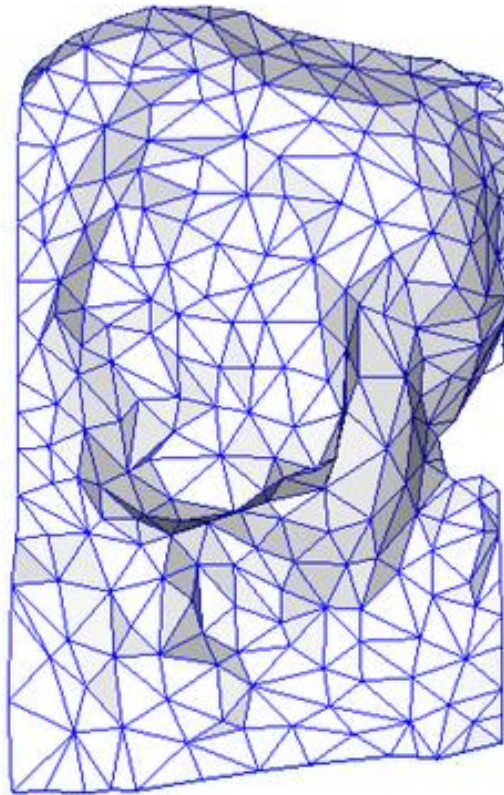
Normal mapping



Normal mapping



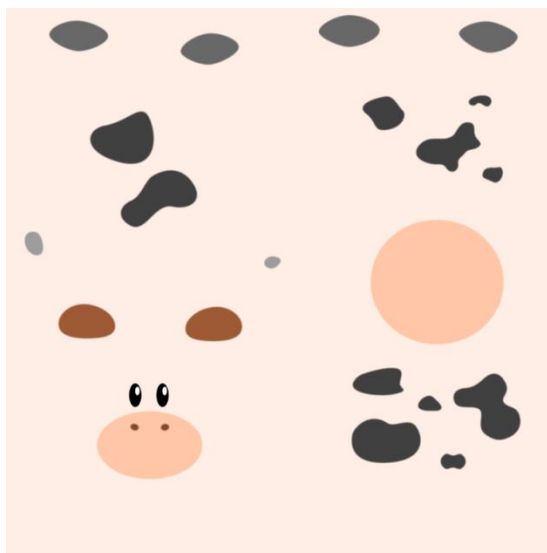
original mesh
4M triangles



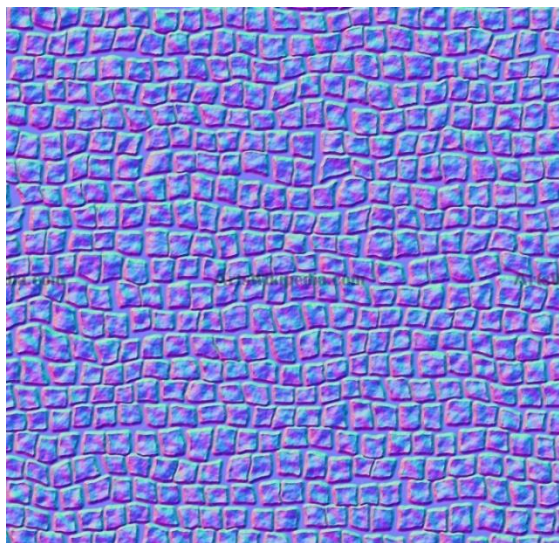
simplified mesh
500 triangles



simplified mesh
and normal mapping
500 triangles



Texture Mapping



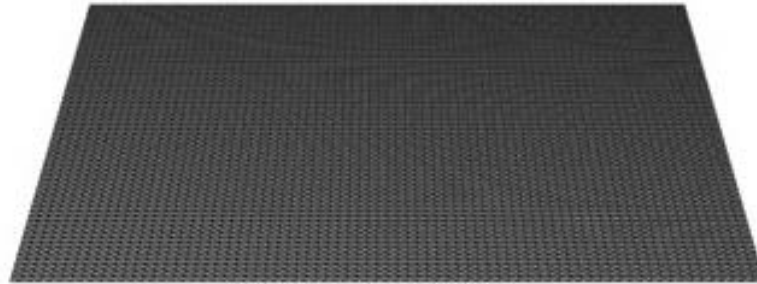
Normal Mapping

Displacement Mapping

偏置映射



Displacement mapping



ORIGINAL MESH

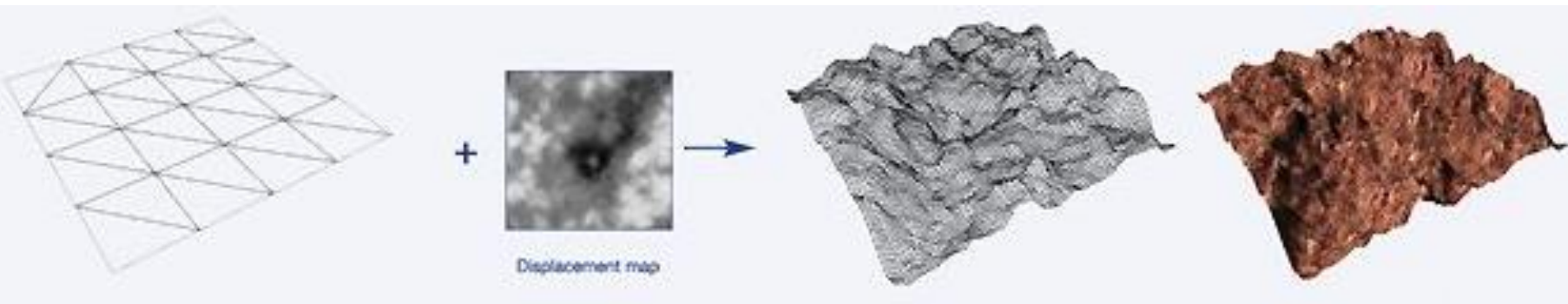


DISPLACEMENT MAP



MESH WITH DISPLACEMENT

Displacement mapping



Displacement mapping



比较



Base
Model



Bump
Mapping



Displacement
Mapping