



合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

第4讲：真实感图形绘制

吴文明

计算机与信息学院







合肥工业大学

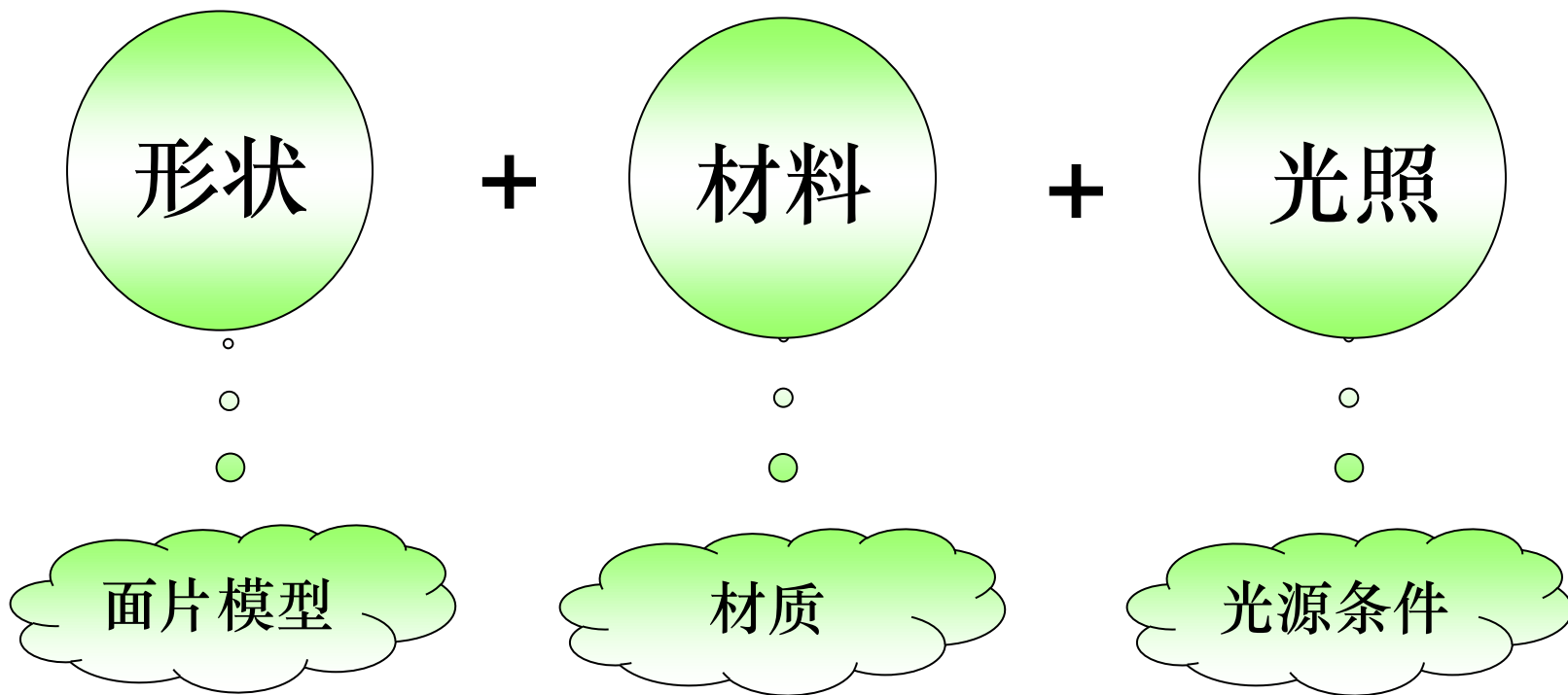
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

导论





真实感图形绘制：通过综合利用数学、物理学、计算机以及心理学等知识在计算机图形输出设备上绘制出能够以假乱真的美丽景象。





- **光照模型**就是用于计算几何物体表面上任一点上的光亮度和色彩组成的数学计算公式。
- **光照模型**就是用数学方法来描述现实世界中的光照情况。
 - ✓ 1967年, Wylie等人第一次在显示物体时加进光照效果。
 - ✓ 1970年, Bouknight在Comm.ACM上发表论文, 提出第一个光反射模型。
 - ✓ 1971年, **Gourand**在IEEE Trans. Computers上发表论文, 提出漫反射模型加插值的思想。
 - ✓ 1975年, **Phong**在Comm.ACM上发表论文, 提出图形学中第一个有影响的光照明模型。



- 基本概念
- 局部光照模型
- 全局光照模型
- 多面体的明暗处理
- 阴影和表面细节



合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

基本概念



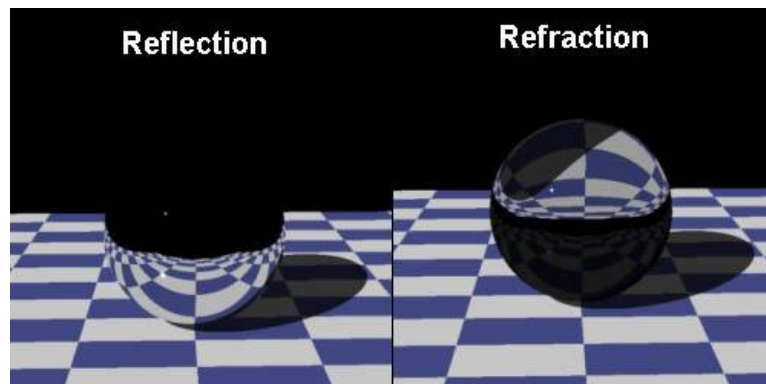
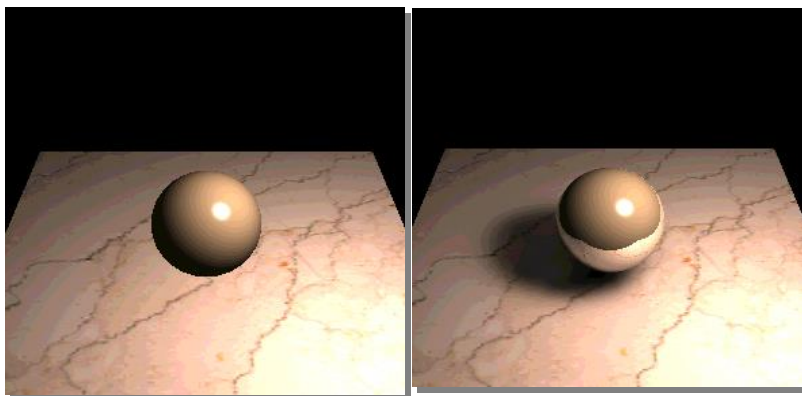


光强（度）：描述物体表面朝某方向辐射光的颜色，它是既能表示光能大小又能表示其色彩组成的物理量。

光照模型：主要用于物体表面某点处的光强度计算

局部光照模型：光强仅与被照明的物体和光源有关

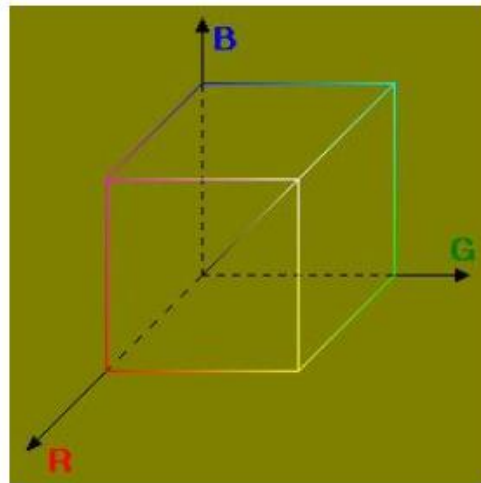
全局光照模型：光强与场景中任一点都相关





颜色模型：颜色空间或彩色系统，用于指定颜色的描述规范。在颜色模型中，由于大多数颜色使用三个分量进行描述，因此颜色模型的建立可以看成是一个三维的坐标系，其中的每个空间点表示某种特定的颜色。

- RGB模型
- HSI模型
- HSV模型





合肥工业大学

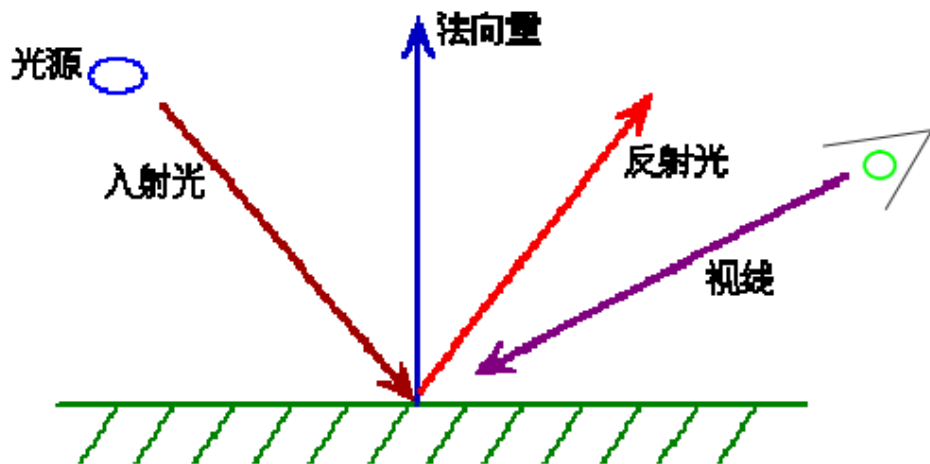
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

局部光照模型





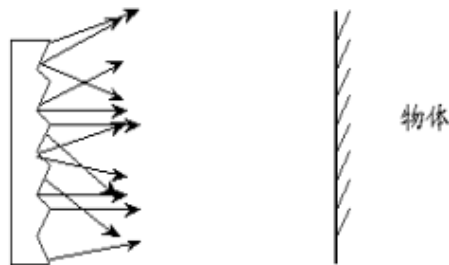
反射定律：入射角等于反射角，而且反射光线、入射光线与法向量在同一平面上。





漫反射光：光线射到物体表面上后（比如泥塑物体的表面，没有一点镜面效果），光线会沿着不同的方向等量的散射出去，这种现象称为漫反射。漫反射光在不同方向都是一样的。

漫反射光均匀向各方向传播，与视点无关，它是由表面的粗糙不平引起的。



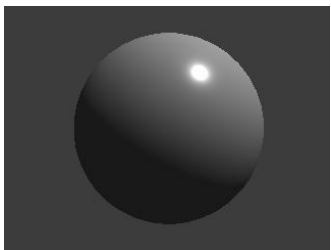
镜面反射光：一束光照射到一面镜子上或不锈钢的表面，光线会沿着反射光方向全部反射出去，这种叫镜面反射光。



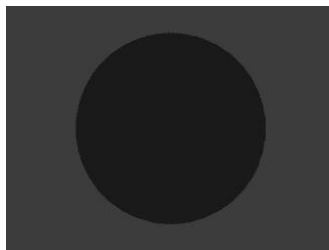
局部光照模型：假定光是点光源，物体是非透明物体，且表面光滑，透射光和散射光将近似于零。

局部光照模型中只**考虑反射光**的作用

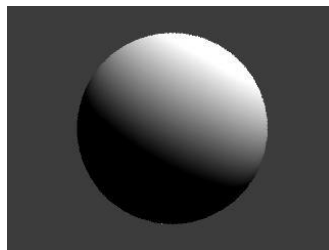
反射光包括**环境光**（Ambient Light）、**漫反射光**（Diffuse Light）和**镜面反射光**（Specular Light）



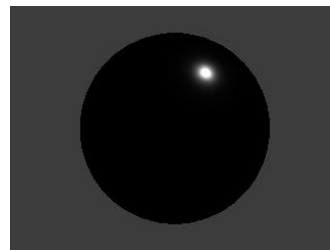
最后结果



环境光



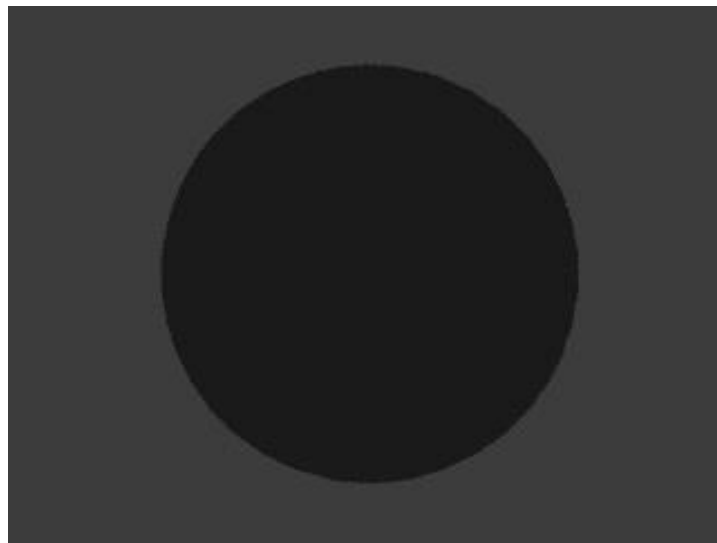
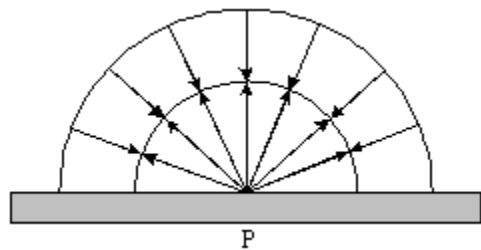
漫反射光



镜面反射光



- 照射在物体上的光来自各个方向，又均匀地向各个方向反射。
- 近似认为，在同一环境下的环境光是恒定不变的，对任何物体的表面都相等。



P点对环境光的反射强度

环境光的强度

物体表面对环境光的反射系数

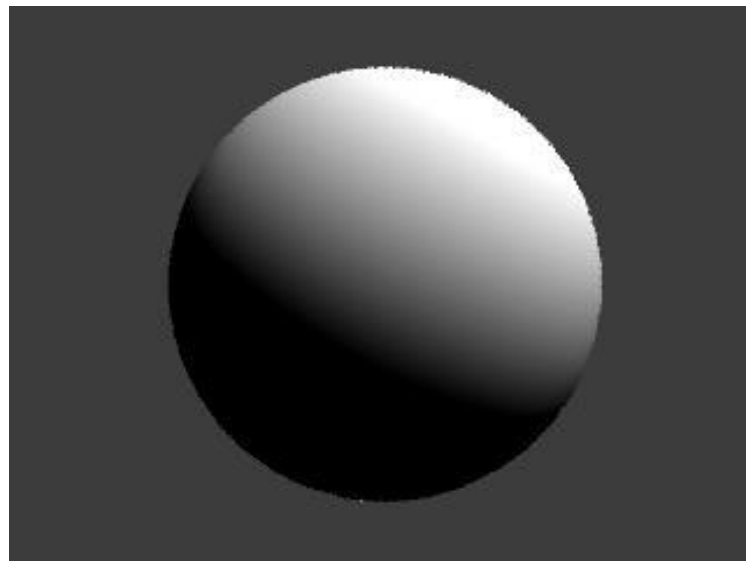
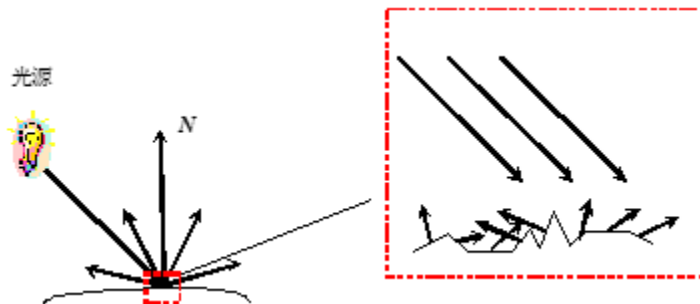
$$I_e = I_a K_a$$



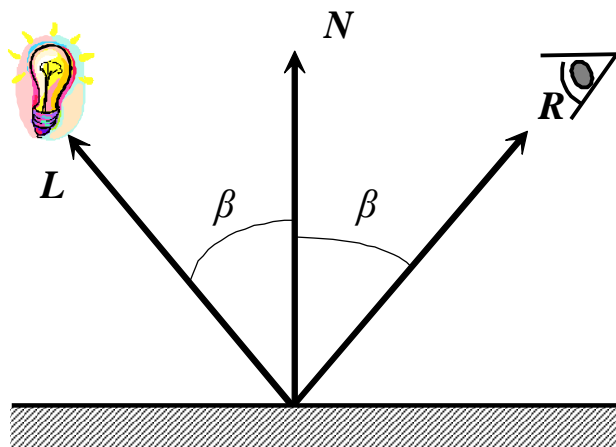


- 在点光源的照射下，物体表面的不同部分亮度不同，亮度的大小依赖于物体表面的朝向以及它与点光源之间的距离。
- 漫反射特点：光源来自一个方向，反射光均匀地射向各个方向。

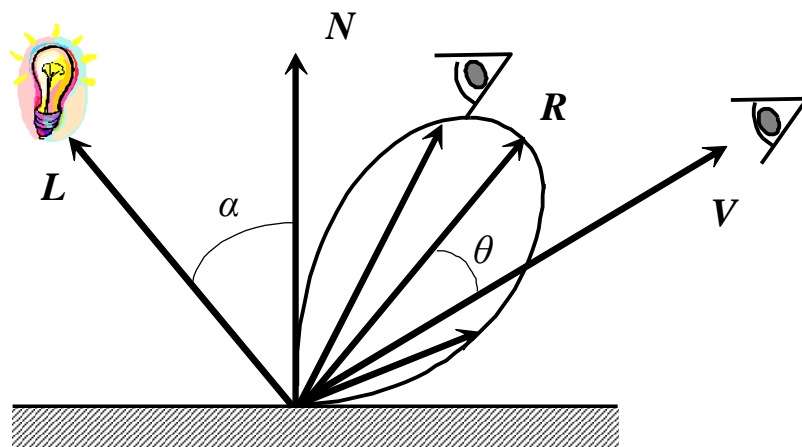
$$I_d = I_p K_d \cos \theta, \theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$$





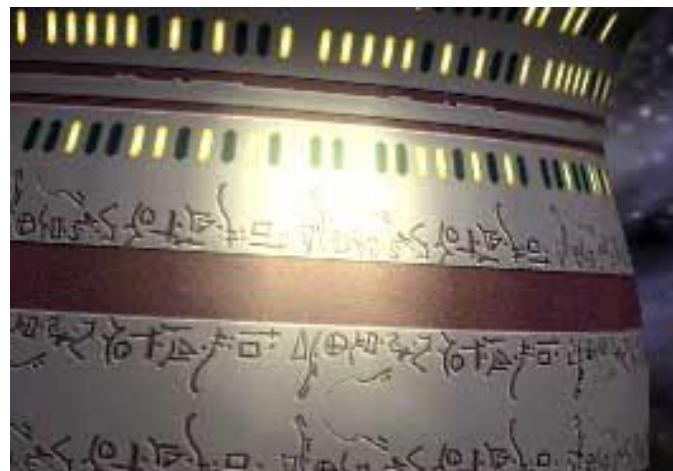


(a)理想高光泽表面（镜面）



(b) 非理想反射面（瓷器、金属）

- 镜面反射光：一种朝向一定方向的反射光，它遵从光的反射定律





镜面反射光：采用余弦函数的幂次来模拟镜面反射光

$$I_s = k_s I_e \cos^n \theta$$

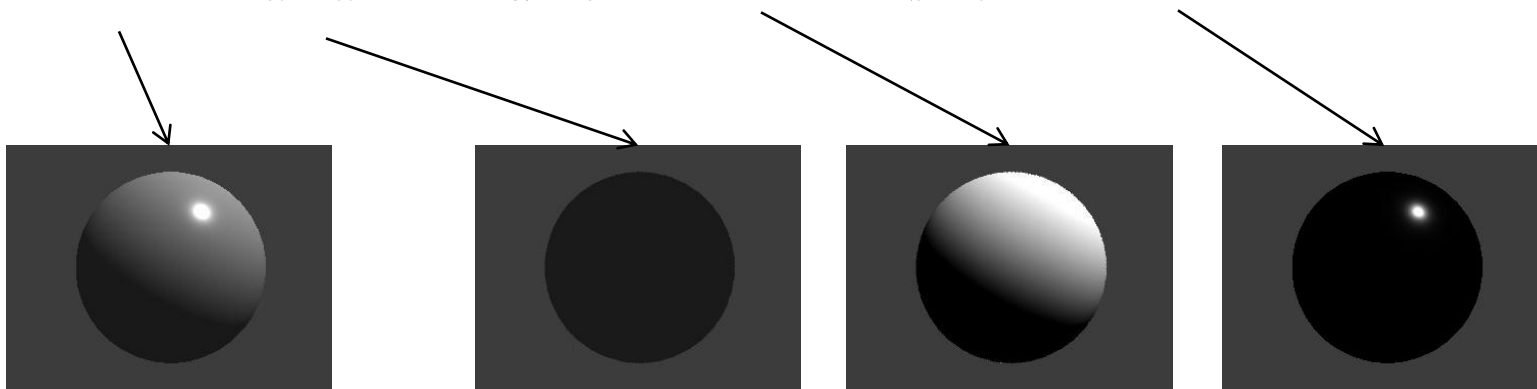
- ✓ I_s : 物体表面镜面反射光亮度
- ✓ I_e : 来自光源的入射光的光亮度
- ✓ θ : 镜面反射方向和视线方向的夹角
- ✓ k_s : 表面的镜面反射率
- ✓ n : 镜面反射光的会聚指数，又称 “高光” 指数





- 最后结果综合了漫反射、镜面反射及泛光反射分量

$$I = K_a I_a + K_d I_e \cos \alpha + k_s I_e \cos^n \gamma$$



- 多光源计算模型

$$I = K_a I_a + \sum_{i=1}^m I_i (K_d \cos \alpha + k_s \cos^n \gamma)$$

Phong光照模型

单一光源照射下Phong光照模型的表达式: $I = I_a k_a + k_d I_l \cos\theta + k_s I_l \cos^n a$

I 景物表面在被照射点处的光亮度

I_a 入射的泛光光强

k_a 景物表面对泛光的反射系数

k_d 景物表面的漫反射率

I_l 点光源所发出的入射光强度

θ 入射光与表面法向之间的夹角

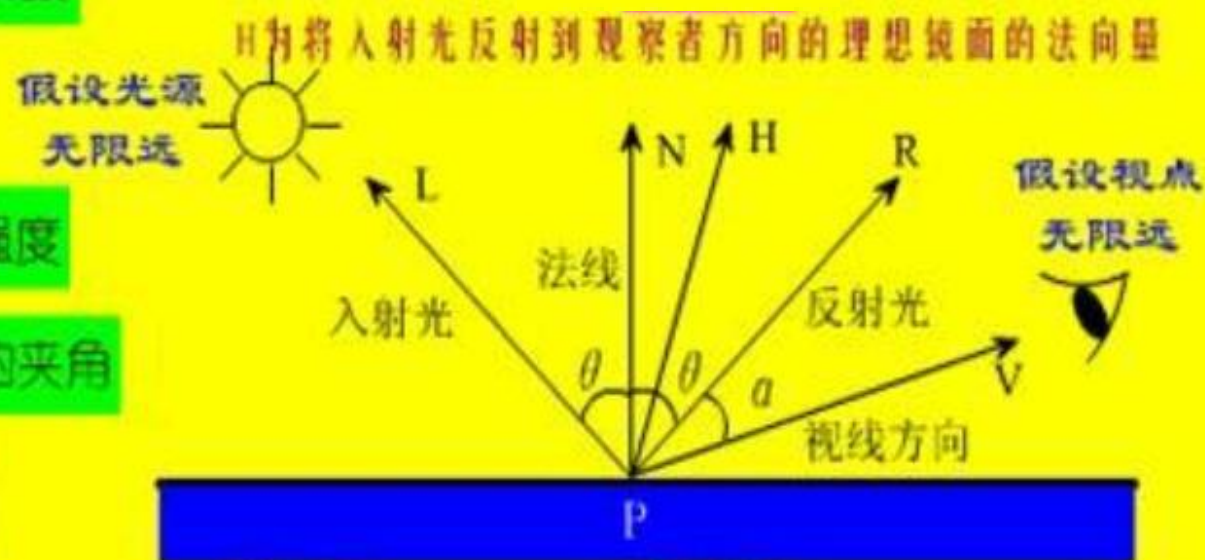
k_s 景物表面的镜面反射率

n 镜面高光指数

a 镜面与反射光线之间的夹角

$L \cdot N$

$V \cdot R$



效果实例



Replay

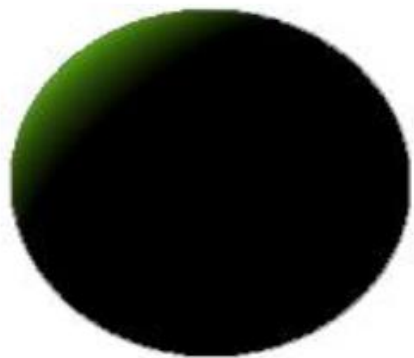


合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

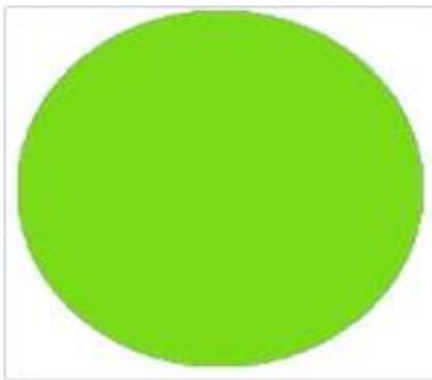
局部光照模型





理想漫反射

+



环境光

+



镜面反射

=



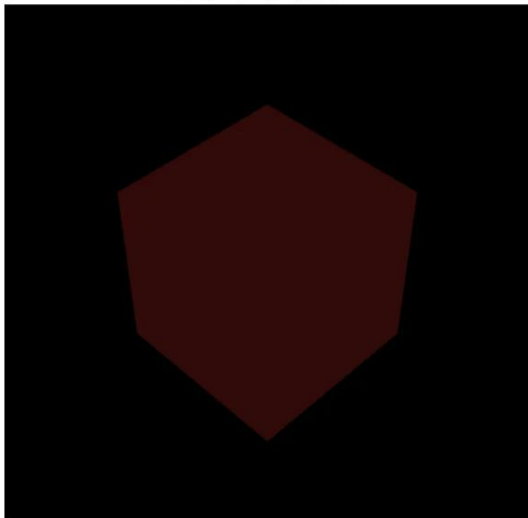


合肥工业大学

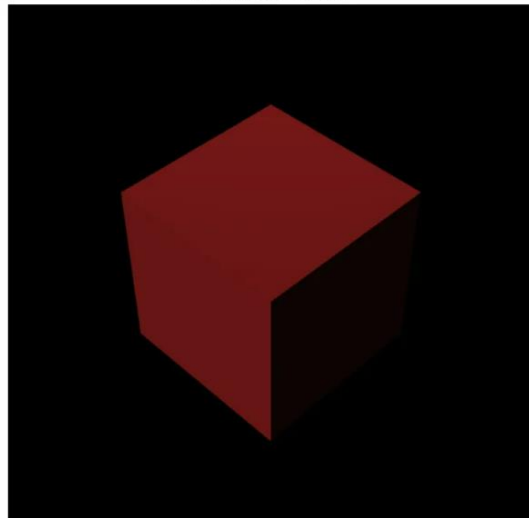
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

局部光照模型

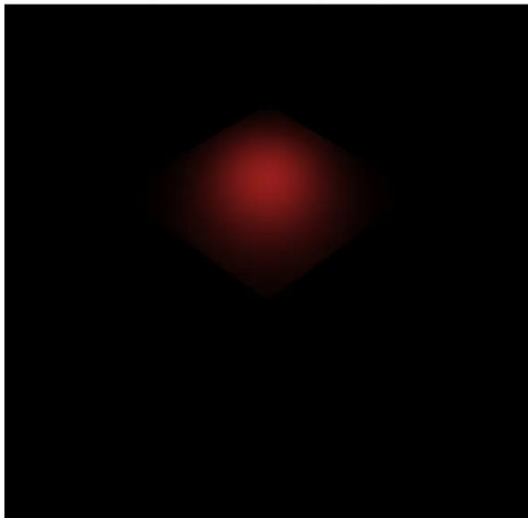
仅环境光



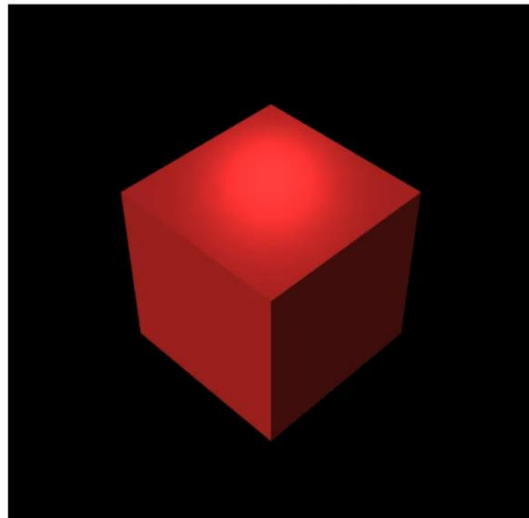
仅漫反射



仅镜面反射光

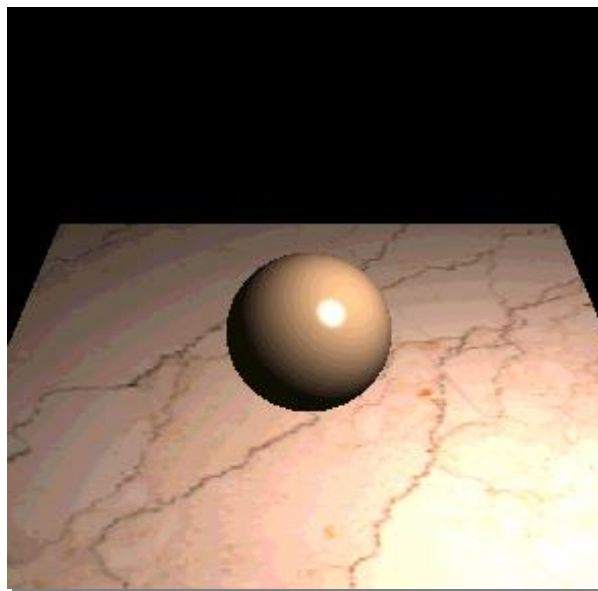


叠加效果



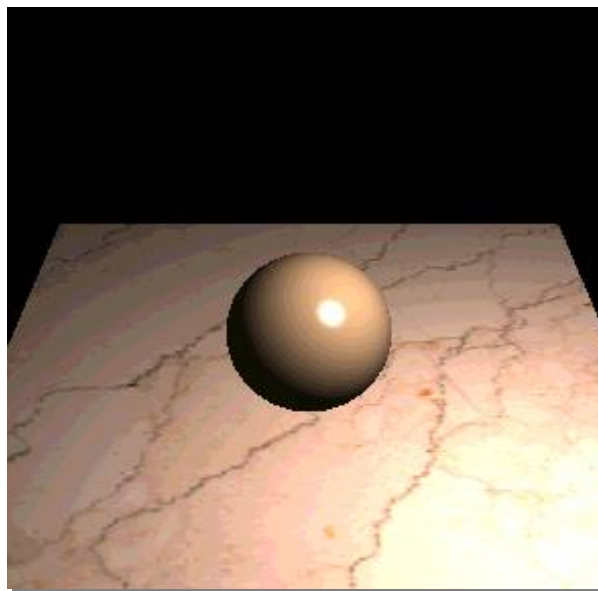


- 泛光模型（环境光）
- Lambert漫反射模型（漫反射光）
- Phong镜面反射模型（镜面反射光）





- 泛光模型（环境光）
- Lambert漫反射模型（漫反射光）
- Phong镜面反射模型（镜面反射光）





合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

全局光照模型



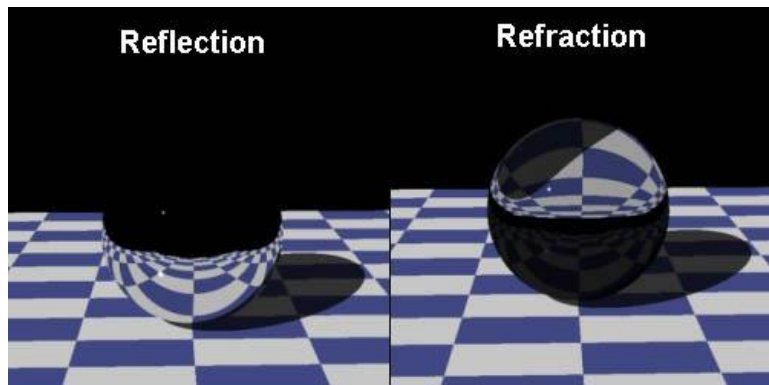
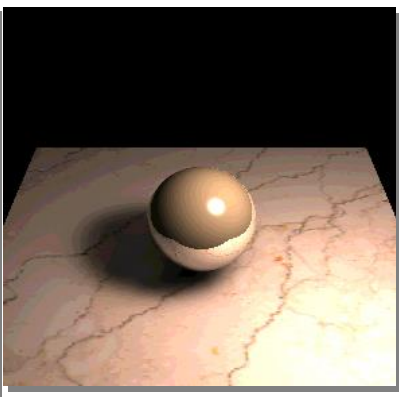
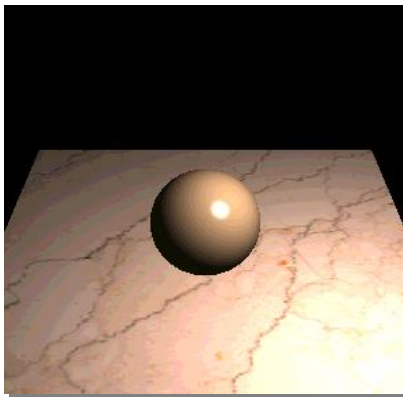


局部光照明模型的局限

- 仅考虑从光源直接发出的光线对物体表面光亮度的贡献
- 没有考虑光线在物体之间的相互反射和透射

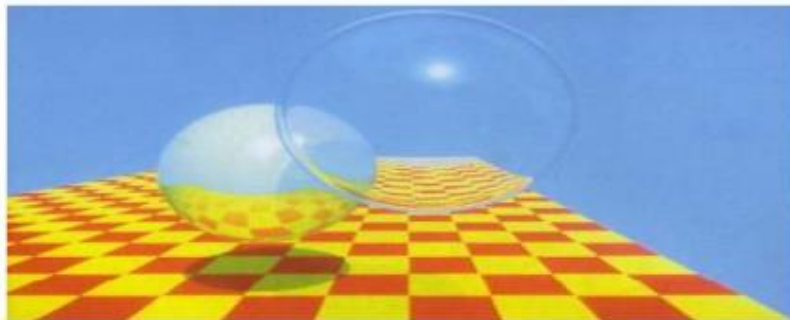
全局光照明模型：Whitted模型

- 可模拟现实世界中景物表面之间的镜面反射和透射现象





1980年Whitted提出了第一个整体光照模型，并给出了一般光线跟踪算法的范例，综合考虑了光的反射、折射、透射和阴影等。被认为是计算机图形领域的一个里程碑。



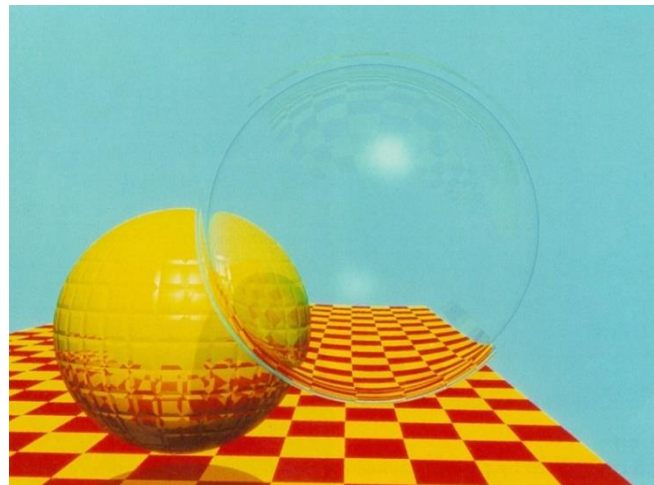
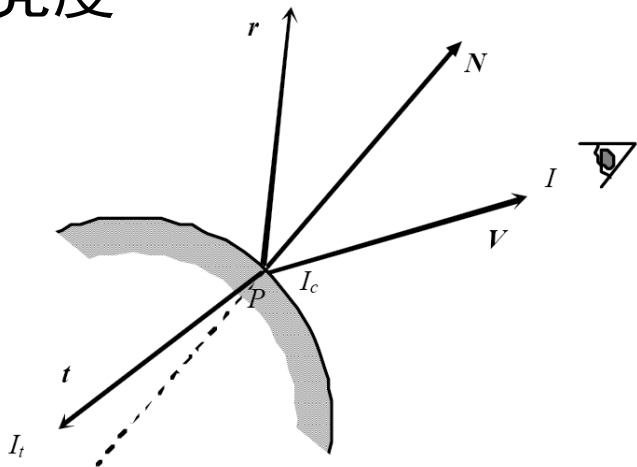
Turner Whitted , An improved illumination model for shaded display, Communications of the ACM, v.23 n.6, p.343-349, June 1980.

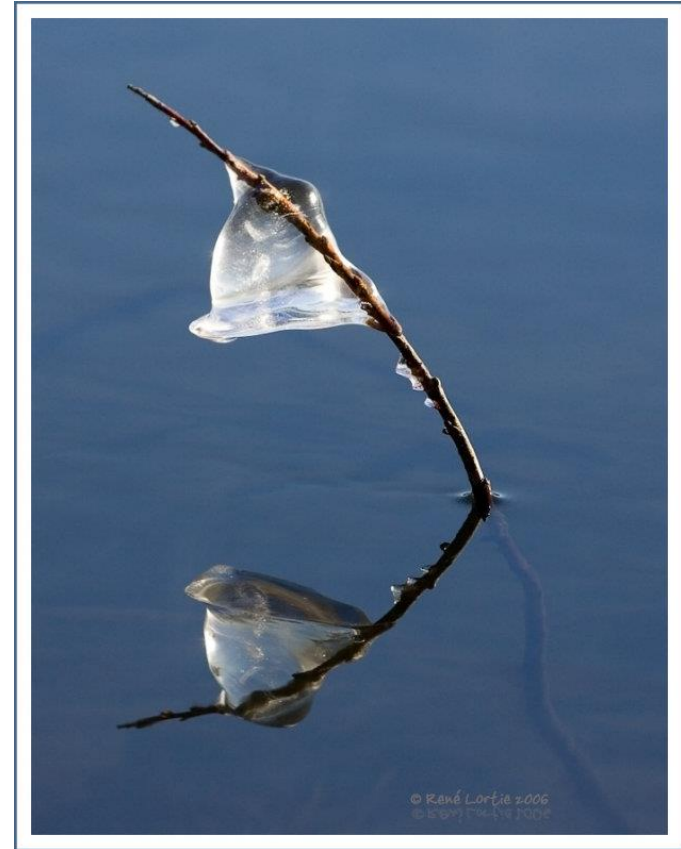
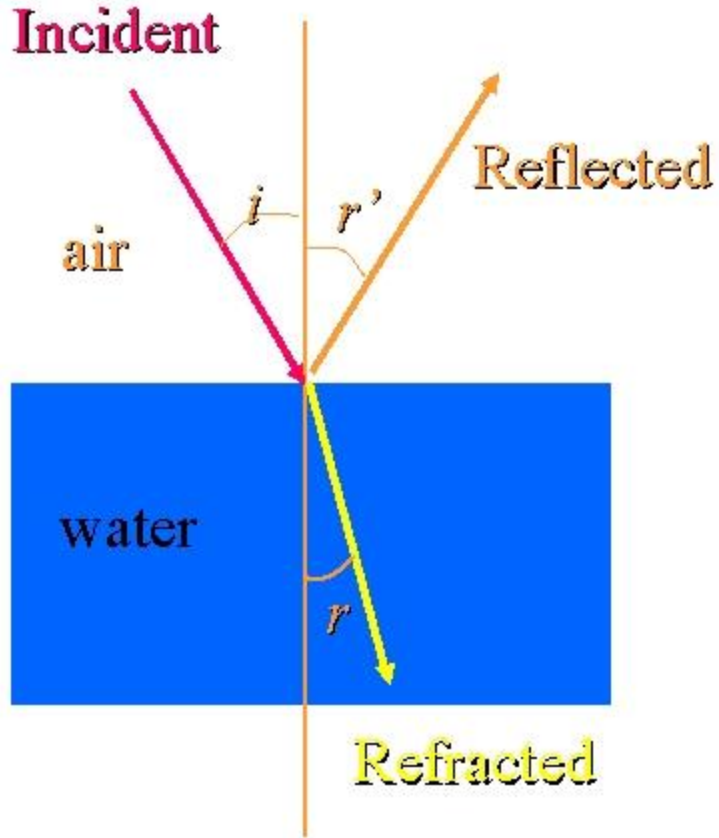
2003年Whitted当选为美国工程院院士。



假设从某一观察方向 V 所观察到的物体表面某点 P 的光亮度的贡献来自于三个方面

- ✓ 由光源**直接照射**引起的反射光亮度
- ✓ **环境镜面反射光**: 镜面反射方向 r 的其他物体反射或折射来的光的亮度;
- ✓ **环境规则透射光**: 透射方向 t 的其他物体反射或折射来的光的亮度



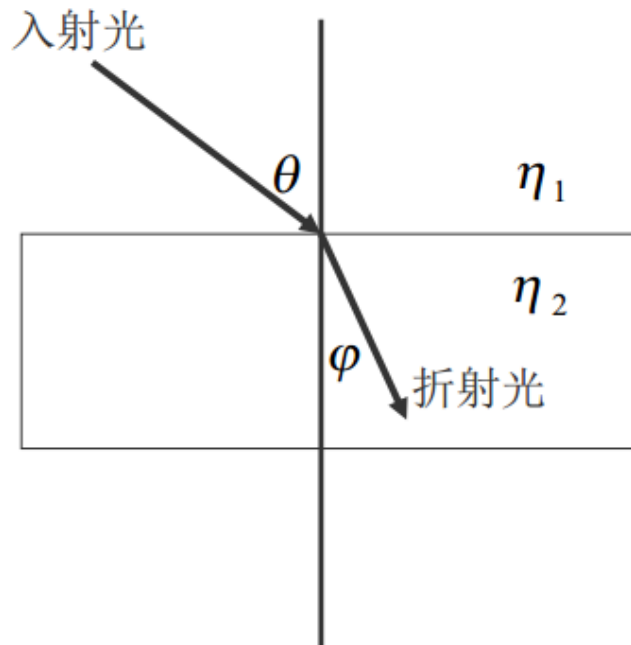




折射定律：折射线在入射线与法线构成的平面上，折射角与入射角满足：

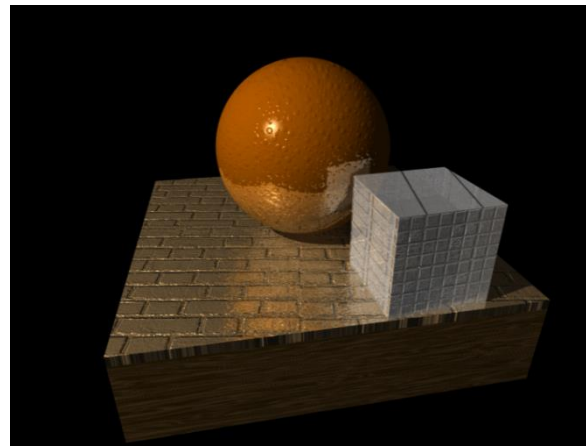
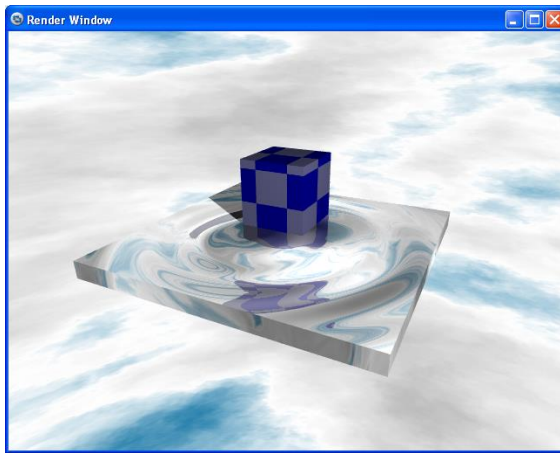
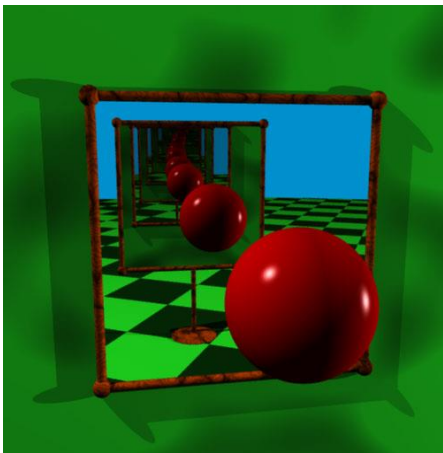
$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\sin \varphi}{\sin \theta}$$

其中： η_1 、 η_2 分别是入射光线在空气，物体中的折射率， θ 和 φ 分别是入射角和折射角。





- 光线追踪算法
- 辐射度方法
- 光子映射方法





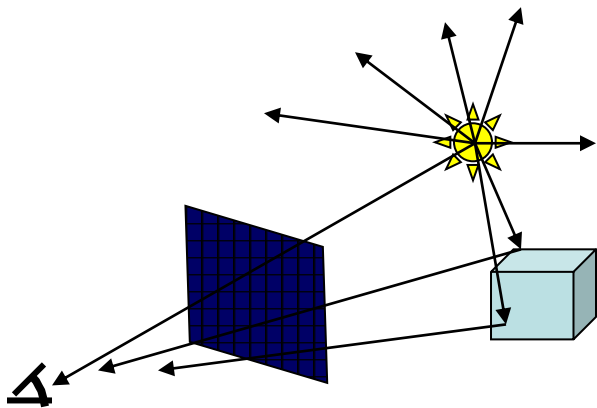
- 模拟光的射线
- 产生自然的照明效果
- 柔和的阴影



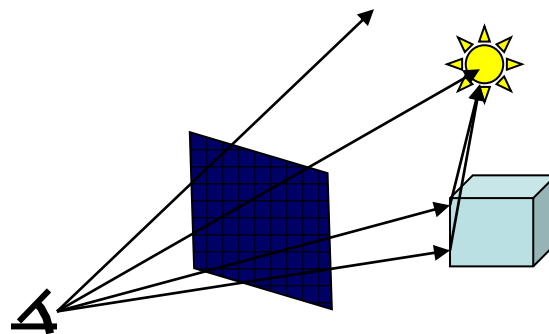


- 模拟光的射线
- 产生自然的照明效果
- 景深、运动模糊



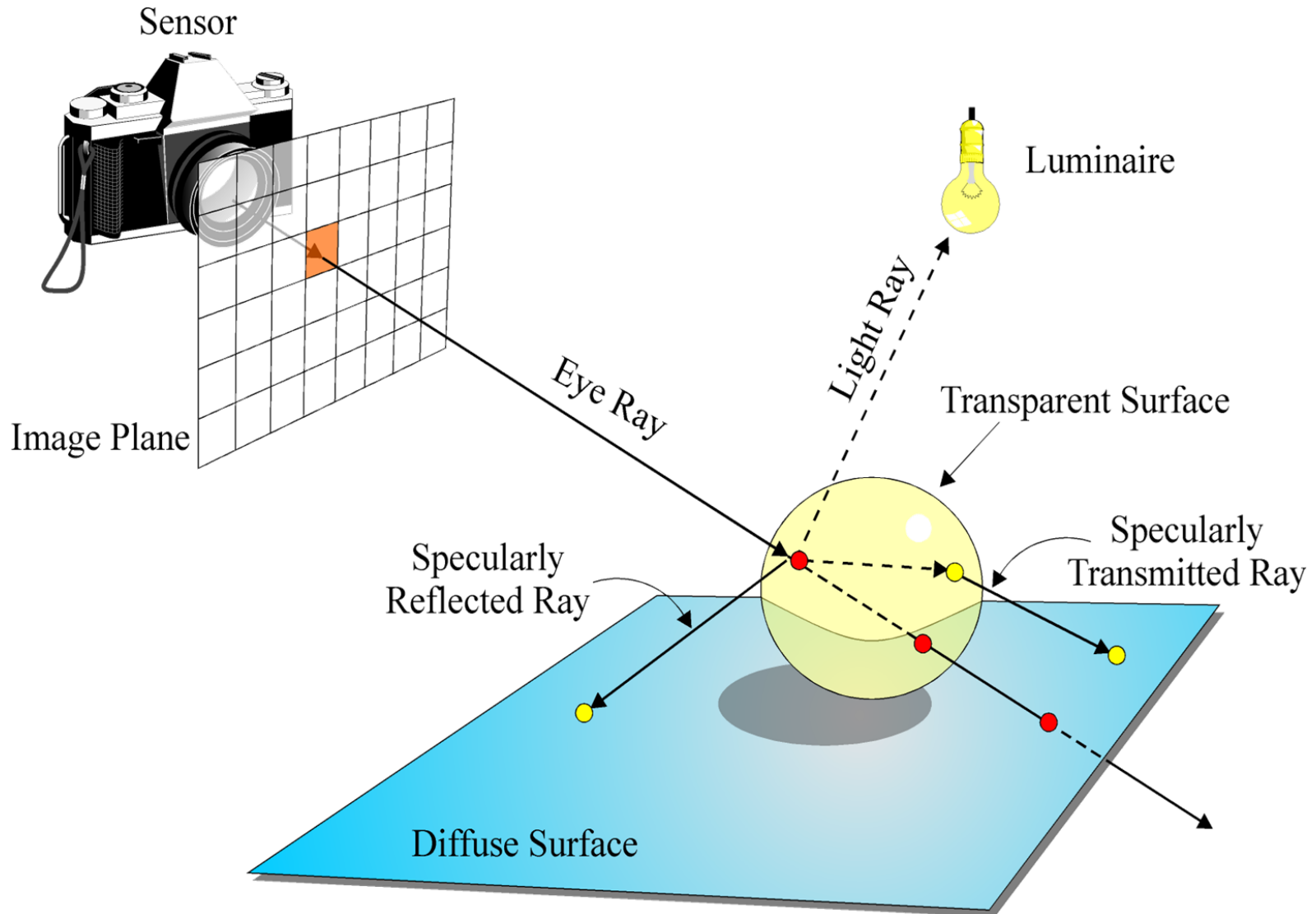


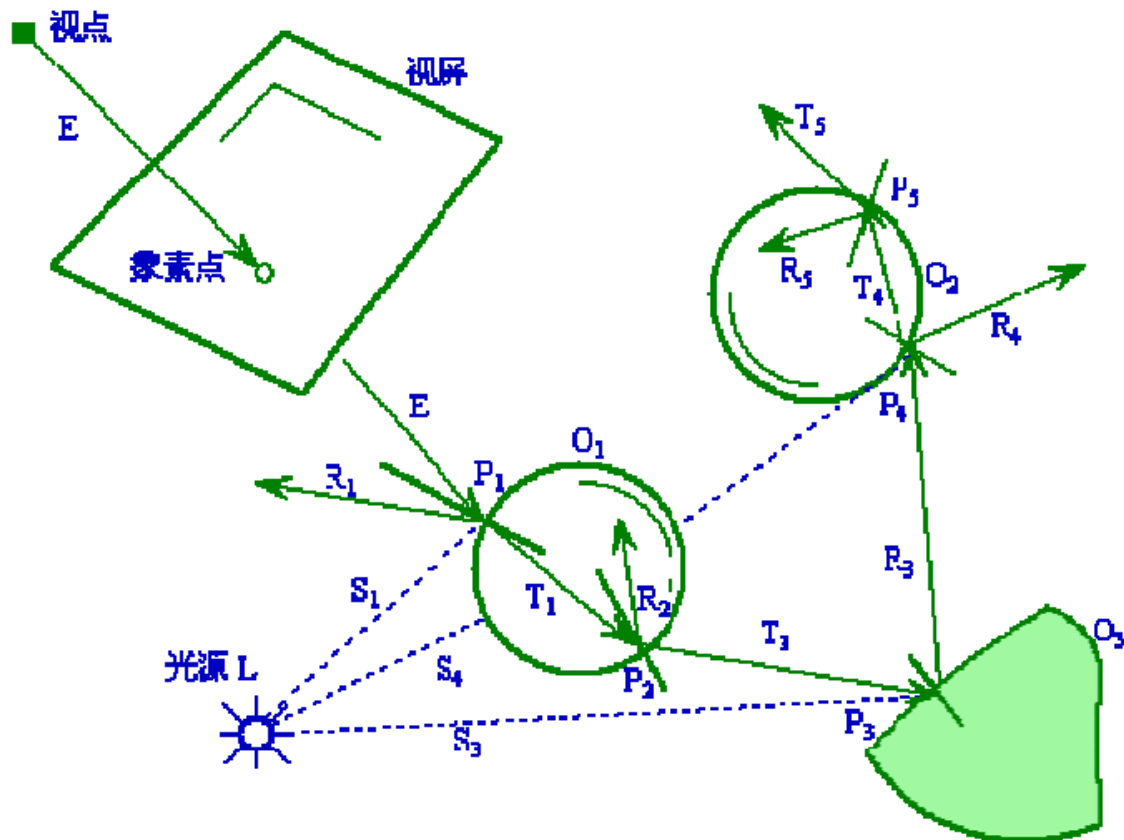
从光源出发的光线追踪



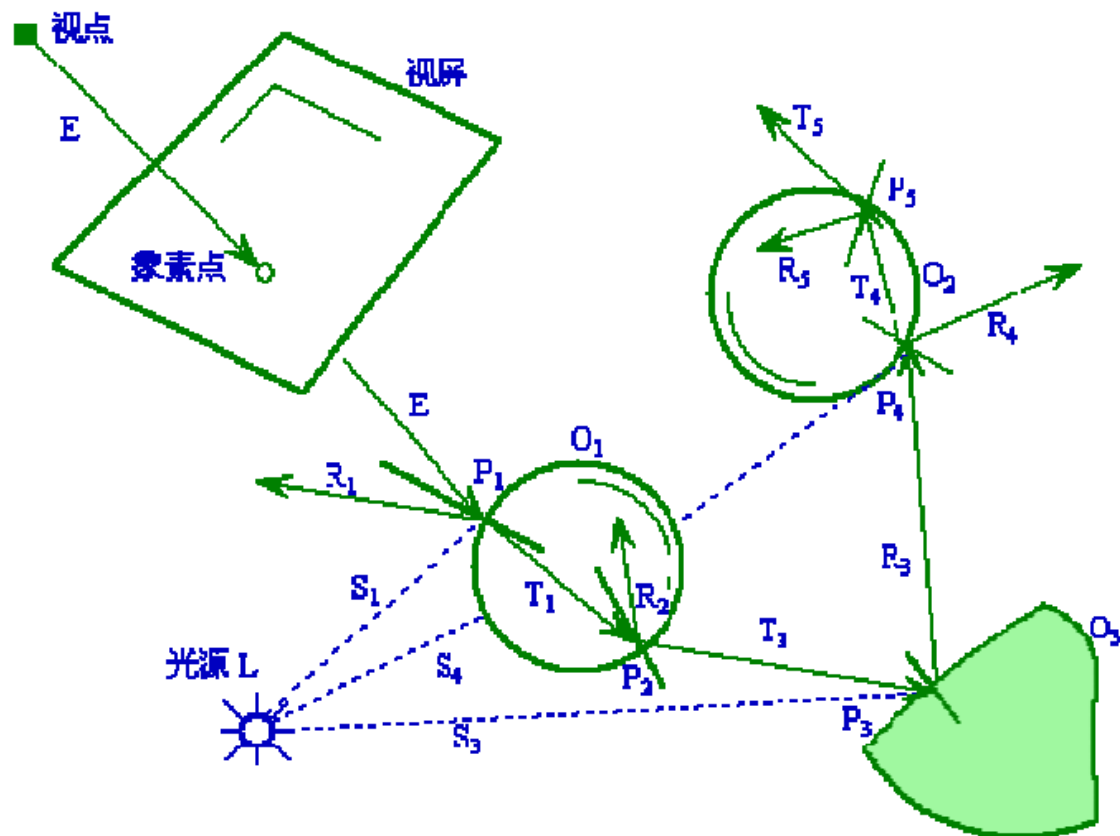
从眼睛出发的光线追踪

从光源出发进行光线追踪，会有很多光线无法进入成像平面，造成大量资源浪费. 所以经典的光线追踪算法是从观察点（眼睛）出发追踪每一条观察点到成像平面上的射线.

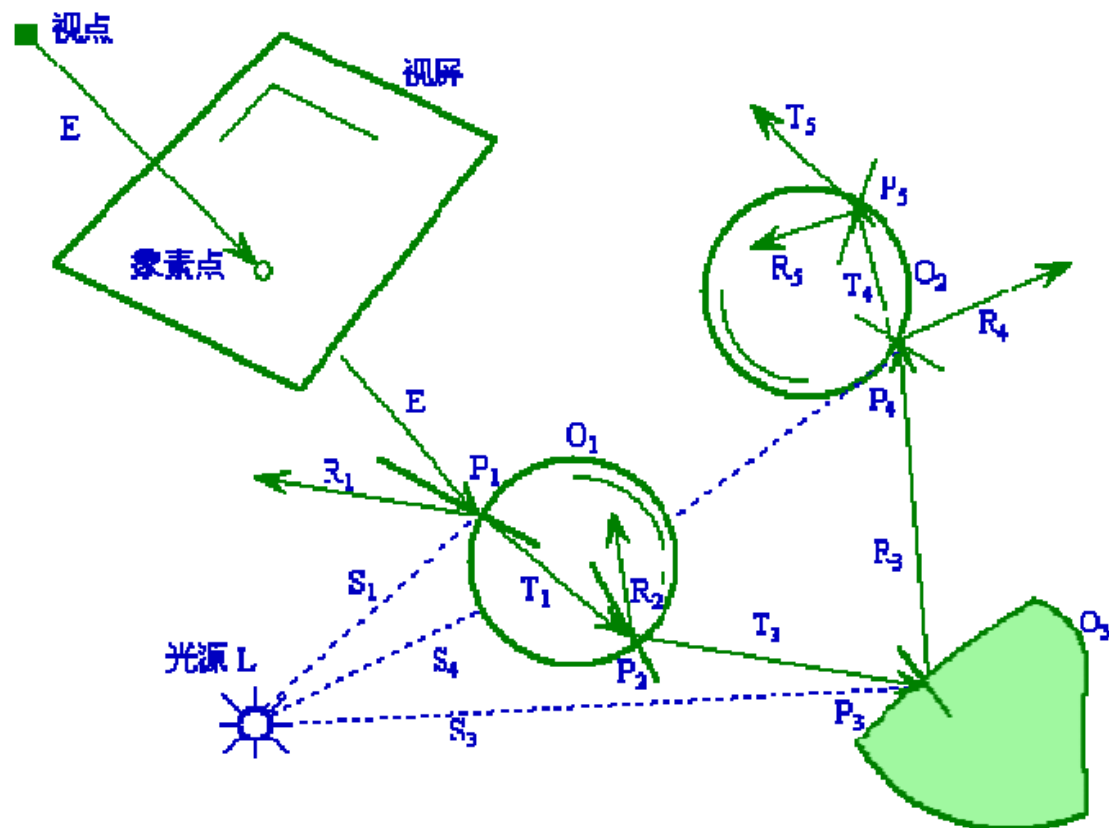




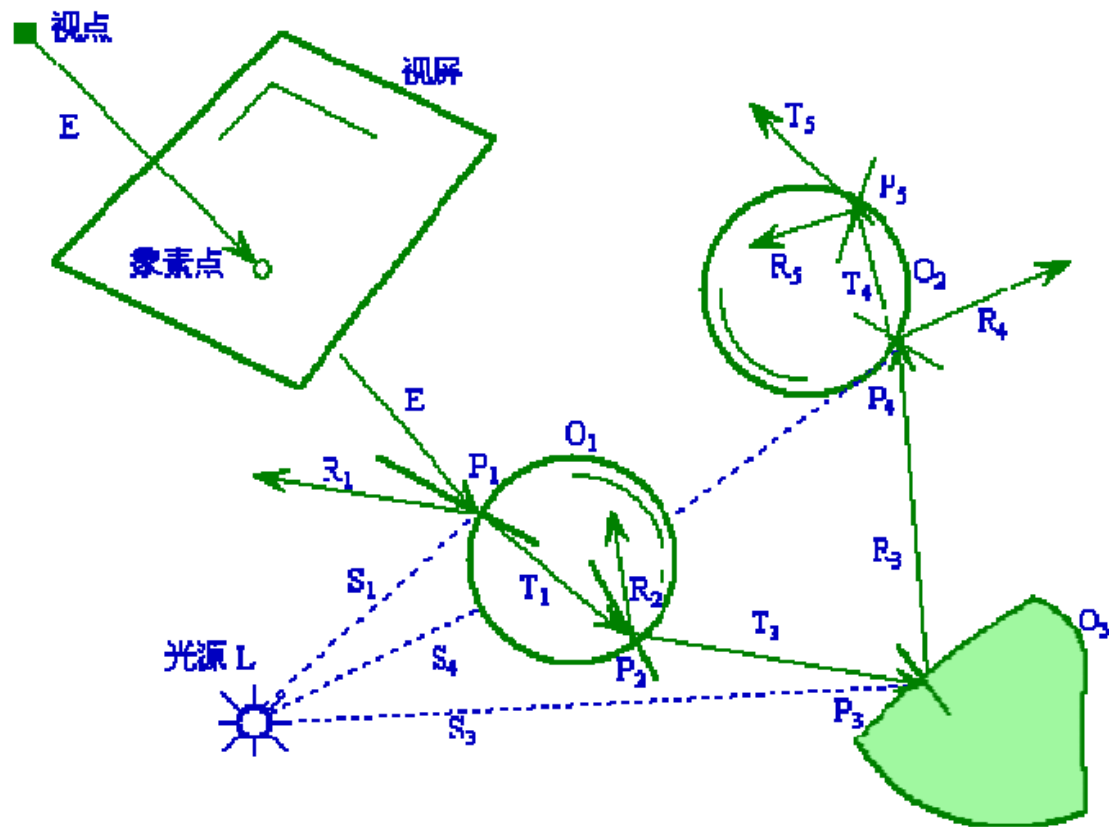
在这个场景中，
有一个点光源 L ，两
个透明体 O_1 与 O_2 ，
一个不透明体 O_3 。



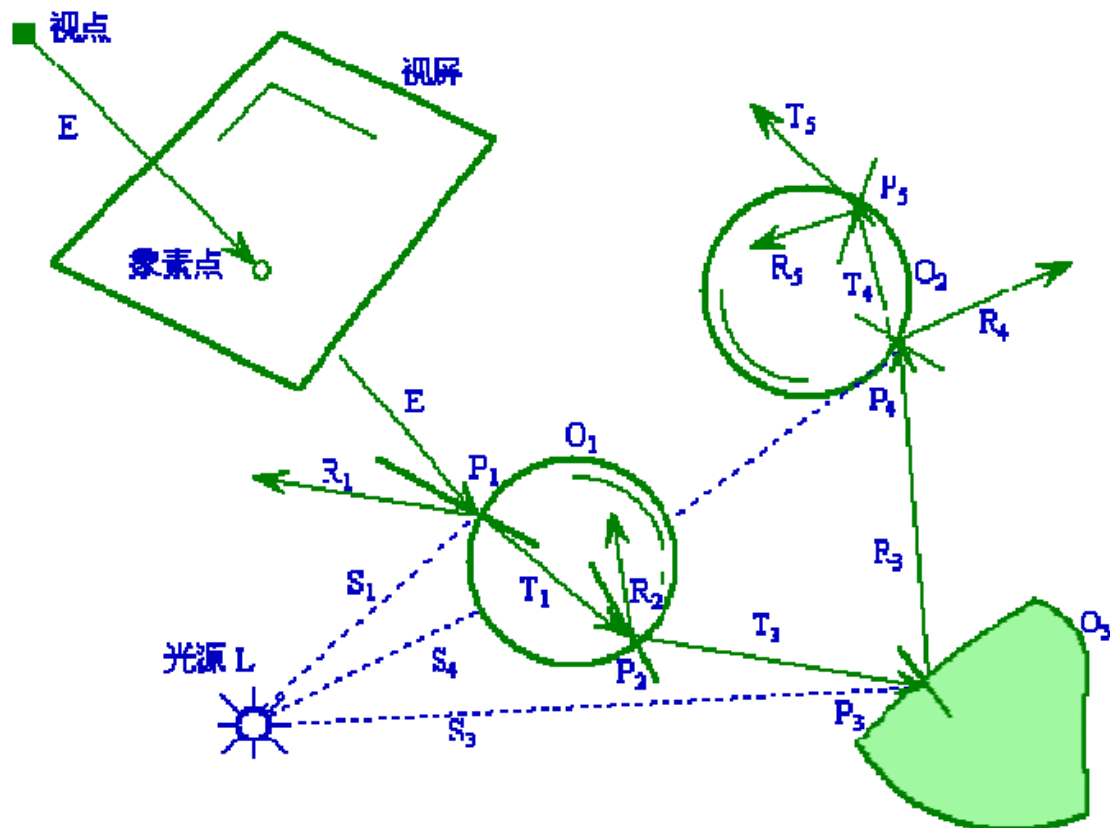
首先，从视点出发经过视屏一个像素点的视线 E 传播到达球体 O_1 ，交点为 P_1 。从 P_1 向光源 L 作一条阴影测试线 S_1 ，可以发现其间没有遮挡的物体，那么就用局部光照模型计算光源对 P_1 在其视线 E 方向上的光强，作为该点的局部光强；



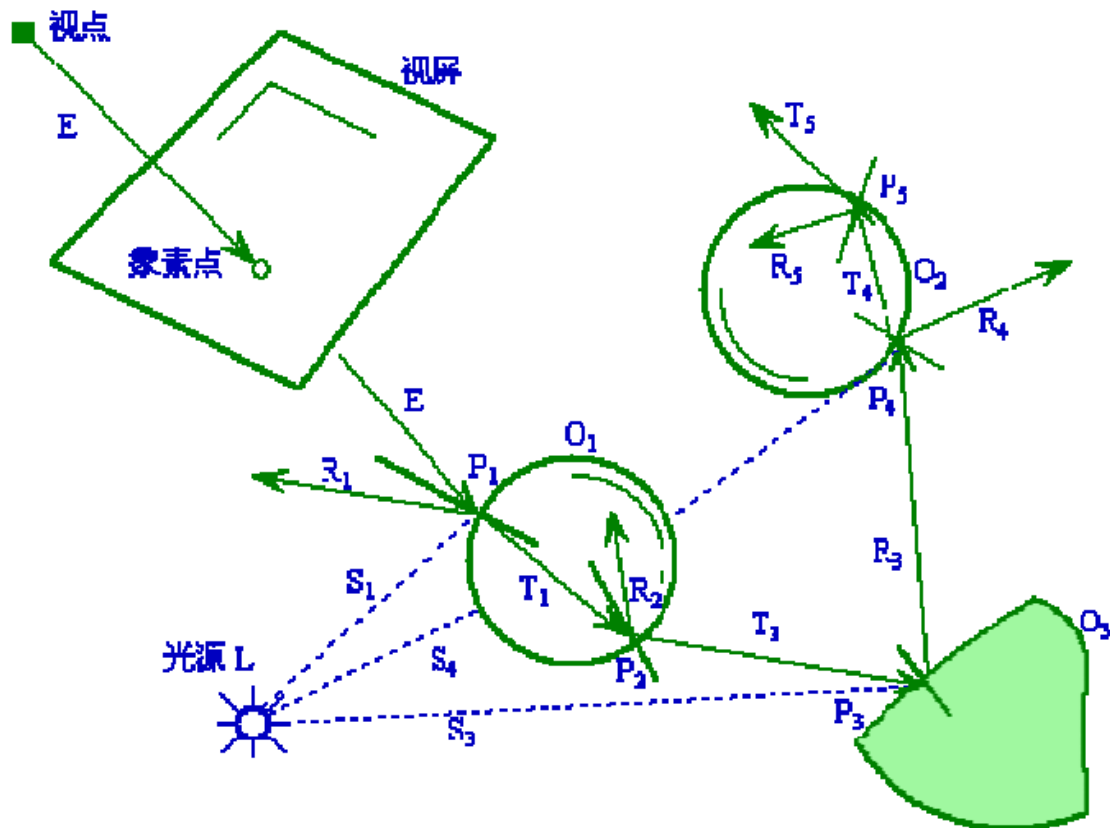
在反射光线 R_1 方向上，没有再与其他物体相交，那么就设该方向的光强为0，并结束这条光线方向的跟踪。然后对折射光线 T_1 方向进行跟踪，计算该光线的光强贡献。



折射光线 T_1 在物体 O_1 内部传播，与 O_1 相交于点 p_2 ，由于该点在物体内部，假设它的局部光强为0。该点处同时产生了反射光线 R_2 和折射光线 T_2 ，在反射光线 R_2 方向，可以继续递归跟踪下去计算它的光强。而对折射光线 T_2 则继续进行跟踪。



T_2 与物体 O_3 交于点 p_3 ，作 P_3 与光源 L 的阴影测试线 S_3 ，没有物体遮挡，正常计算该处的局部光强。由于该物体是非透明的，可以只继续跟踪反射光线 R_3 方向的光强，结合局部光强得到 P_3 处的光强。

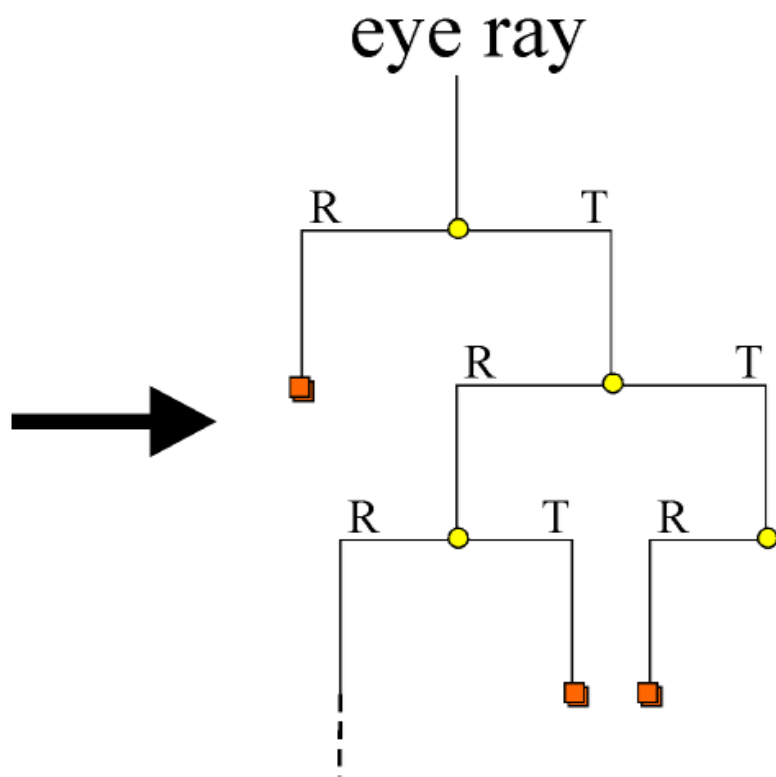
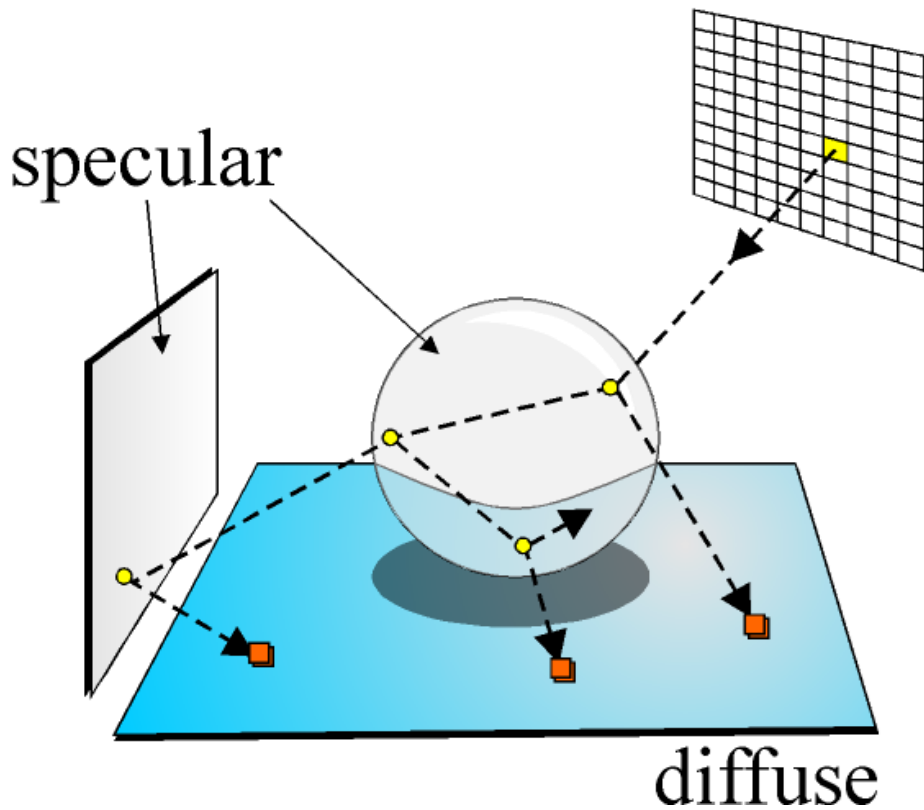


反射光线 R_3 的跟踪与前面的过程类似，算法可以递归地进行下去。重复上面的过程，直到光线满足跟踪终止条件。这样最终可以得到视屏上一个像素点的光强，也就是它相应的颜色值。

光线跟踪基本过程

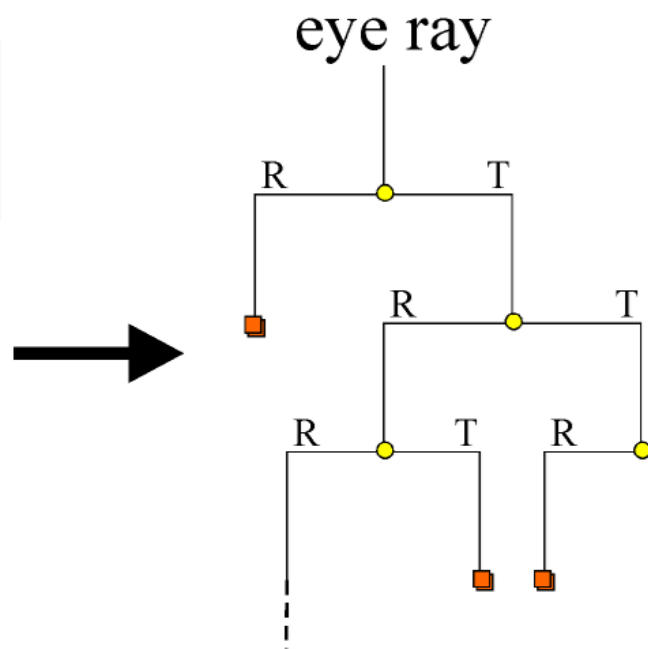
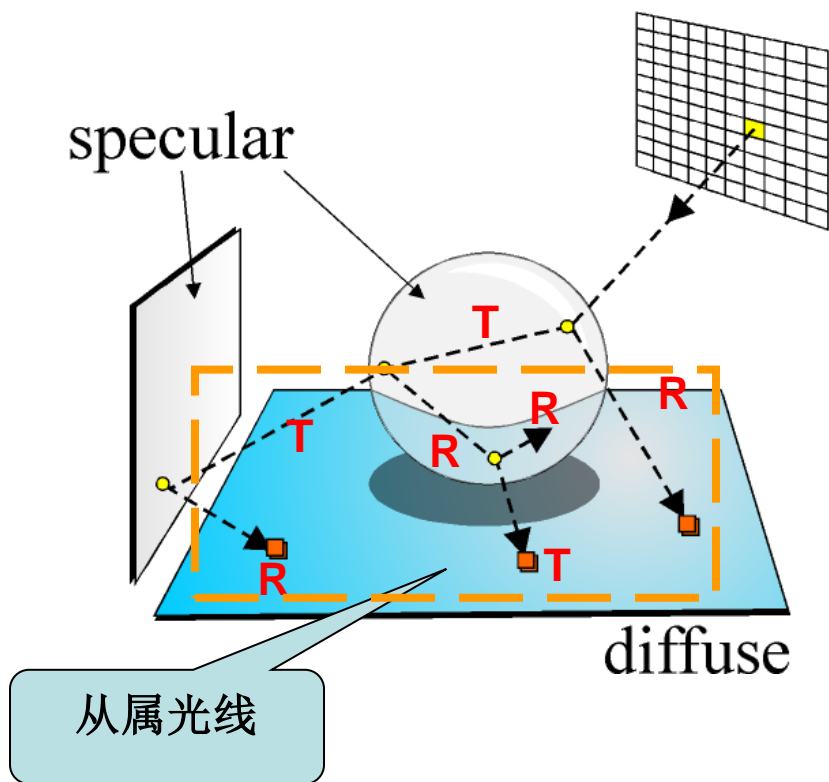
光线跟踪树

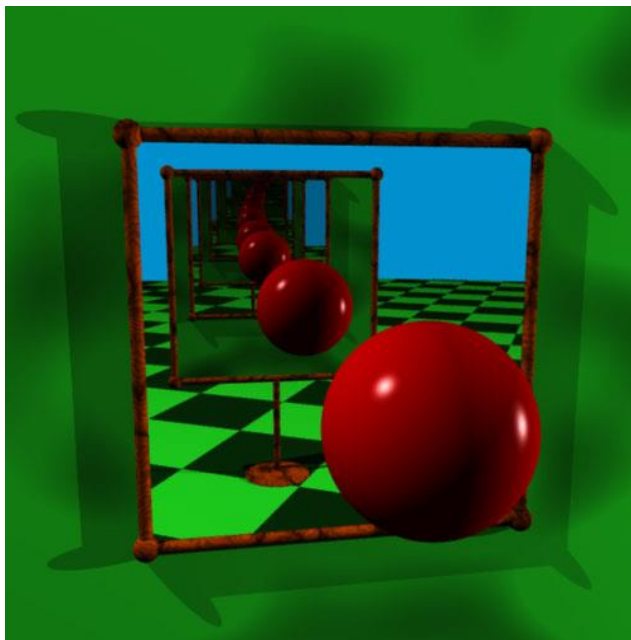
Ray Tree



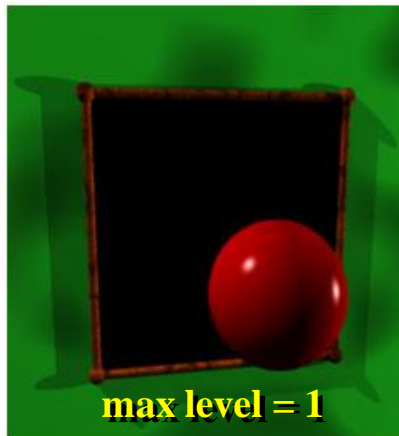
光线跟踪基本过程

Ray Tree 光线跟踪树





非常高的递归等级





- 在算法应用的意义上，可以有以下几种终止条件。
 - ✓ 该光线未碰到任何物体
 - ✓ 该光线碰到了背景
 - ✓ 光线在经过许多次反射和折射以后，就会产生衰减，光线对于视点的光强贡献很小
 - ✓ 光线反射或折射次数即跟踪深度大于一定值



RayTracing (start, direction, weight, color)

```
{
    if (weight < MinWeight)
        color = black
    else
    {
        计算光线与所有物体的交点中离start最近的点;
        if (没有交点)
            color = black
        else
        {
             $I_{local}$  = 在交点处用局部光照模型计算出的光强;
            计算反射方向R;
            RayTracing (最近的交点, R, weight* $W_r$ ,  $I_r$ )
            计算折射方向T;
            RayTracing (最近的交点, T, weight* $W_t$ ,  $I_t$ );
             $color = I_{local} + K_r I_r + K_t I_t$ ;
        }
    }
}
```



合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

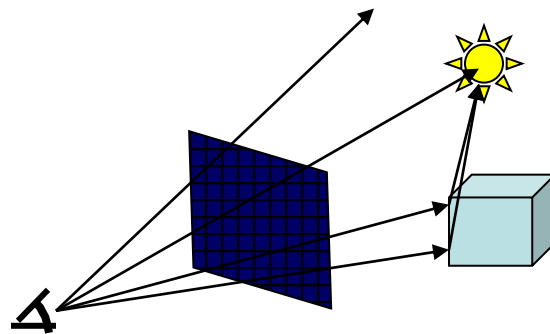
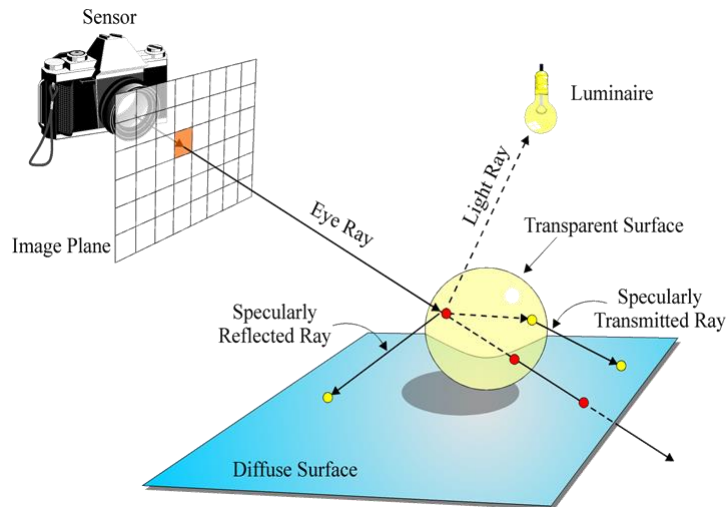
光线跟踪基本过程



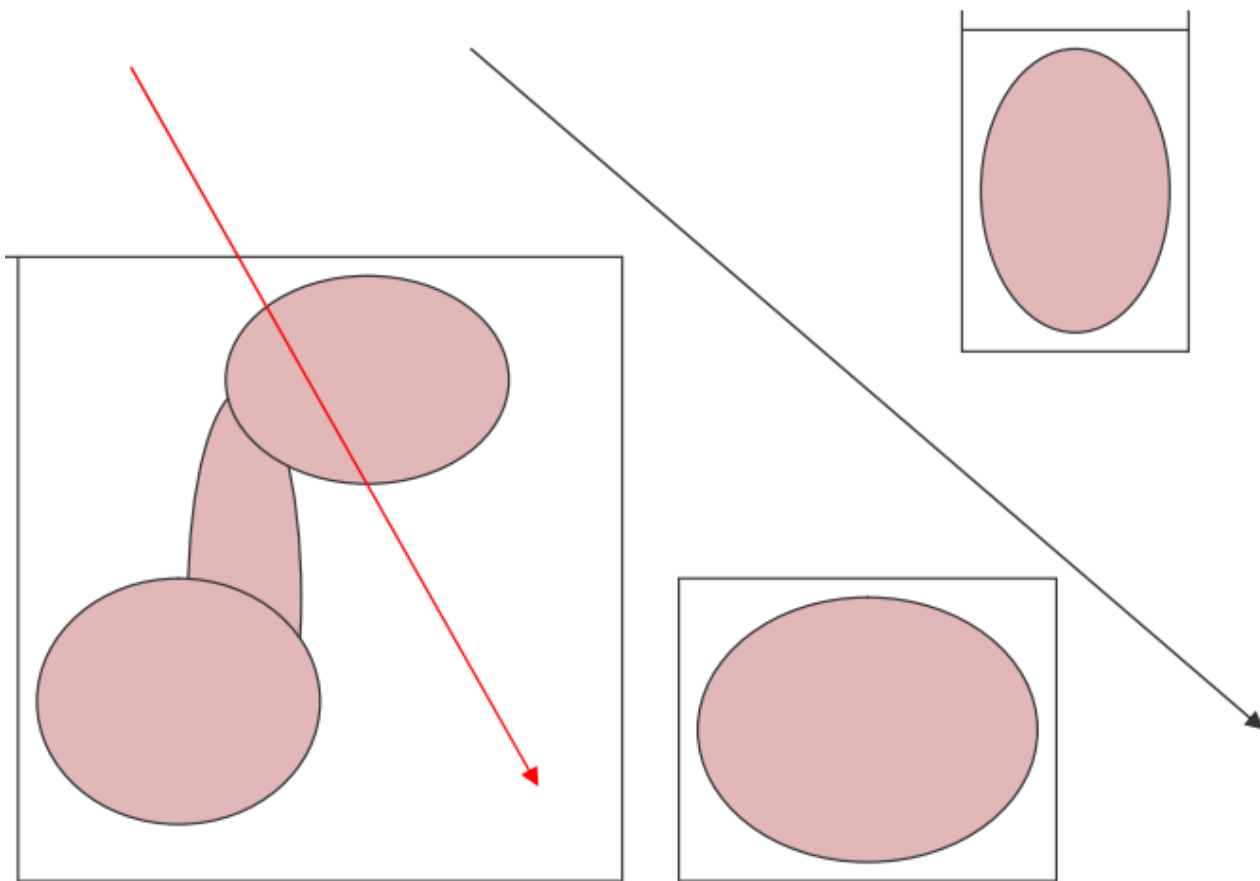


- 从成像平面的每一个像素发射一条光线
- 跟踪处理每一条光线
- 优点：算法简单，效果好
- 缺点：计算量大

常用的是
局部光照模型



从眼睛出发的光线追踪





将光线跟踪算法与过采样方式结合起来，可归纳如下：

- (1) 对每一像素的角点计算光线跟踪的光强。
- (2) 比较像素四个角点的光强，确定要进行细分的像素。
- (3) 对细分后新增的角点计算光线跟踪的光强。然后，重复(2)和(3)，直到各角点的光强比较接近为止。
- (4) 加权平均求出投影平面上各像素点的光强。

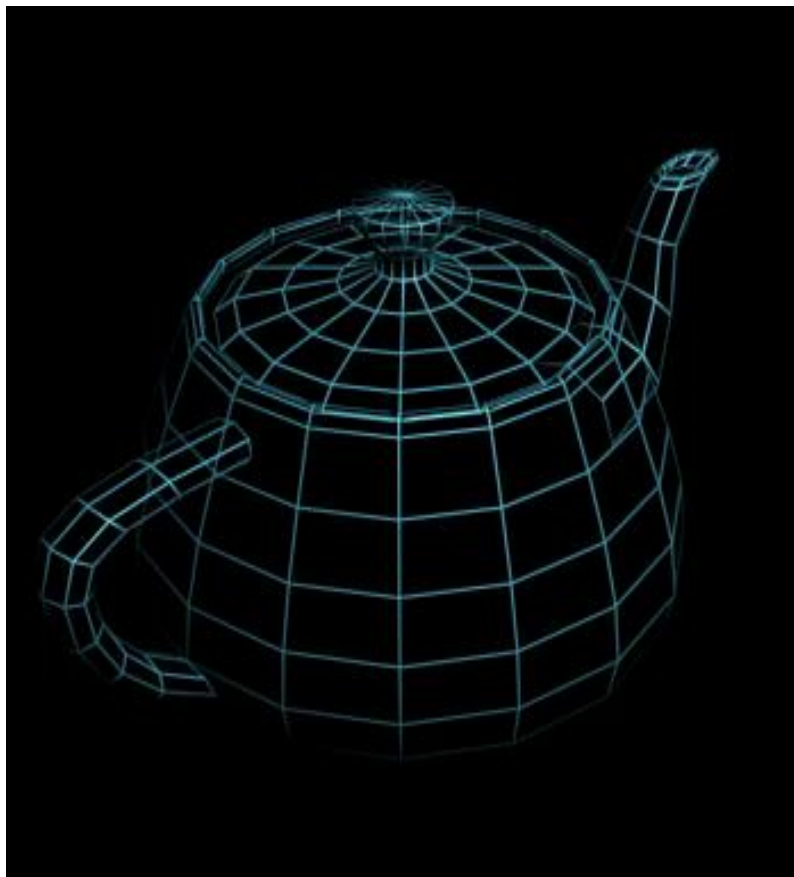


合肥工业大学

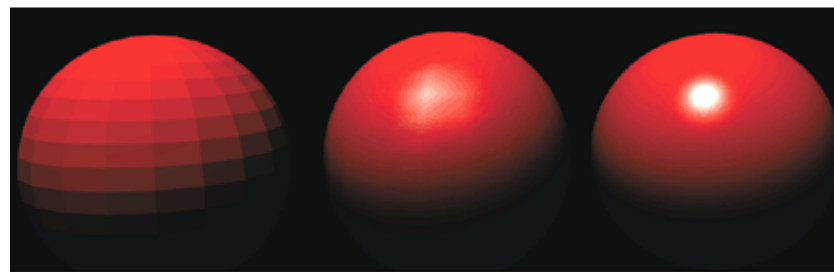
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

多面体的明暗处理





From Computer Desktop Encyclopedia
Reproduced with permission.
© 2001 Intergraph Computer Systems



Flat

Gouraud

Phong

Flat Shading (恒定光强明暗处理)

Gouraud明暗处理

Phong明暗处理

Phong光照模型

单一光源照射下Phong光照模型的表达式: $I = I_a k_a + k_d I_l \cos\theta + k_s I_l \cos^n \alpha$

I 景物表面在被照射点处的光亮度

I_a 入射的泛光光强

k_a 景物表面对泛光的反射系数

k_d 景物表面的漫反射率

I_l 点光源所发出的入射光强度

θ 入射光与表面法向之间的夹角

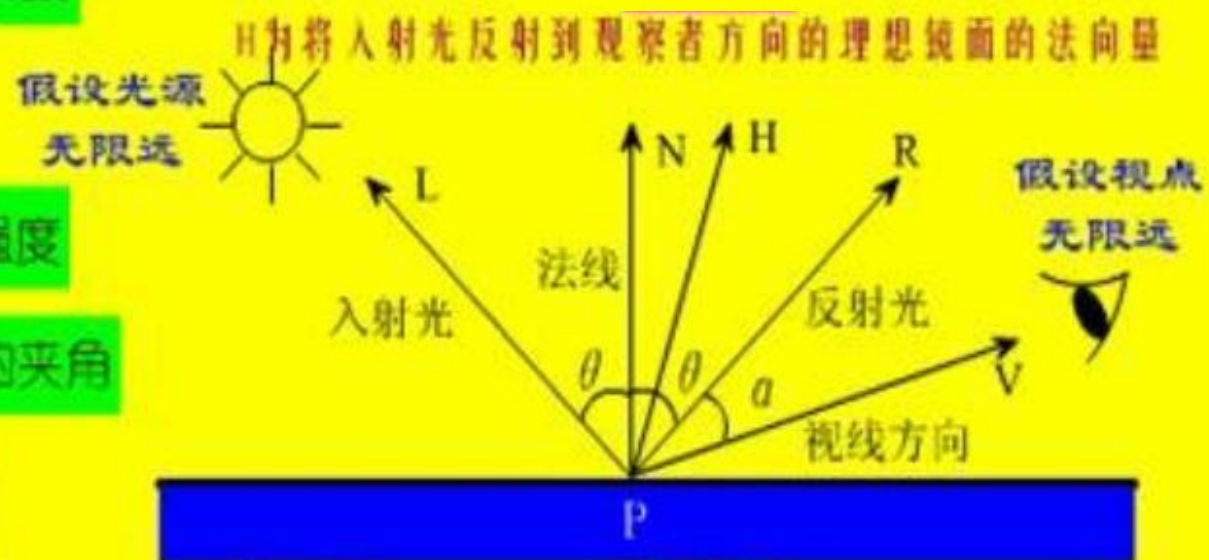
k_s 景物表面的镜面反射率

n 镜面高光指数

α 镜面与反射光线之间的夹角

$L \cdot N$

$V \cdot R$



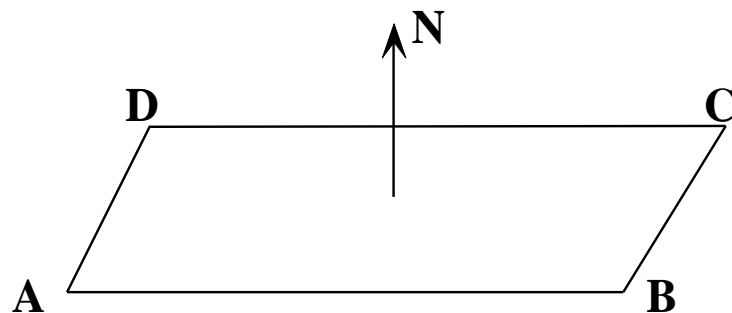
效果实例



Replay



恒定光强明暗处理



- 依据局部光照明模型按每一个多边形的法向计算出一个颜色值C
- 将C赋给该多边形在屏幕上的投影所覆盖的全体像素

优点：计算量小



缺点：

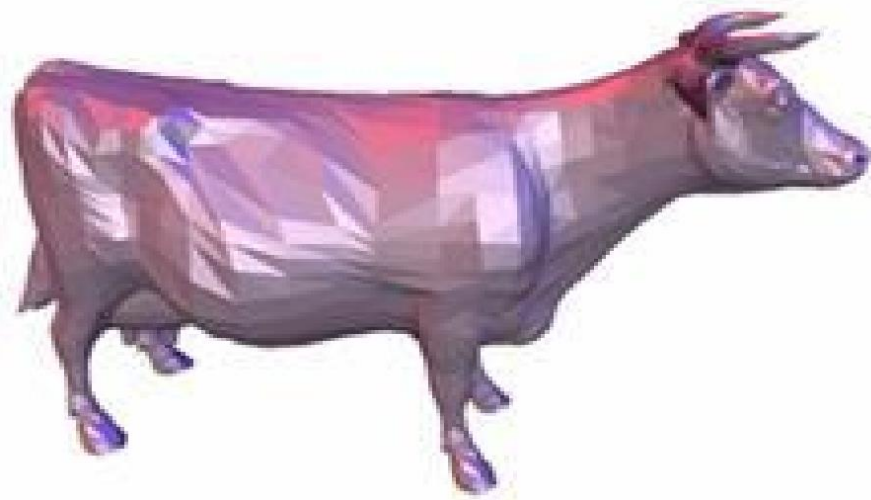
景物表面上相邻的多边形之间颜色差异较大，存在马赫带效应



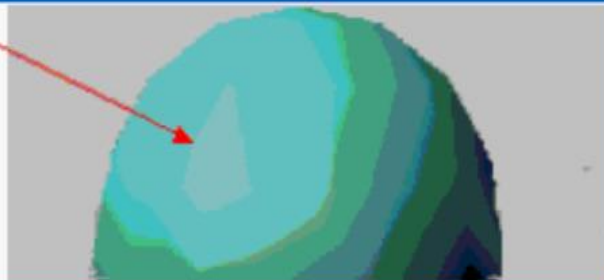
合肥工业大学

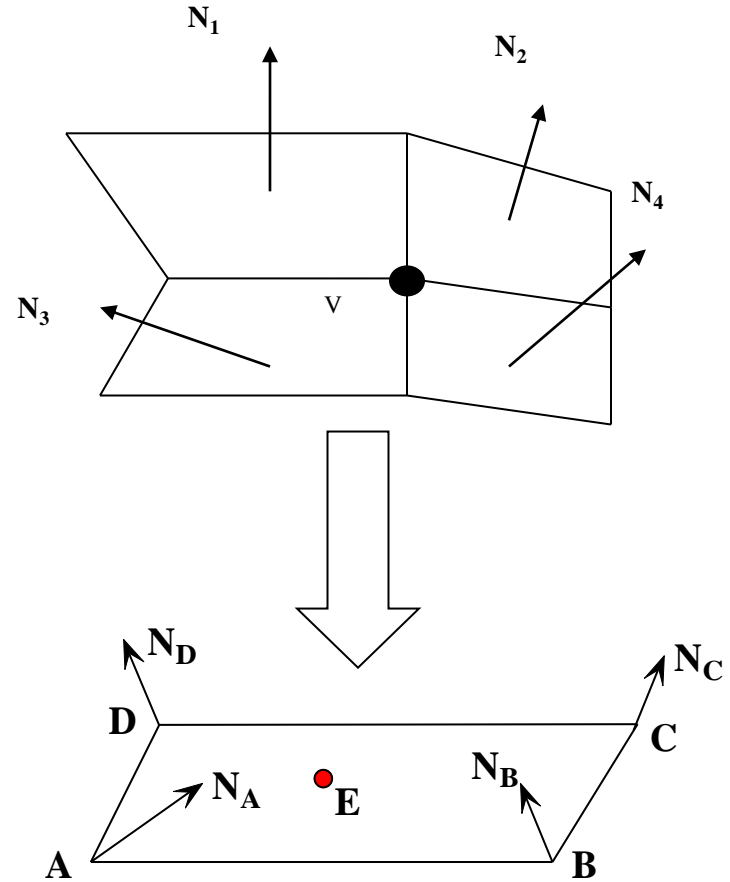
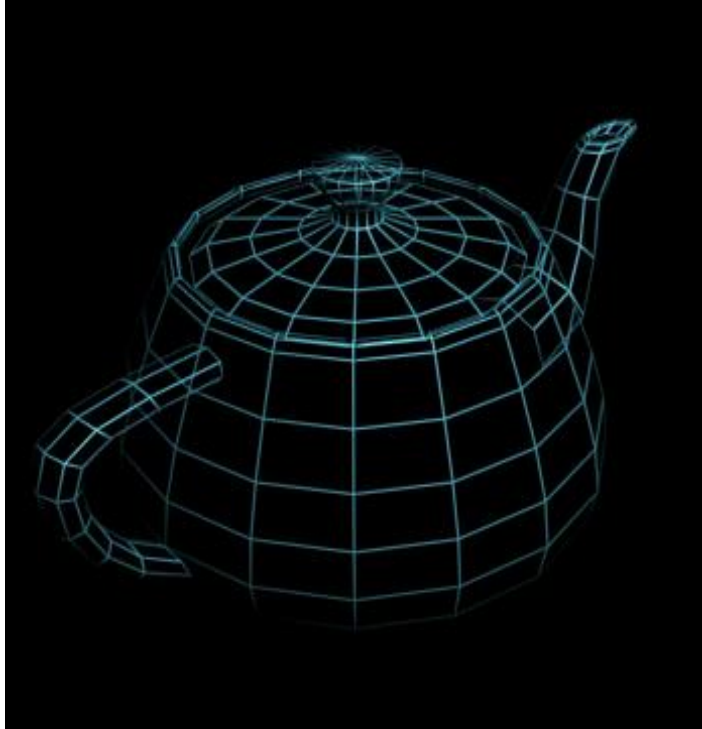
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

恒定光强明暗处理

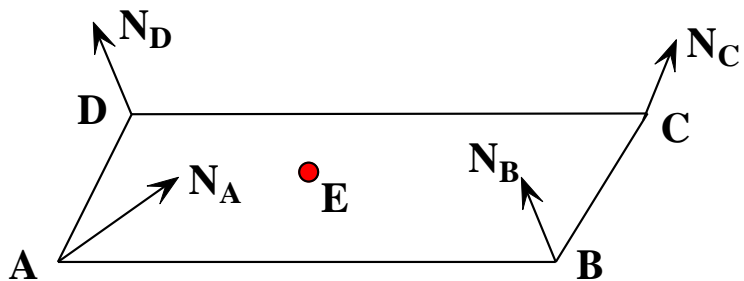


由于线性光强度插值产生的马赫带效应





Gouraud Shading & Phong Shading



Gourand Shading & Phong Shading

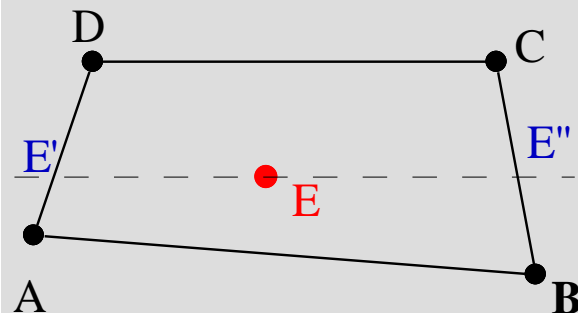
- 利用局部光照明模型计算每一顶点处的光亮度 (I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D)
- 多边形内部各点处的光亮度值通过对多边形顶点处的光亮度的双线性插值得到 I_A

又称光亮度插值明暗处理



I_A 、 I_B 已知，求 I_C

$$I_c = I_A \frac{|BC|}{|AB|} + I_B \frac{|AC|}{|AB|}$$



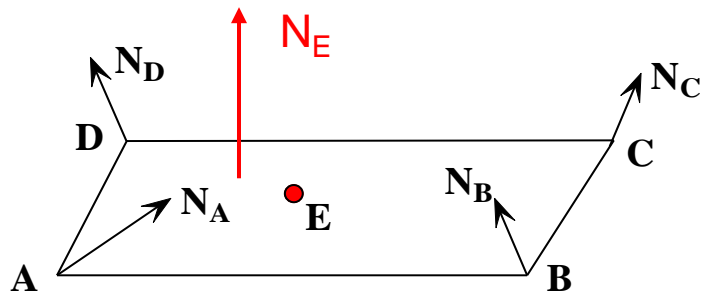


优点：

- 简单快速
- 图形在真实感上较Flat Shading有了较大的提高

缺点：

- 马赫带效应依然存在
- 不能正确模拟高光



Gouraud Shading & Phong Shading

- ❖ 利用双线性插值得到多边形内部各点处的法向量(N_E)
- ❖ 利用局部光照模型计算每一点的光强(I_E)

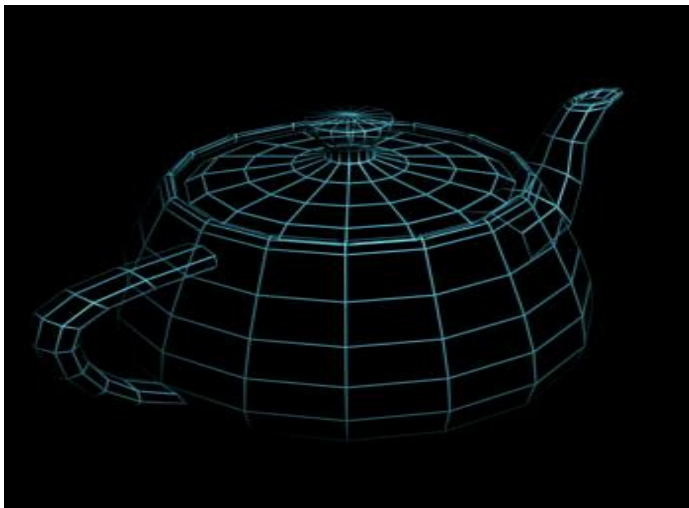
优点:

- 过渡自然
- 较好模拟高光

缺点:

- 计算量大







Diffuse Illumination & Flat Rendering



Specular & Gouraud Shading



Specular & Phong Rendering



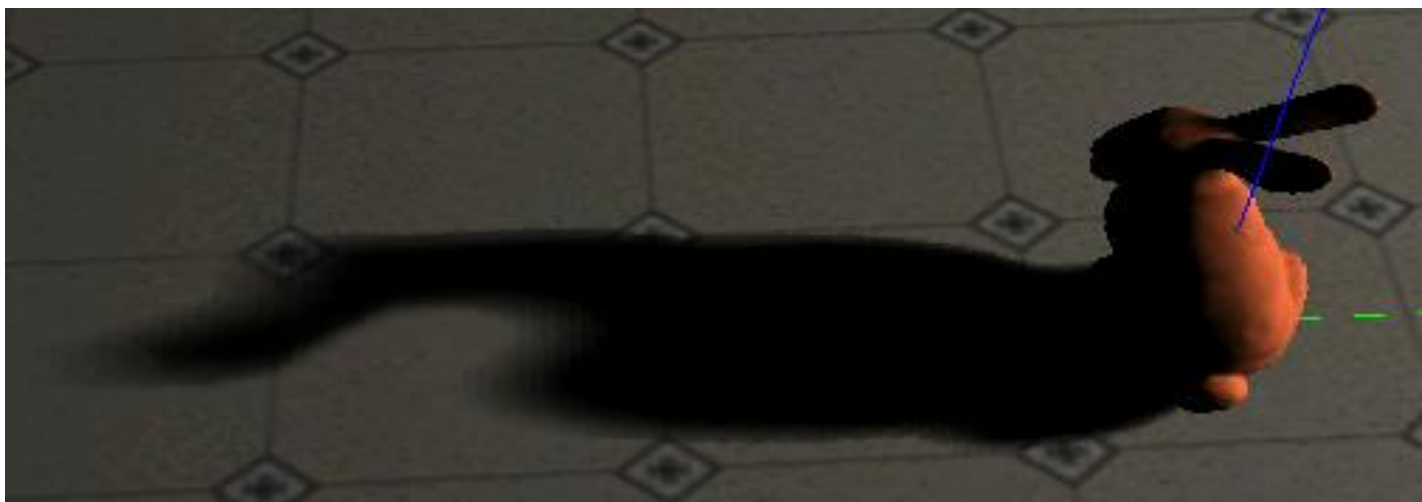
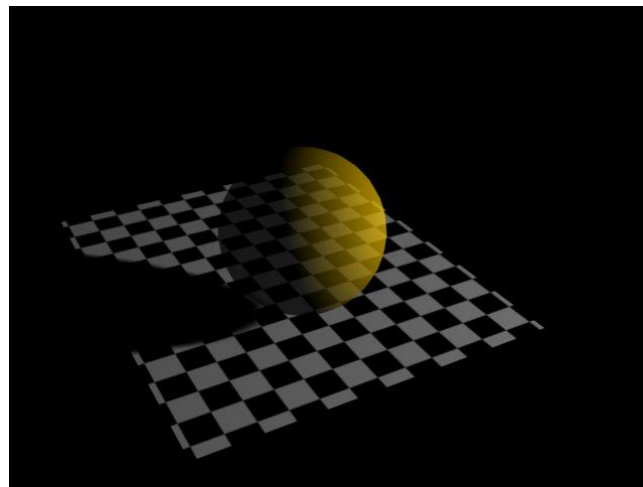
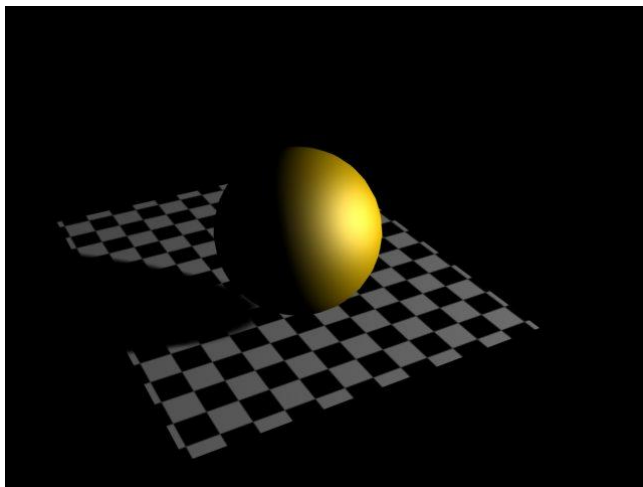


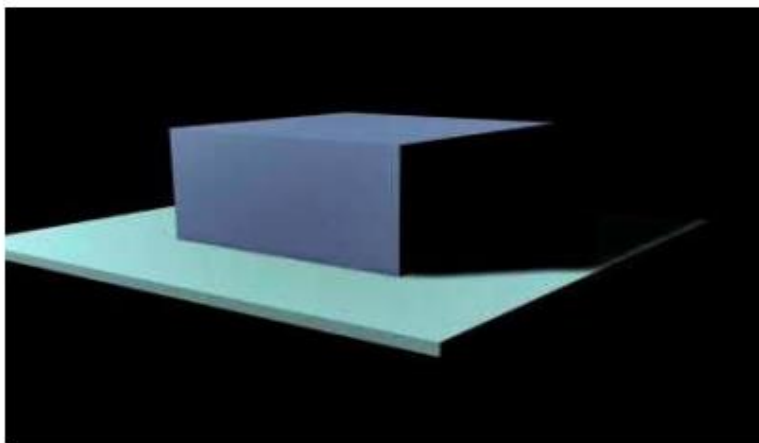
合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

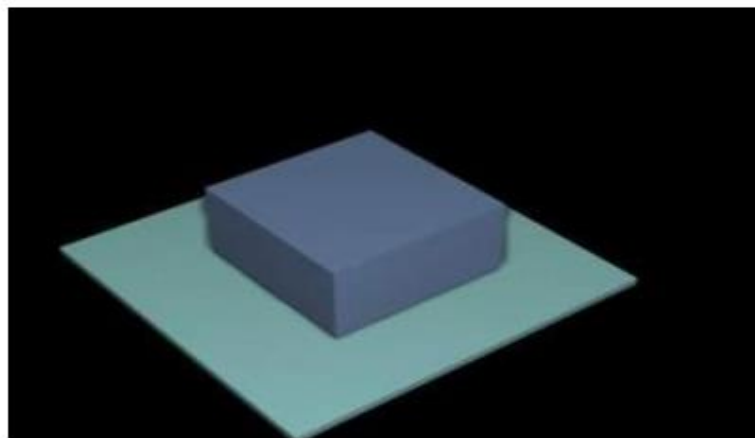
阴影和表面细节







观察方向与光源方向不重合



观察方向与光源方向重合



从理论上来说，从视点以及从光源看过去都是可见的面不会落在阴影中，只有那些从视点看过去是可见的，而从光源看过去是不可见的面，肯定落在阴影之内。

主要的方法可分为：

- ✓ 扫描线算法
- ✓ 细节多边形算法
- ✓ 阴影体 (Shadow Volumes) 算法
- ✓ 阴影图 (Shadow Map) 算法
- ✓ 光线跟踪算法
- ✓ 辐射度算法







- 颜色纹理：通过颜色色彩或明暗度的变化体现出来的表面细节。
- 几何纹理：由于不规则的细小凹凸造成的。
- 颜色纹理取决于物体表面的光学属性，而几何纹理由物体表面的微观几何形状决定。



没有纹理



有纹理





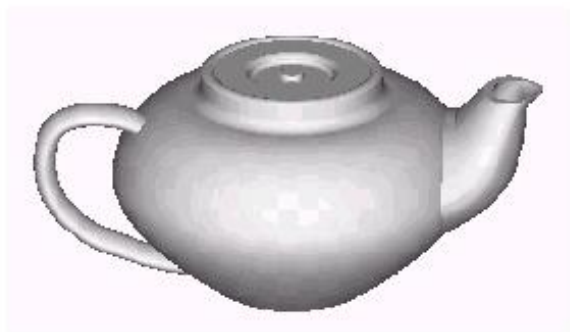
合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

纹理映射



+



=

