



# 第七章 真实感图形生成技术

---

南京农业大学  
谢忠红

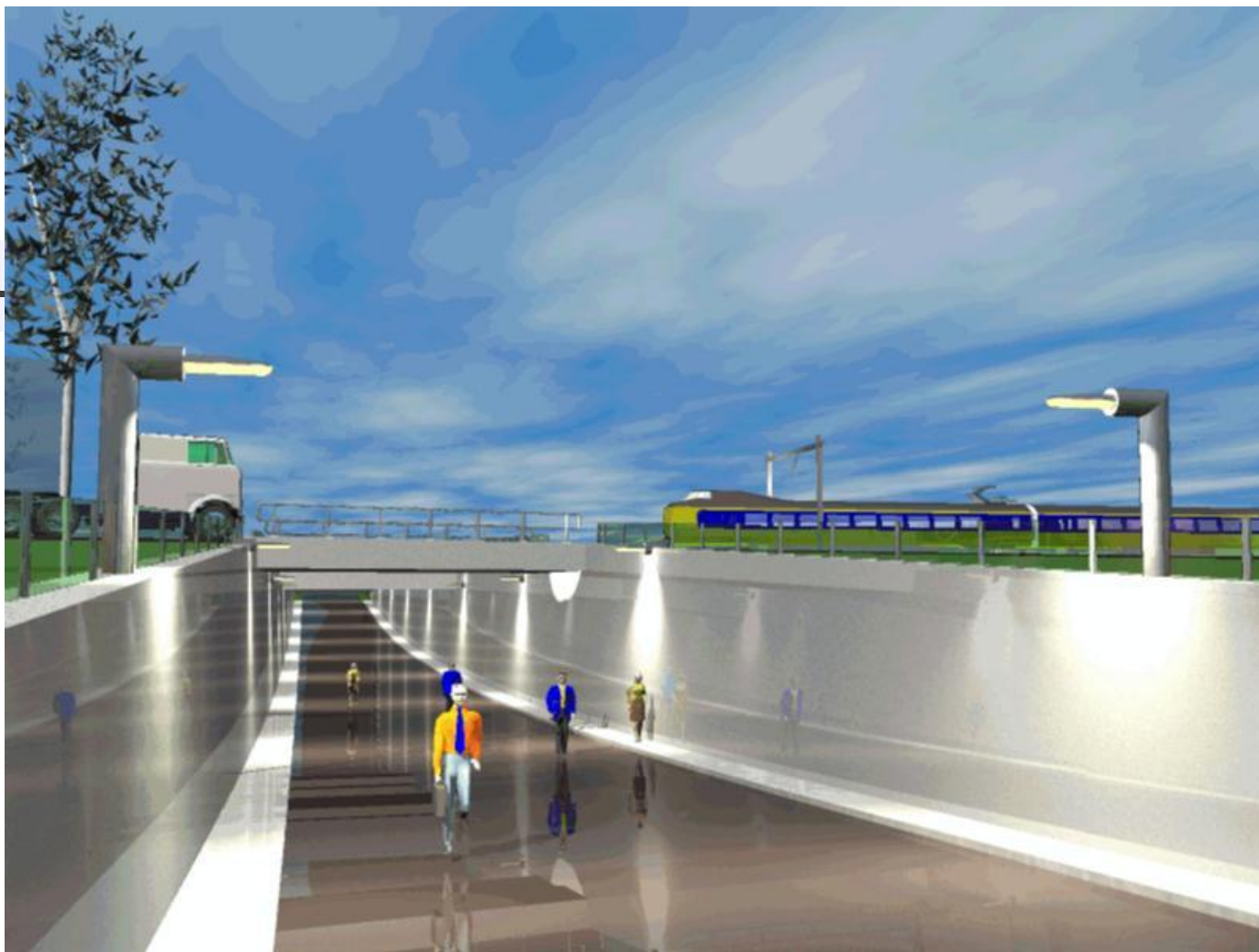
## ■ 1什么是计算机真实感图形显示？计算机真实感图形显示与电视画面之间的关系？

计算机产生的画面是指没有实际模型的条件下，产生人们所构思的各种景物的真实图形。

例：房产公司的小区规划图、新型轿车的设计图等。

## 2真实感图形显示的必要性

传统的人工绘图或制作模型耗费人力财力，计算机生成真实感图形可以进行交互式修改节约人力和物力。



**真实图形绘制效果图：**光照效果、阴影效果，  
物体的纹理和质感。



**真实感图形效果图：** 阴影效果，物体质感，透明效果，镜像效果、光影效果等

# 由清华大学自然景物平台生成的野外场景



## ■ 计算机生成的真实感图形的一般要求

- 1能够反映物体表面的颜色和亮度的细微变化**
- 2能够表现出物体的质感**
- 3能够通过光照下物体的阴影，极大改善场景的深度感和层次感，充分显示物体之间的遮挡关系**
- 4能模拟透明物体的透明效果和镜面物体的镜像效果**



# ■ 如何使用计算机生成真实感图形呢？

■ **(1)** 用数学方法建立三维场景的几何描述，并用一定的数据结构实现该描述

——几何造型技术

■ **(2)** 将三维几何形体在二维的图像显示器等输出装置上表示出来

——三维投影技术

■ **(3)** 确定三维场景中可见面和不可见面进行消隐。

——消隐技术

■ **(4)** 计算场景中的可见面的颜色（根据光学物理的光照模型）

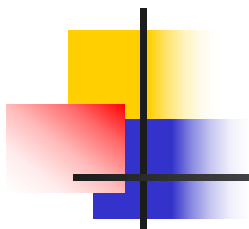
——光影计算



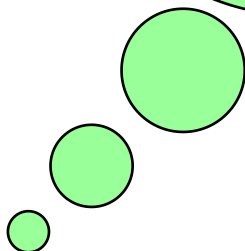
---

# 7.1 基本颜色空间

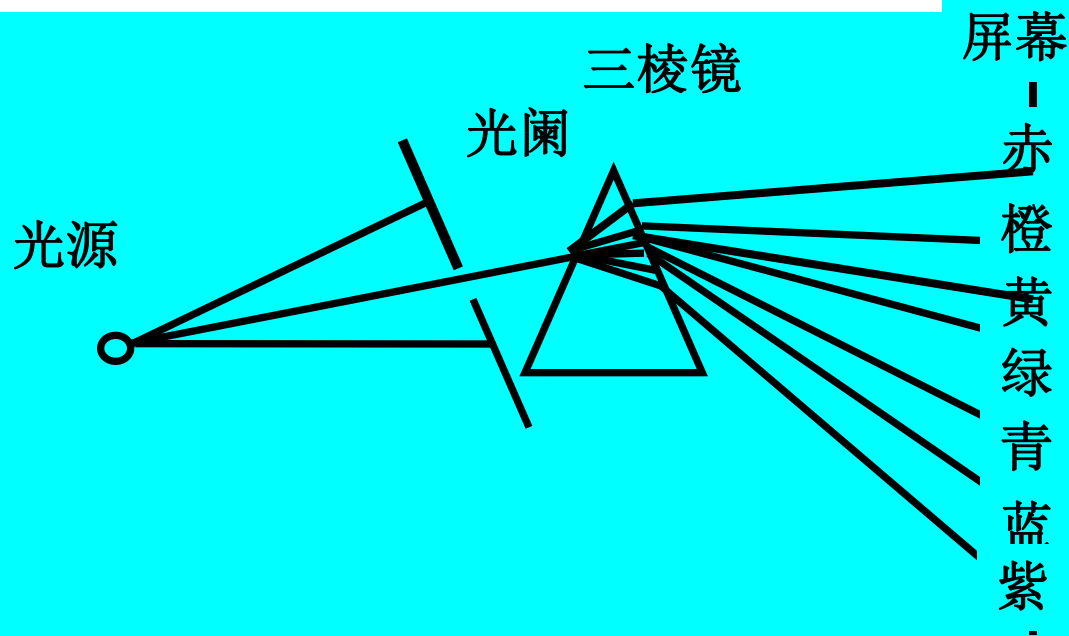




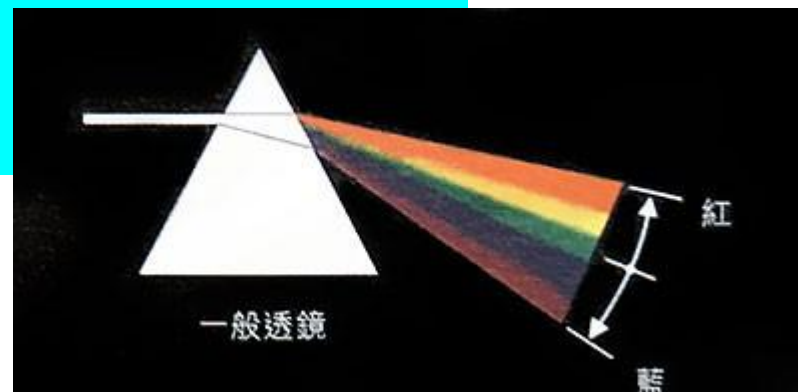
什么是颜色？



- 英国人**Newton**，三棱镜实验  
证明了白光是所有可见光的组合



■图(1) 色散现象



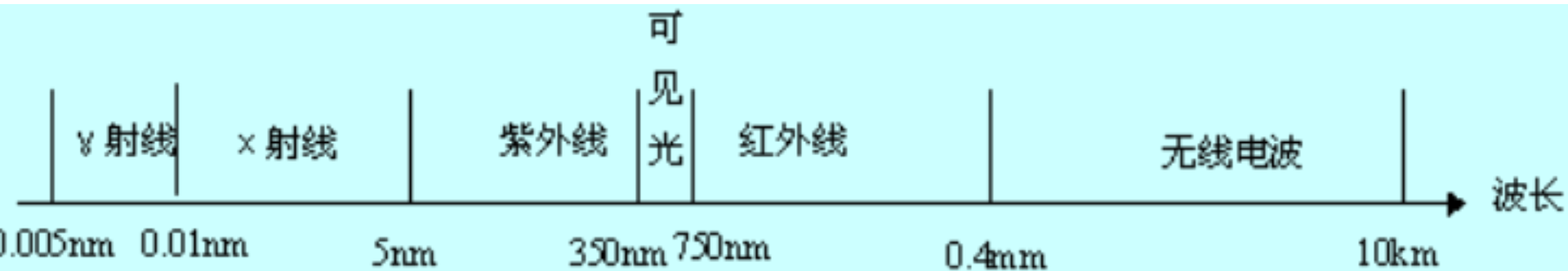
- 将白光分解为单色光，并按波长顺序排列

**颜色：** 人对于可见光能感觉到其波长相对应的颜色

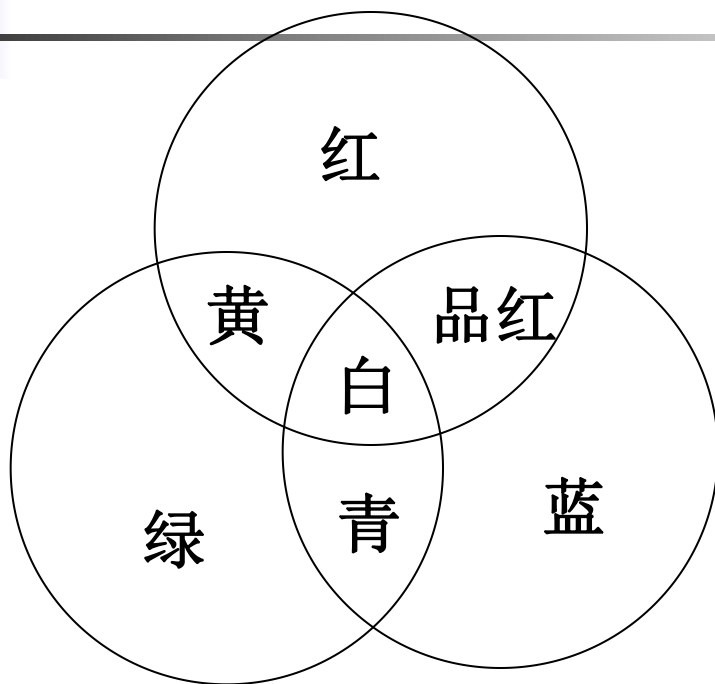
例

波长=**700nm**附近      红色

波长=**400nm**附近      蓝色



# 加法混色原理



$$R + G + B = W$$

$$G + B = C$$

$$B + R = M$$

$$G + R = Y$$



**Cyan (青)**

**Magenta (品红)**

**Yellow (黄)**

# 三基色

三色学说



Replay

- (1) 基于经验事实提出
- (2) 都有心理实验和显微光谱-电生理学测定结果作依据

**结论：**人所能感觉的颜色可以通过这三种颜色以适当比例混合而制成。

选取的标准红、绿、蓝三种光的波长分别为：  
700nm, 546nm, 435.8nm

$$C = rR + gG + bB$$

# 其他常见的颜色空间

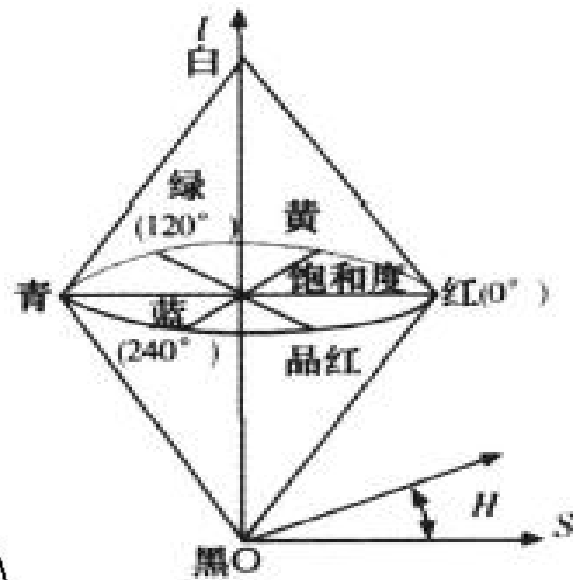
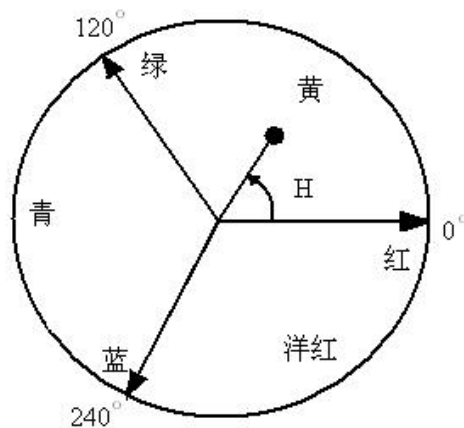
**HIS空间**——以人的视觉系统为出发点，此颜色空间对应于圆柱坐标系中的一个圆锥形子集

**HIS**包括三个分量：

色调H( Hue)

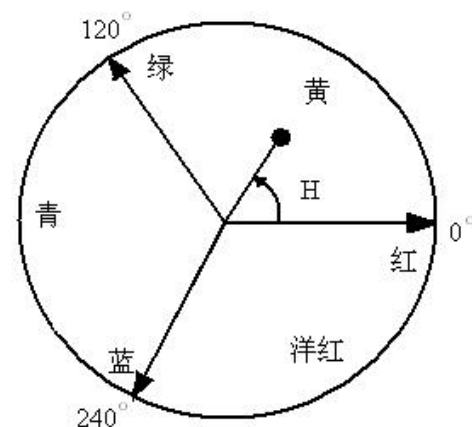
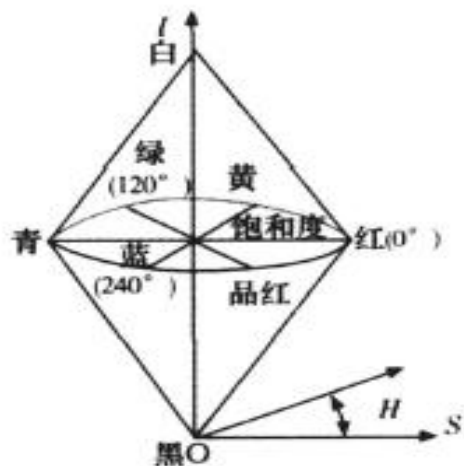
饱和度S (Saturation)

强度I ( Intensity)



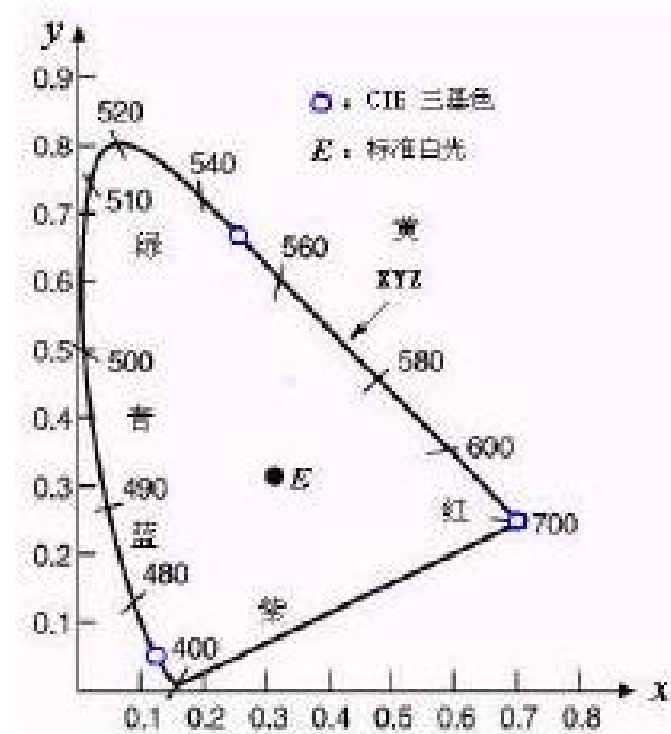


- 色调H——颜色与光的波长相关，可以用角度值表示( $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ )。
- 饱和度S——颜色的纯度，掺杂的白光越多饱和度就越低，饱和度采用百分数( $0\% \sim 100\%$ )。
- 强度I——人眼感受彩色光颜色的强弱程度，与光的能量有关。



# CIE彩色空间,典型的色彩空间有CIE 1931 XYZ

- CIE 1931 XYZ——国际照明委员会在1931 年开发并在1964年修订的CIE 颜色系统(CIE Color System)是其他颜色系统的基础。
- X表示红色分量
- Y代表绿色分量
- Z定义为亮度。

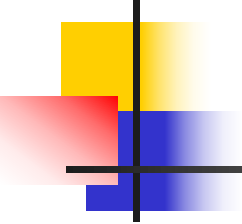




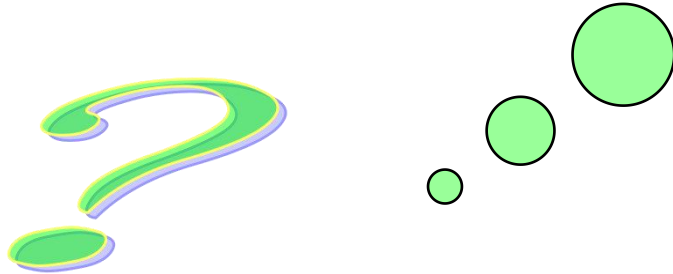
## 7.2基本光照模型

---

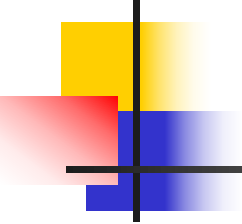
南京农业大学  
谢忠红



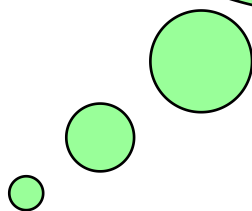
■1人为什么能够看到物体，感觉到其颜色明暗和形状呢？

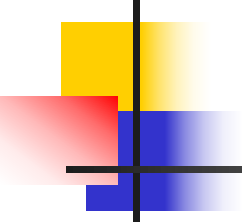


当光线照射到物体时,它可能被**吸收、反射或透射**,正是反射或透射的光进入了人的眼睛使得人能看见物体。  
物体呈现的颜色是由物体发出的光线到达人眼的结果



如果所有的入射光全部被  
吸收会有什么效果？

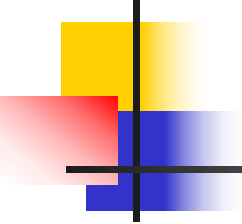




**2**思考一下怎样使用计算机生成真实感图形呢？



计算出物体上每个可见点所发出的光的强度和色彩转变成显示屏幕上对应的灰度和色彩就可以得到真实感图形了！



如何确定物体可见  
表面每点的亮度和颜色呢？



光学物理：光照原理

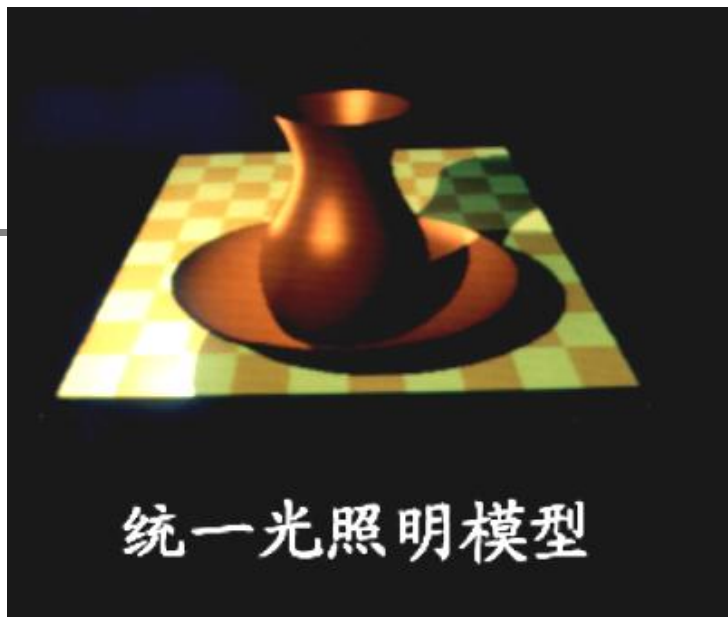


## ■ 光源和周围环境光照在物体表面上时

- 吸收 —— 吸收的入射光能转化为热能
- 反射
- 透射（透明物体） 本节只考虑不透明物体

那个决定了物体表面每点的亮度和颜色呢？





■ 结论： 物体的颜色由反射光决定！

■ 反射光 = 环境反射光 + 漫反射光 + 镜面反射光



统一光照明模型

# ■ (1)环境反射光

- **DEF:**由邻近物体所造成的光的多次反射产生。光是来自墙壁、天花板、地板等分布式光源。
- **特点:** 任何物体在环境光照射下, 各点明暗相同

## ■ 光的亮度表示:

- $$I_e = I_a K_a$$

- $I_e$ ——物体的环境光反射亮度

- $I_a$ ——环境光亮度

- $K_a$ ——物体表面的环境光反射系数

## ■ (2)漫反射光

- DEF: 特定光源在物体表面反射光中那些向空间各方均匀发射出去的光。

- **特点:** 这种光的强度同样和视点位置无关, 光的强度和入射光与反射点处表面法线间夹角余弦成正比。

- **漫反射光照模型为:**

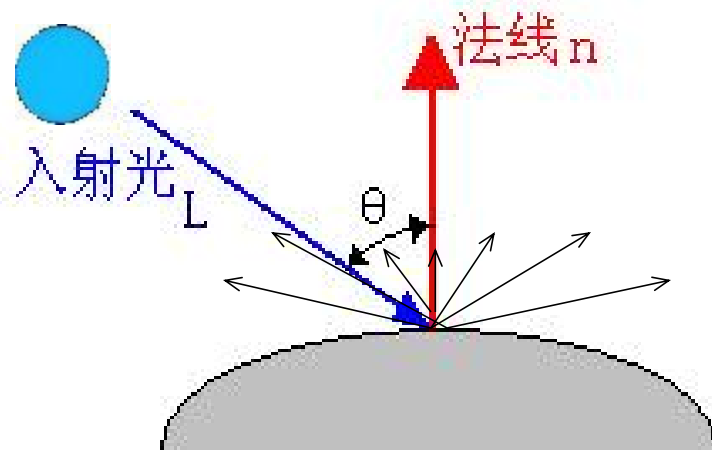
$$I_d = I_p k_d \cos\theta$$

$I_d$ 为漫反射光强度,

- $I_p$ 为入射光强度,

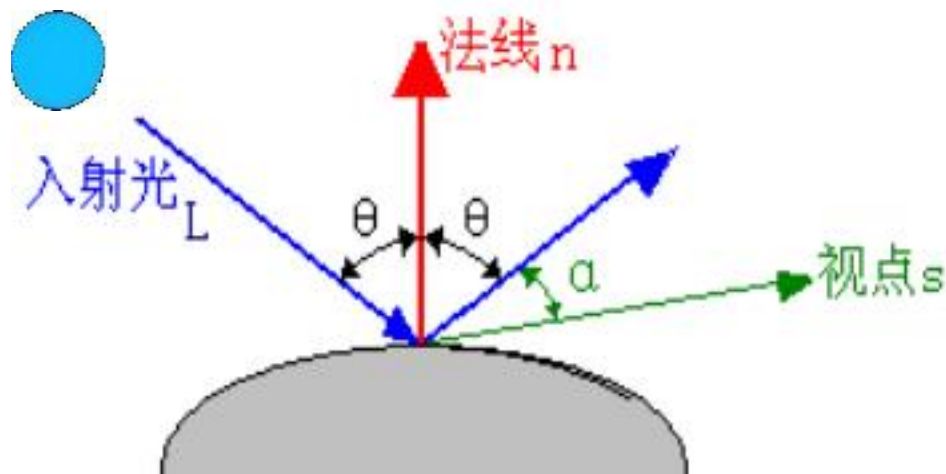
$k_d$ 为物体表面的漫反射系数

- $\theta$ 为入射角

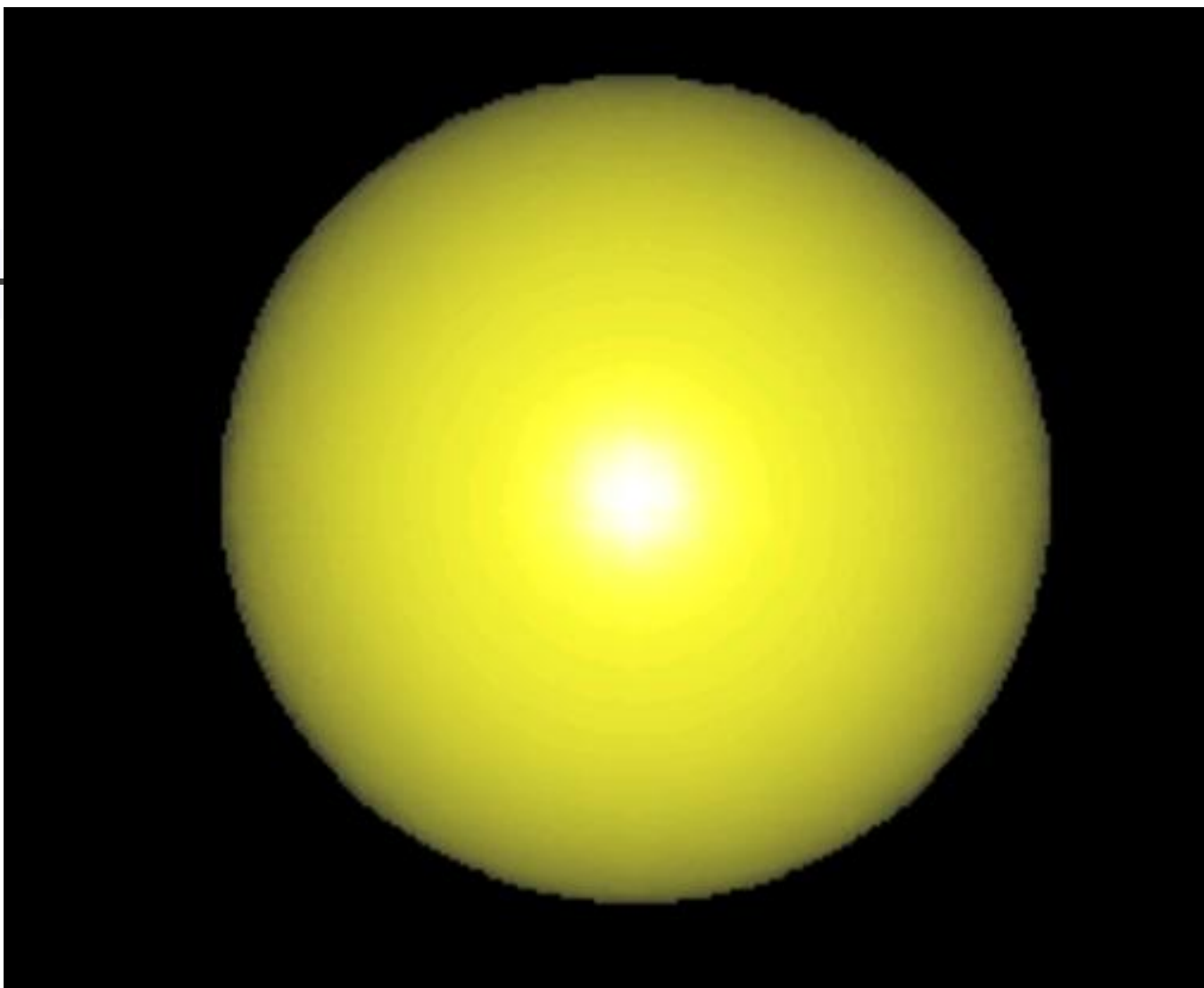


### ■ (3) 镜面反射光

- **DEF:** 当光源照射抛光的金属的、镜面时物体朝一定方向反射的光，称为镜面反射光。发生镜面反射的物体一般会产生一个高光区。



■ 理想的反射面 —— 非理想反射面的差距



高光区



- 镜面反射光照模型为

- $I_s = I_p K_s \cos^n \alpha$

- $I_s$  观察着接收到的镜面

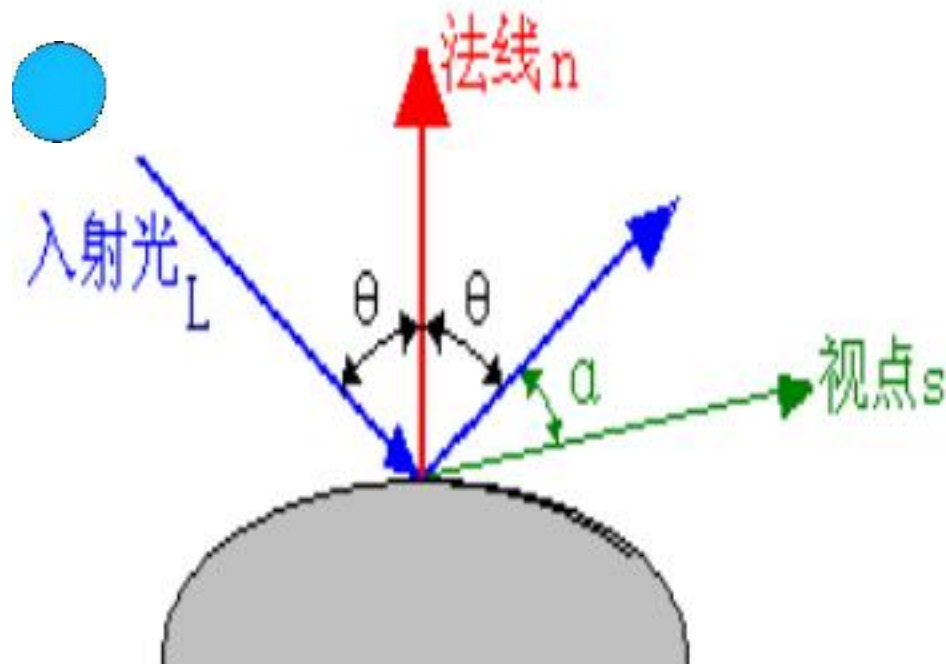
- 反射光亮度

- $I_p$  入射光亮度

- $K_s$  镜面反射系数

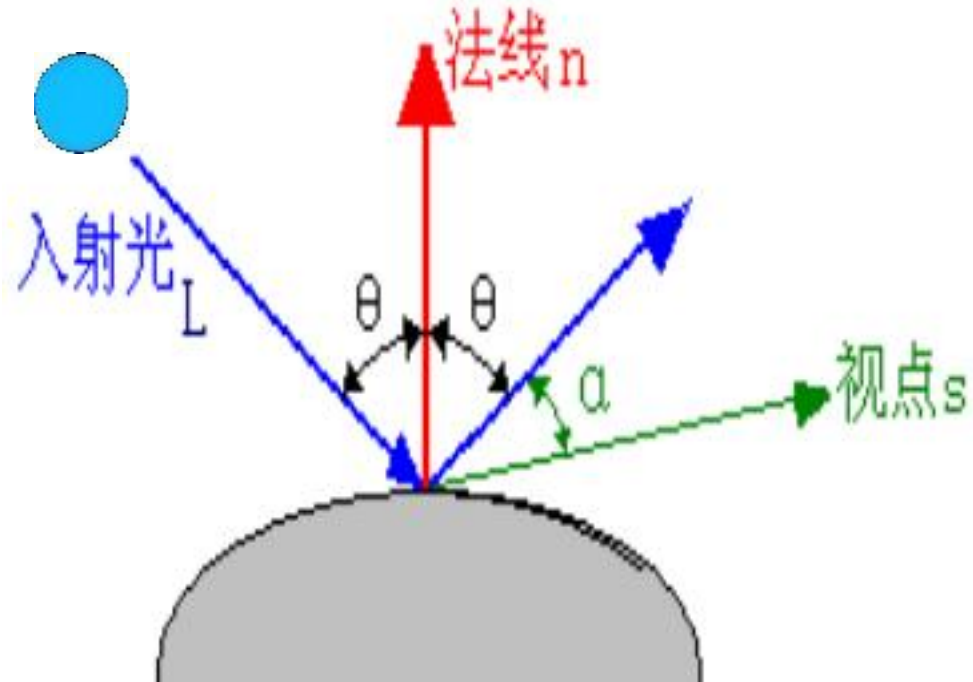
- $n$  镜面反射汇聚系数(高光指数)

- $\alpha$  镜面发射方向和视线夹角



- 简单光照模型可归纳为：

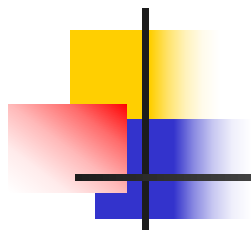
- $I = I_e + I_d + I_s$



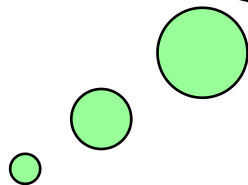
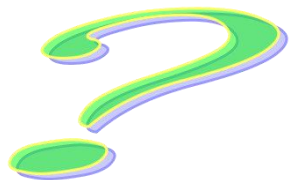
- 或者：

- $I = I_e + I_p(k_d \cos \theta + K_s \cos^n \alpha)$





- 光源不止一个时
- 应该怎么办呢？



●  $I = I_e + \sum_{i=1}^n \mathbf{I}_{pi} (k_{di} \cos \theta_i + K_{si} \cos^n \alpha_i)$

## ■ 简单光照模型存在的问题

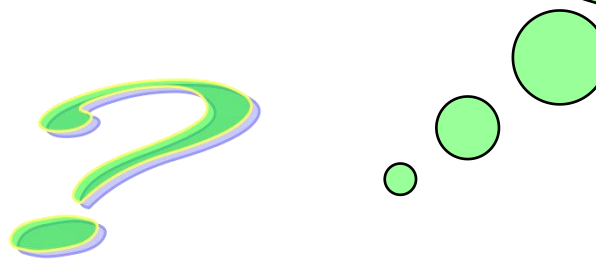
- (1) 显示出的物体（如塑料）没有质感
- (2) 环境光是常量，没有考虑物体之间相互的反射光
- (3) 镜面反射的颜色是光源颜色，与物体的材料无关
- (4) 镜面反射的计算在入射角很大时会产生失真

简单光照模型不同参数下的效果图

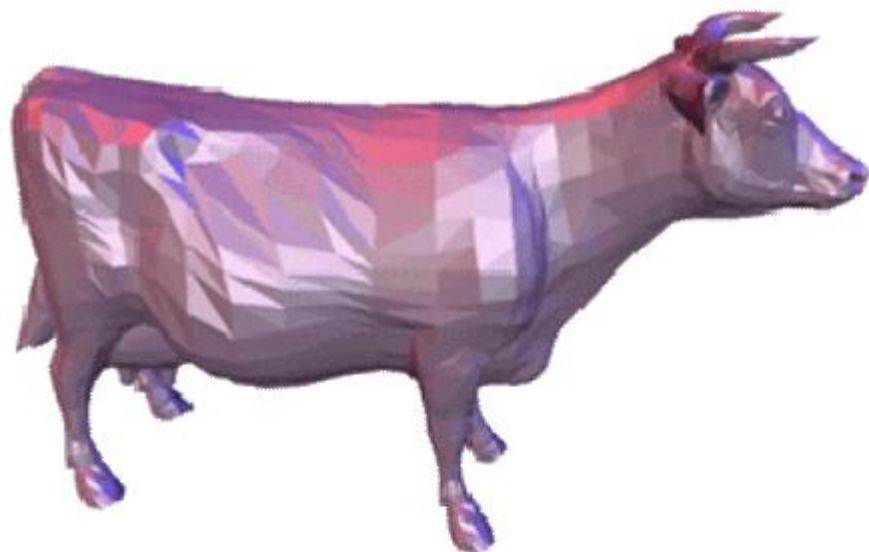




●改进方法是什么？



**Whitted**于**1980**年提出了第一个整体光照模型（增加了透射光、和场景中其他物体镜面反射光）

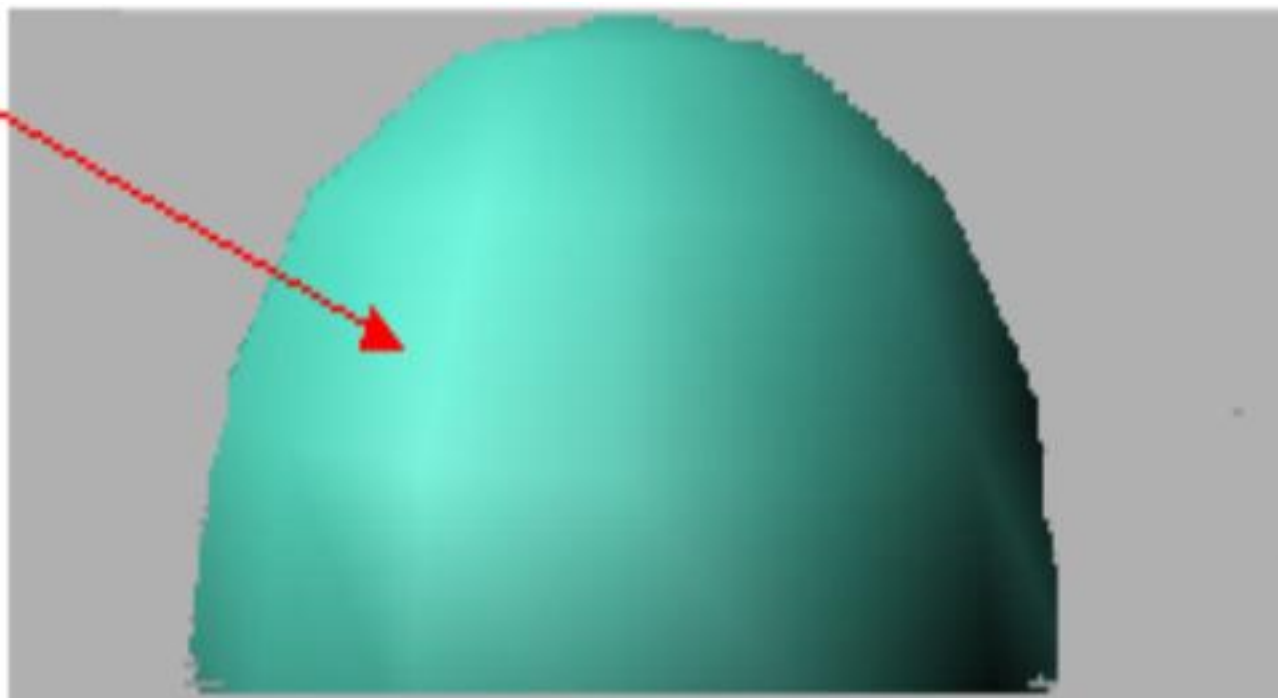


整体光照模型效果图



## 7.3 明暗的光滑处理

由于线性光强度插值产生的马赫带效应

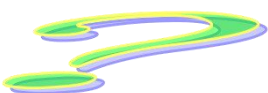


马赫带效应：物体表面呈现不连续的光亮度跳跃变化

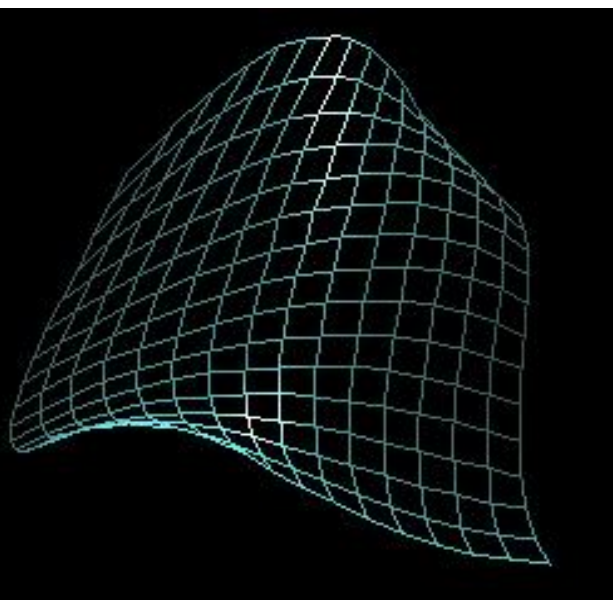
## 问题的提出

(1) 用 多边形网格 来逼近和表示曲面时

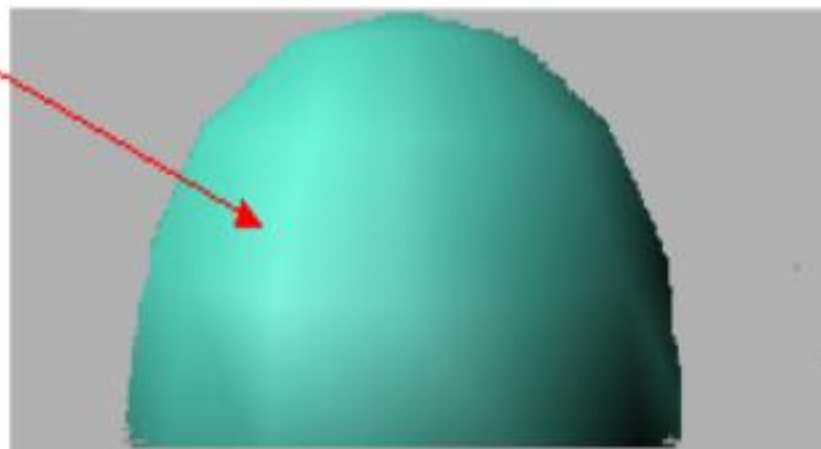
为什么使用多边形网格表示曲面？



(2) 曲面光照效果就呈现不连续的光亮度跳跃变化

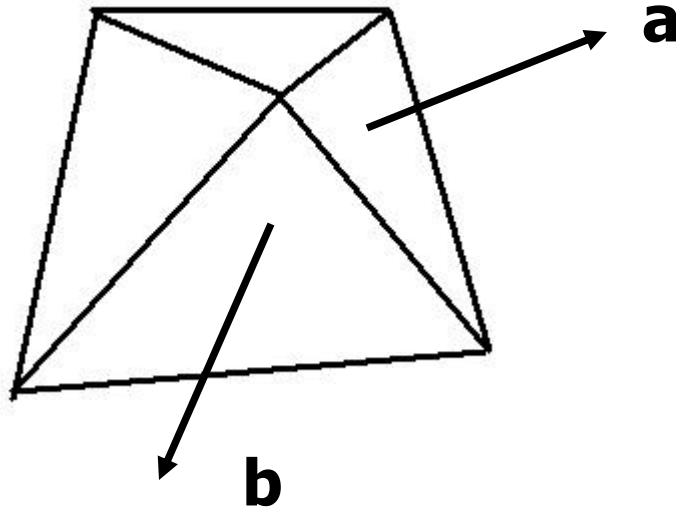


由于线性光强度插值产生的马赫带效应





为什么会出现马赫带效应呢？



光强度发生突然变化，没有过渡！

## ■ 解决方法有哪些？

(1) 用 尽可能小的多边形 来逼近和表示曲面，使光照效果中存在的~~不连续~~的光亮度跳跃变化小于人类视觉的分辨率



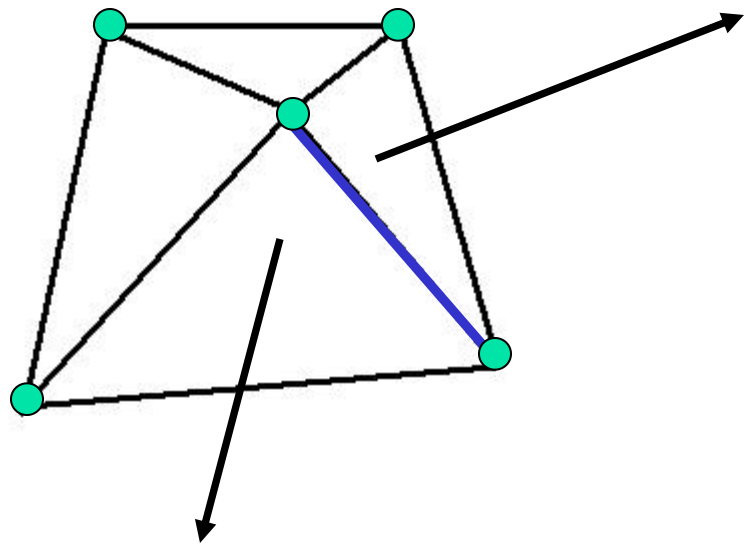
尽可能小的多边形可行性如何呢？

(2) **Gouraud**明暗处理

(3) **Phong**明暗处理

## ■ Gouraud明暗处理

- **DEF:** 仅仅对多边形顶点计算其颜色，内部各点的颜色根据顶点颜色的线性插值而得，从而获得看上去像光滑曲面的方法。



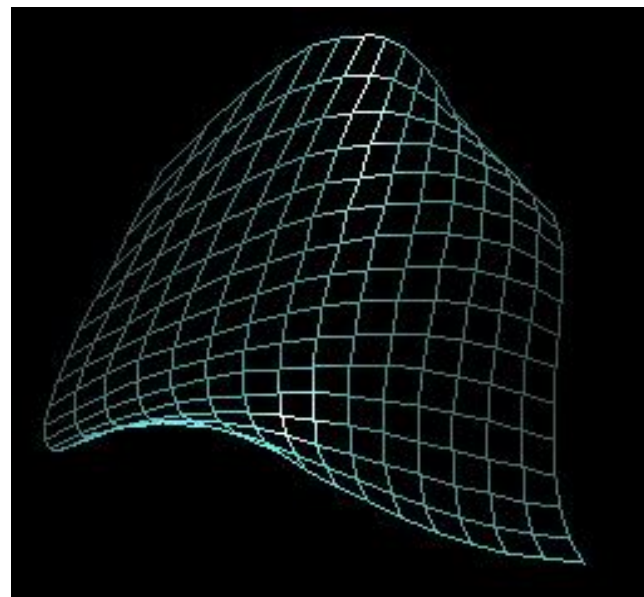
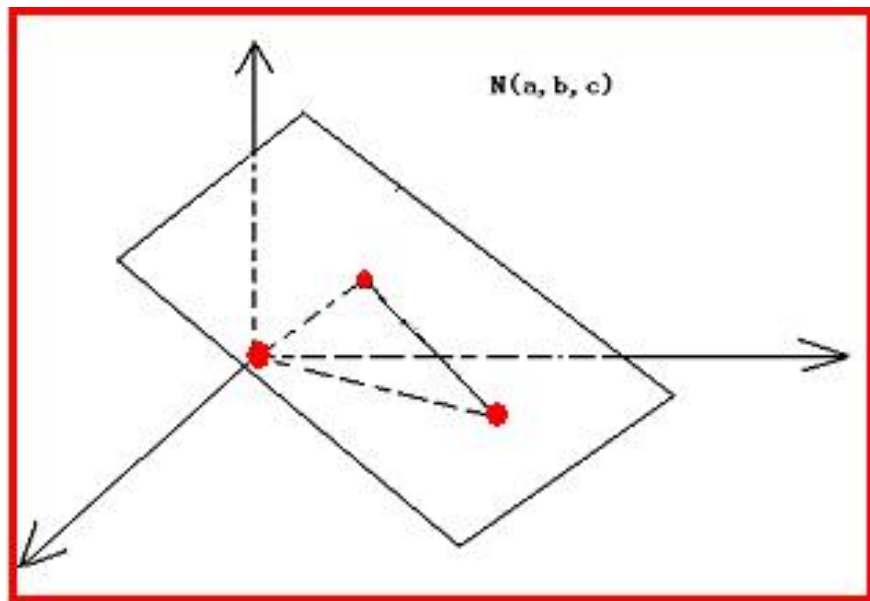
## Gouraud 明暗处理步骤

对多边形网格中的每一个多边形：

- 1) 计算多边形的单位法矢量；
- 2) 计算多边形顶点的单位法矢量；
- 3) 利用光照模型计算顶点的颜色；
- 4) 对 多边形顶点颜色 进行 双线性插值  
获得位于多边形内扫描线上各点的颜色

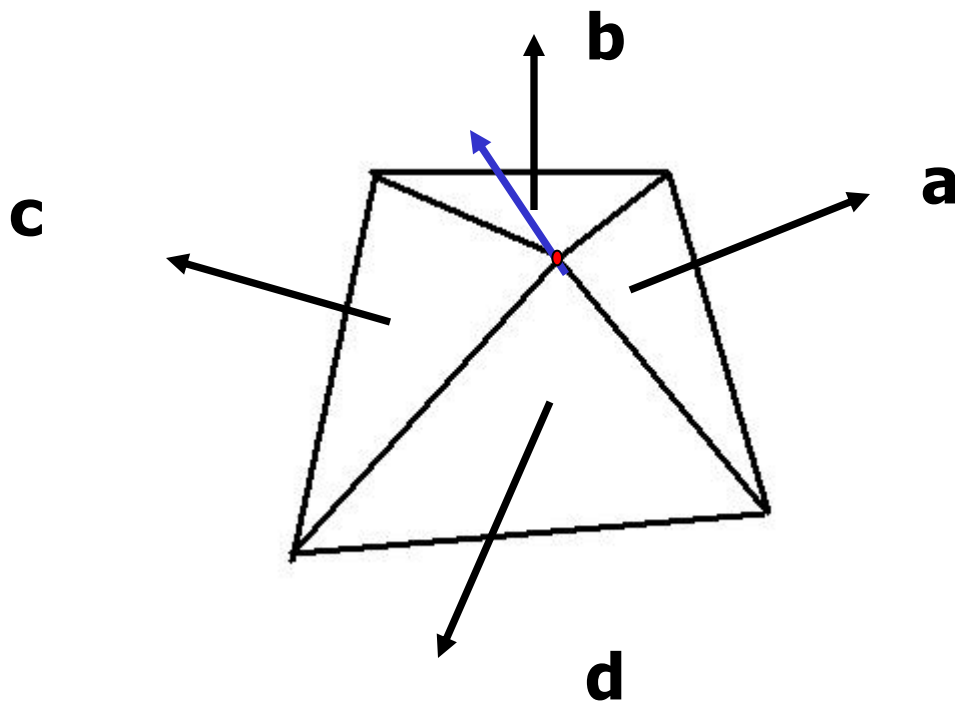
- 具体如下

- (1) 平面法向量的求取



$$\mathbf{N} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \end{vmatrix}$$

- **(2) 计算多边形各顶点的法矢量**

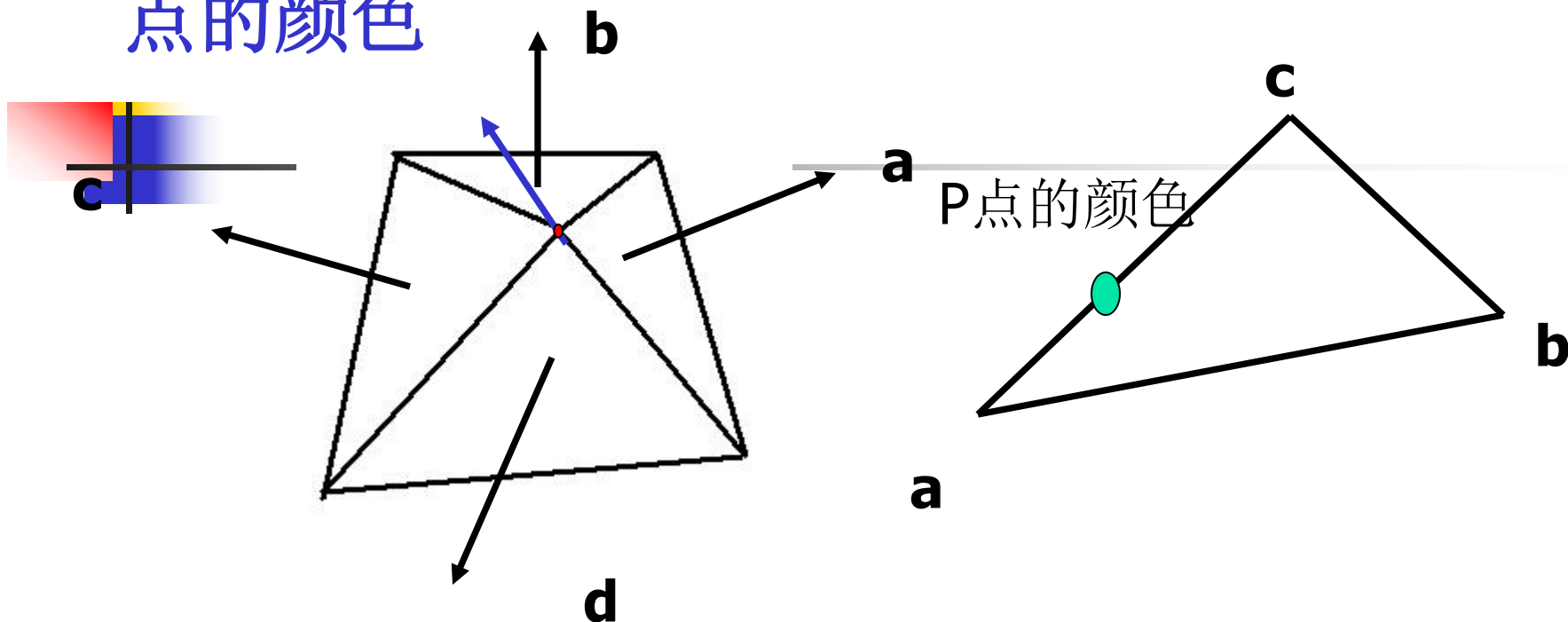


- **(3) 利用光照模型计算顶点的颜色**

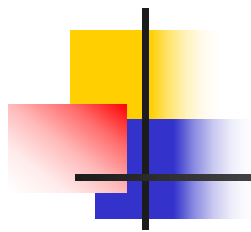
- **$I = I_e + I_p(k_d \cos\theta + K_s \cos^n\alpha)$**



# ■ (4) 根据各顶点的颜色求出多边形内部各点的颜色

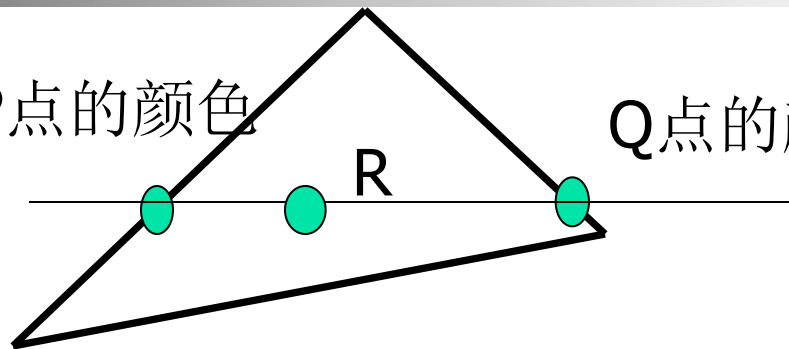


$$\begin{aligned} I_p &= \text{Color}(a) \frac{cp}{ac} + \text{Color}(c) \frac{ap}{ac} \\ &= \text{Color}(a) \frac{(y_c - y_p)}{(y_c - y_a)} \\ &\quad + \text{Color}(b) \frac{(y_p - y_a)}{(y_c - y_a)} \end{aligned}$$



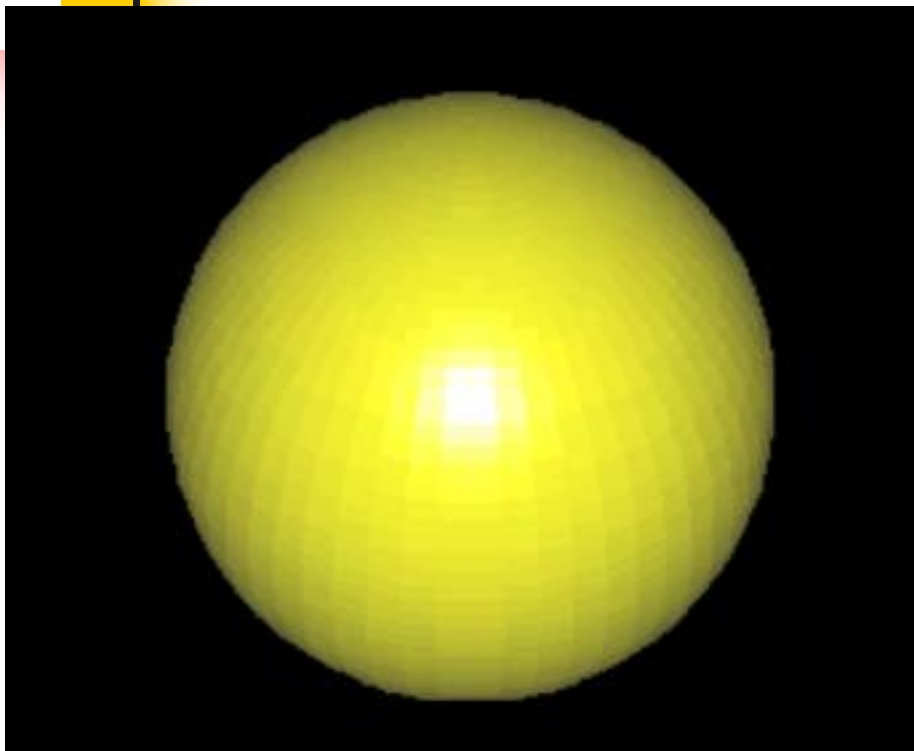
P点的颜色

Q点的颜色

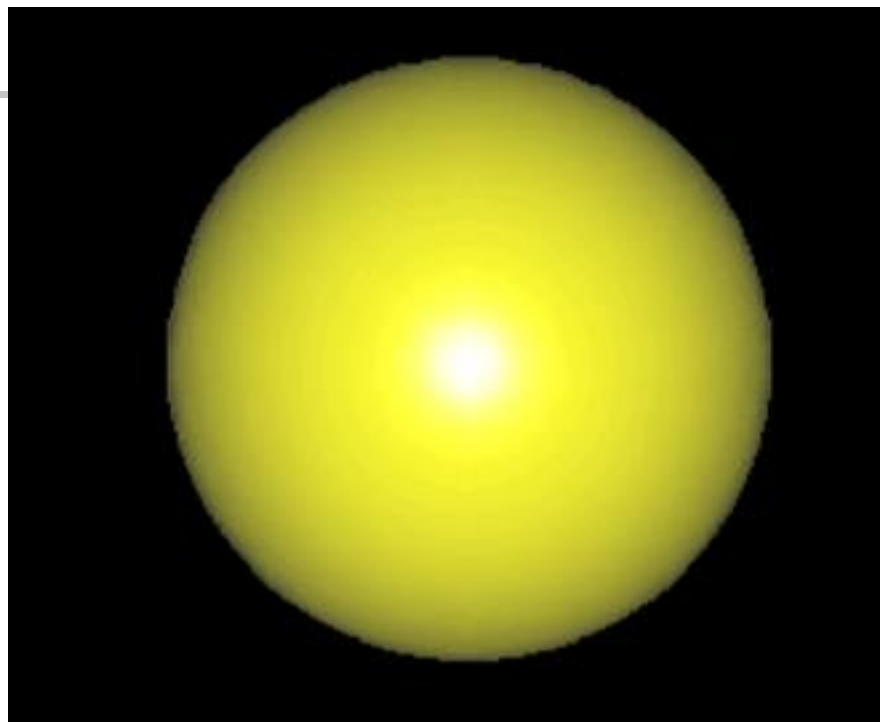


$$\begin{aligned} I_R &= \text{Color}(P)QR/PQ + \text{Color}(Q)PR/PQ \\ &= \text{Color}(P)(XQ - XR)/(XQ - YP) \\ &\quad + \text{Color}(Q)(XR - XP)/(XQ - XP) \end{aligned}$$

## ■ Gouraud明暗处理效果图



处理前马赫带效应



Gouraud明暗处理效果



## ■ Gouraud明暗处理的优缺点

- 优点 简单易行

- 缺点 只适用于简单的漫反射光照模型  
线性光强度插值引起的 **Mach-band**效应



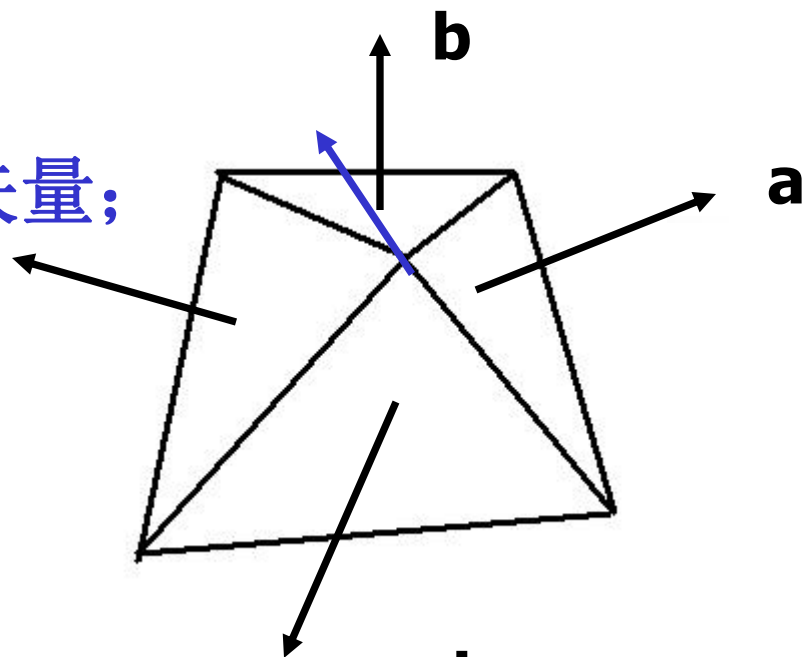
## ■ Phong 明暗处理

**DEF:** 多边形内部各点采用插值法求出法矢量，然后根据基本光照模型算出各点的颜色。

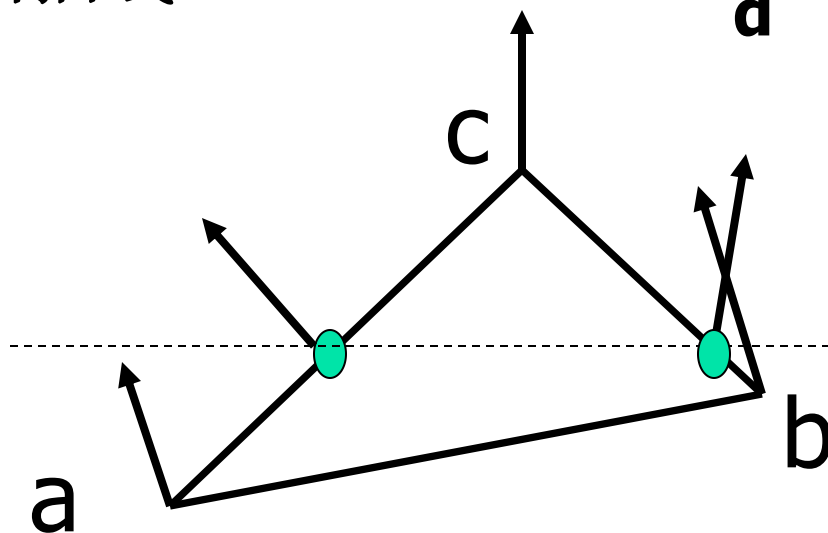
## ■ Phong 明暗处理步骤

- 1) 计算多边形的单位法矢量;
- 2) 计算多边形顶点的单位法矢量;
- 3) 根据 多边形各顶点法矢量 进行 双线性插值 获得位于多边形内的扫描线上各点的法矢量;
- 4) 利用光照模型计算各点的颜色

- 1) 计算多边形的单位法矢量;
- 2) 计算多边形顶点的单位法矢量;



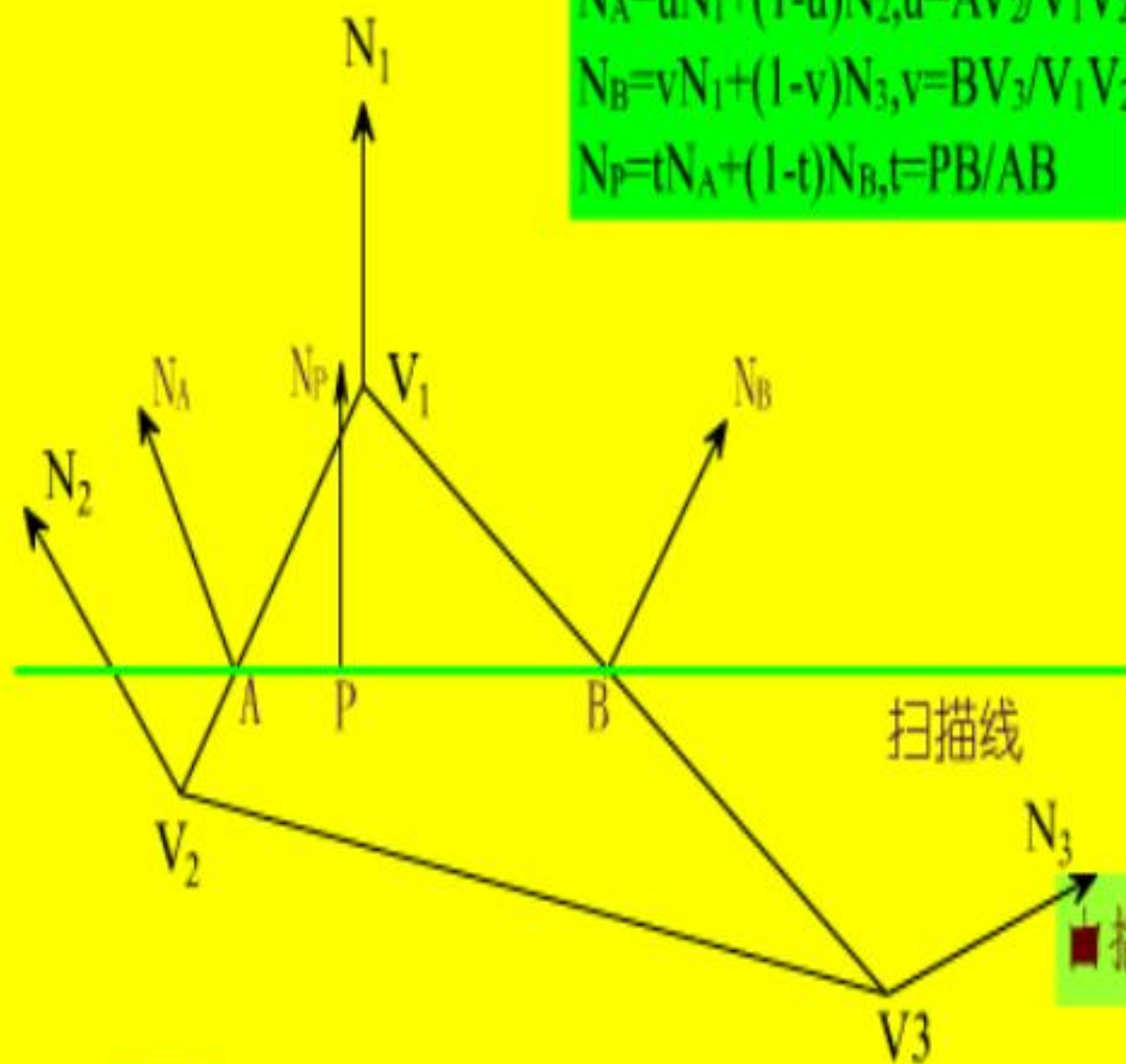
- 3) 根据多边形各顶点法矢量获得位于多边形内的扫描线上各点的法矢量



$$N_A = uN_1 + (1-u)N_2, u = AV_2/V_1V_2$$

$$N_B = vN_1 + (1-v)N_3, v = BV_3/V_1V_2$$

$$N_P = tN_A + (1-t)N_B, t = PB/AB$$



特点

保留双线性插值

对顶点的法向量插值

■ 插值法向计算每个像素的光亮

Replay

假设光源与视点位于无穷远



## ■ Phong明暗处理算法描述

1. 把曲面近似的分成若干个小平面
2. 计算各个小平面的法矢量 $n_1, n_2, \dots, n_m$ ( $m$ 为平面总数)
3. 计算各个小平面相交顶点上的法矢量的平均值, 即
$$n = (\sum n_i) / m$$
4. 根据式5-12和5-13计算两平面相邻边上个点的法矢量
5. 根据式5-14计算各小平面中各点法矢量
6. 根据光照模型, 计算所有点的光强度
7. end of algorithm

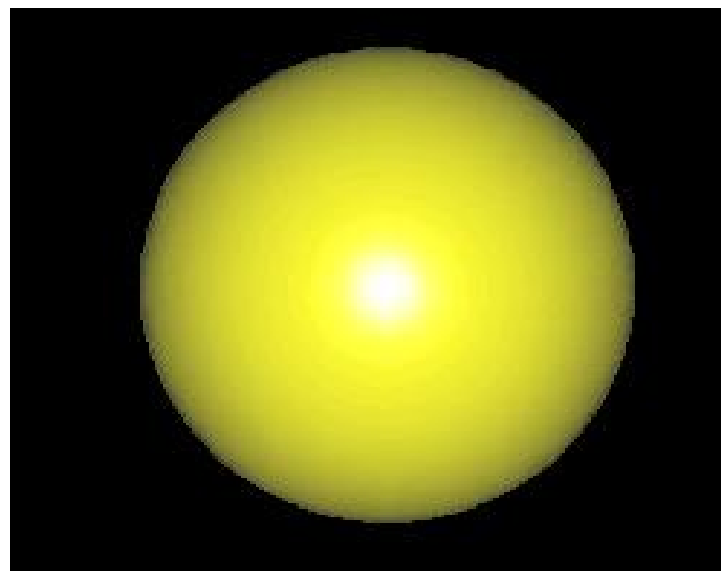
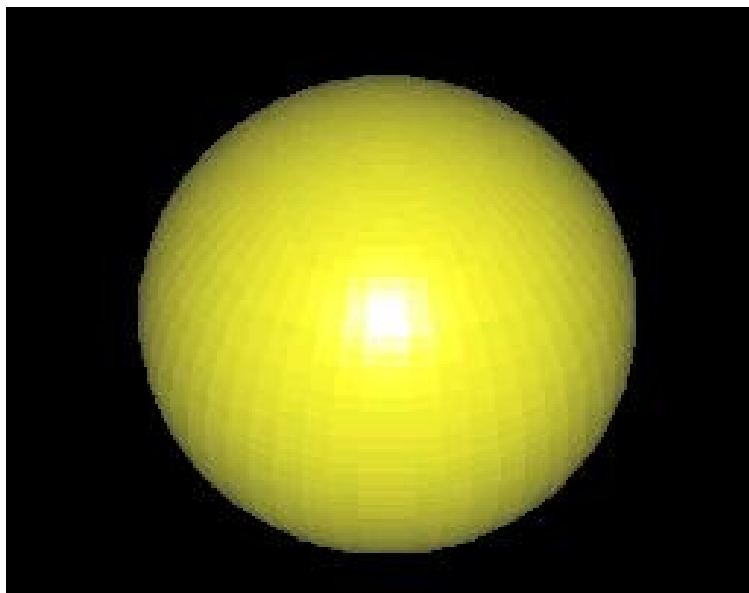
## ■ Phong 明暗处理

■ 优点:绘制的图形比**Gouraud**方法更真实,能获得较好的镜面效果

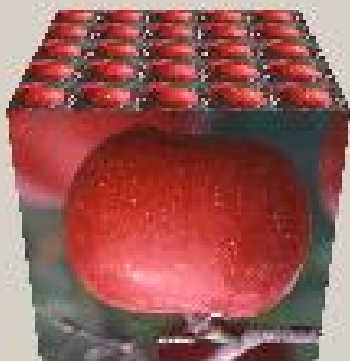
缺点:计算量远大于**Gouraud**方法

# 程序设计题

- 利用Phong明暗处理算法实现一个球体的明暗处理!



## ■ 7.4 纹理表示



■DEF: 在计算机图形学中，物体表面的细节称为纹理。

## ■ 考虑两种类型的纹理

一种是在光滑表面上绘制一定的花纹或图案，当花纹绘制后，表面仍然光滑如初。

这一过程可用一映射函数来描述

另一种是使物体表面出现凹凸不平的感觉。

这一过程则可用一个扰动函数来描述



## 我们主要讲解

第一种：在光滑表面上绘制一定的花纹或图案。

- 方法：用映射表示，用一个坐标系到另一个坐标系的变换来描述：
- 举例：



将图绘制到光滑的  
四分之一圆柱体上  
之后的效果





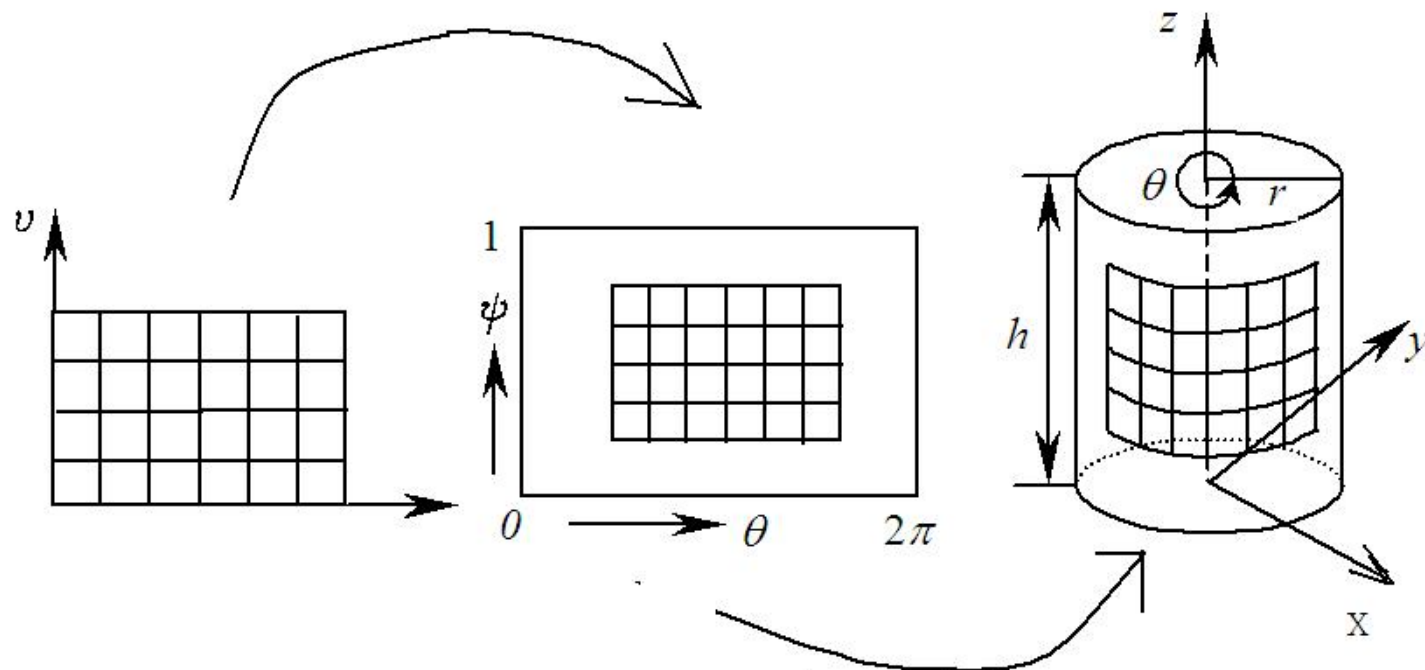
将图绘制到光滑的  
四分之一圆柱体上  
之后的效果



纹理空间

参数空间

景物空间

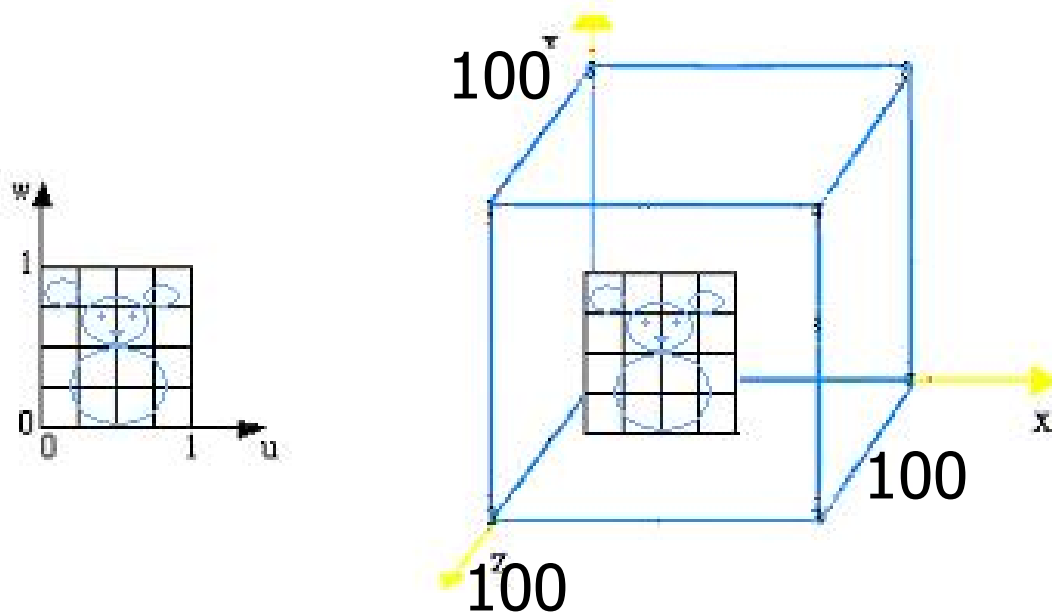


- 假设在纹理空间中的一个正交坐标系  $(u, w)$  中定义花纹和图案,
- 在图像空间中的另一个正交坐标系  $(\theta, \phi)$  中定义物体的表面
- 在表面上绘制花纹便需要在两个正交坐标系中定义一个映射函数,
- 即  $\theta = f(u, w), \quad \phi = g(u, w)$
- 一般考虑的映射函数为一个线性函数:  
$$\theta = Au + B, \quad \phi = Cw + D \quad (A, B, C, D \text{ 为常数})$$



# 例题

见图（1），给出一个线性函数，他把规范化的图像映射到了立方体前方平面的**50\*50**的正方形区域上



解答：首先给出目标区域的参数表示

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \theta \quad 25 \leq \theta \leq 75 \\ Y = \varphi \quad 25 \leq \varphi \leq 75 \\ z = 100 \end{array} \right.$$

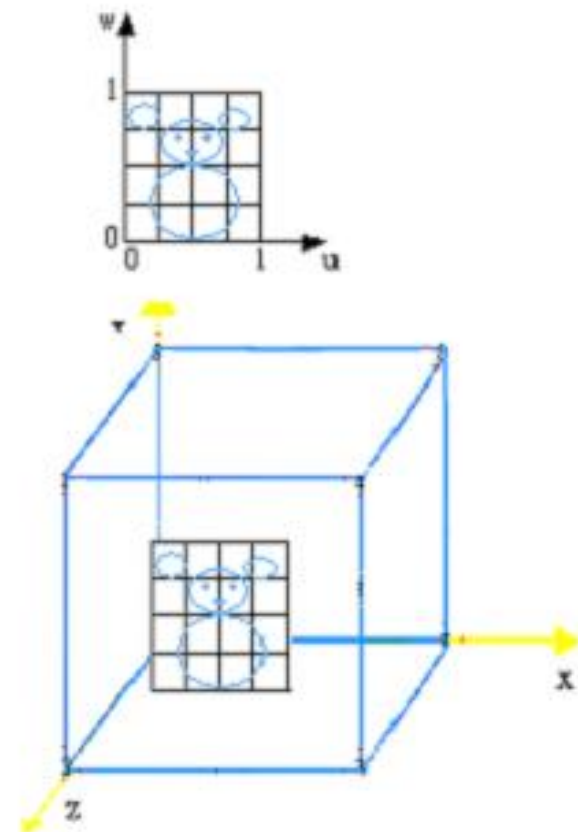
四个角的映射关系为：

$$u=0 \quad w=0 \quad \theta=25 \quad \varphi=25$$

$$u=1 \quad w=0 \quad \theta=75 \quad \varphi=25$$

$$u=0 \quad w=1 \quad \theta=25 \quad \varphi=75$$

$$u=1 \quad w=1 \quad \theta=75 \quad \varphi=75$$





- 代入

- $\theta = Au + B$

- $\varphi = Cw + D$

- 得

- $A=50 \quad B=25 \quad C=50 \quad D = 25$

- 所以映射函数是

$$\theta = 50u + 25$$

- $\varphi = 50w + 25$

- **例如**，图(1)所示图案将映射到图(2)所示第一象限中的球面片上，图案由二维网格构成。球面参数方程为：

$$\begin{aligned}x &= \sin\varphi \sin\theta \quad (0 < \theta < \pi/2, \\y &= \sin\varphi \cos\theta \quad (\pi/4 < \varphi < \pi/2) \\z &= \cos\varphi\end{aligned}$$

设网格图案的四角分别映射到球面四边形的四角上，即

$$u=0, w=0 \text{ 映射到 } \theta=0, \varphi=\pi/2$$

$$u=1, w=0 \text{ 映射到 } \theta=\pi/2, \varphi=\pi/2$$

$$u=0, w=1 \text{ 映射到 } \theta=0, \varphi=\pi/4$$

$$u=1, w=1 \text{ 映射到 } \theta=\pi/2, \varphi=\pi/4$$

- 代入

$$\theta = Au + B$$

$$\varphi = Cw + D$$

$$\text{■ 可得 } A=\pi/2, B=0,$$

$$\text{■ } C=-\pi/4, D=\pi/2$$

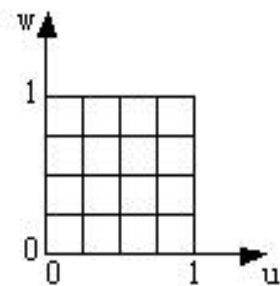


图 (1)

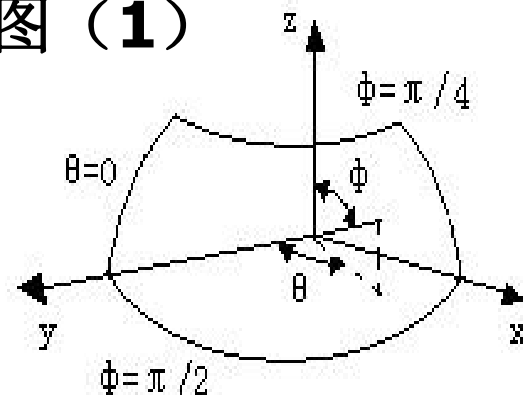


图 (2)

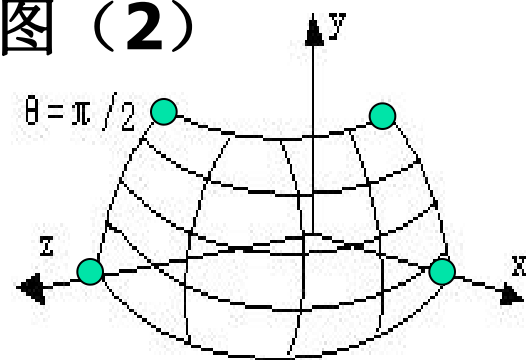


图 (3)

- 对应的映射函数为：

$$\theta = u\pi/2$$

$$\phi = \pi/2 - w\pi/4;$$

- 该映射函数将 $uw$ 空间中的图案映射到 $\theta\phi$ 空间，再按球面参数方程把 $\theta\phi$ 空间中的图案变换到 $xyz$ 坐标系中

图 (1)

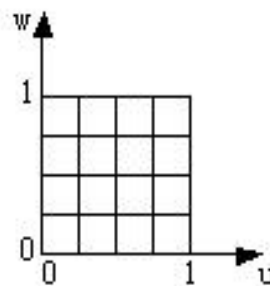


图 (2)

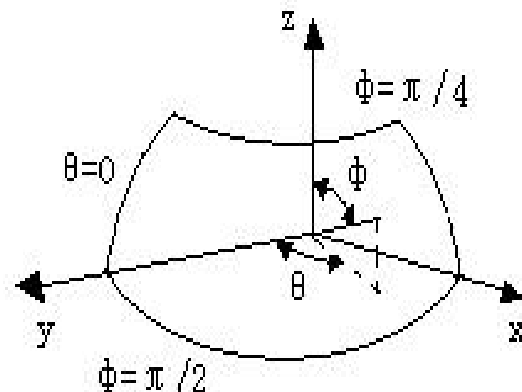
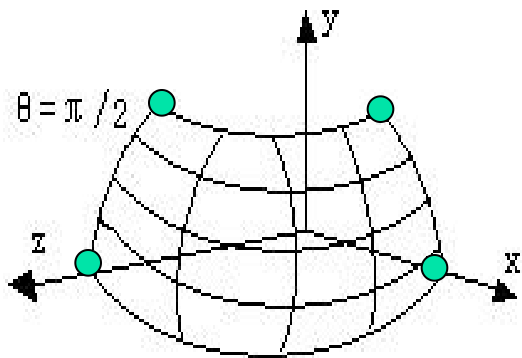
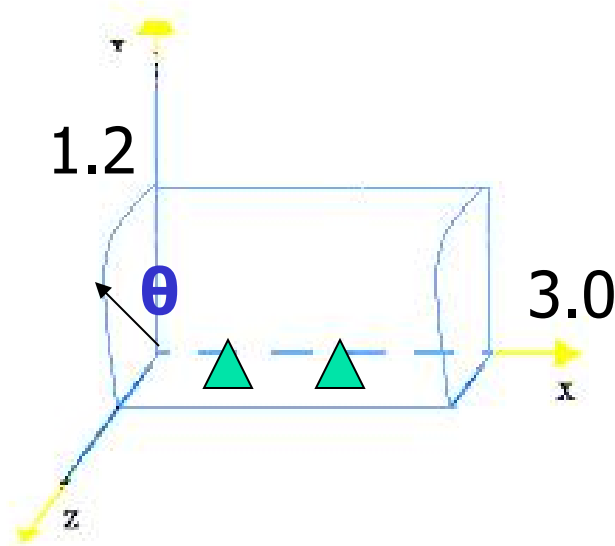
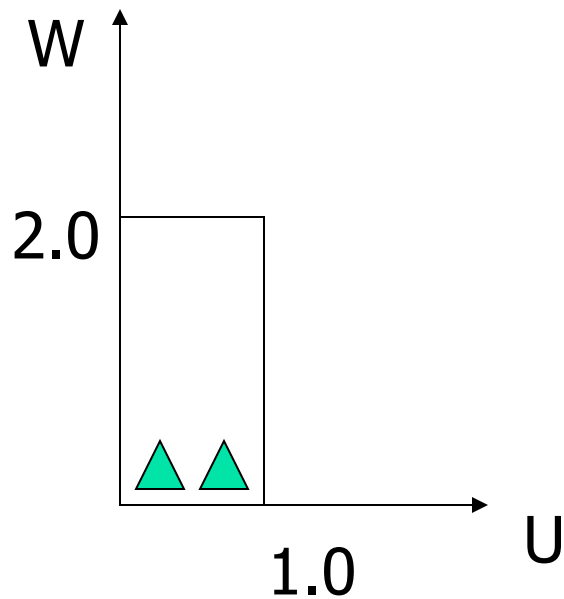


图 (3)



## ■ 课堂练习题

- 给出一个线性函数，它把一个**1.0\*2.0**的纹理图映射到第一象限的柱面上，请写出映射函数





---

■ 所以映射函数是

$\theta = ?$

■  $\varphi = ?$

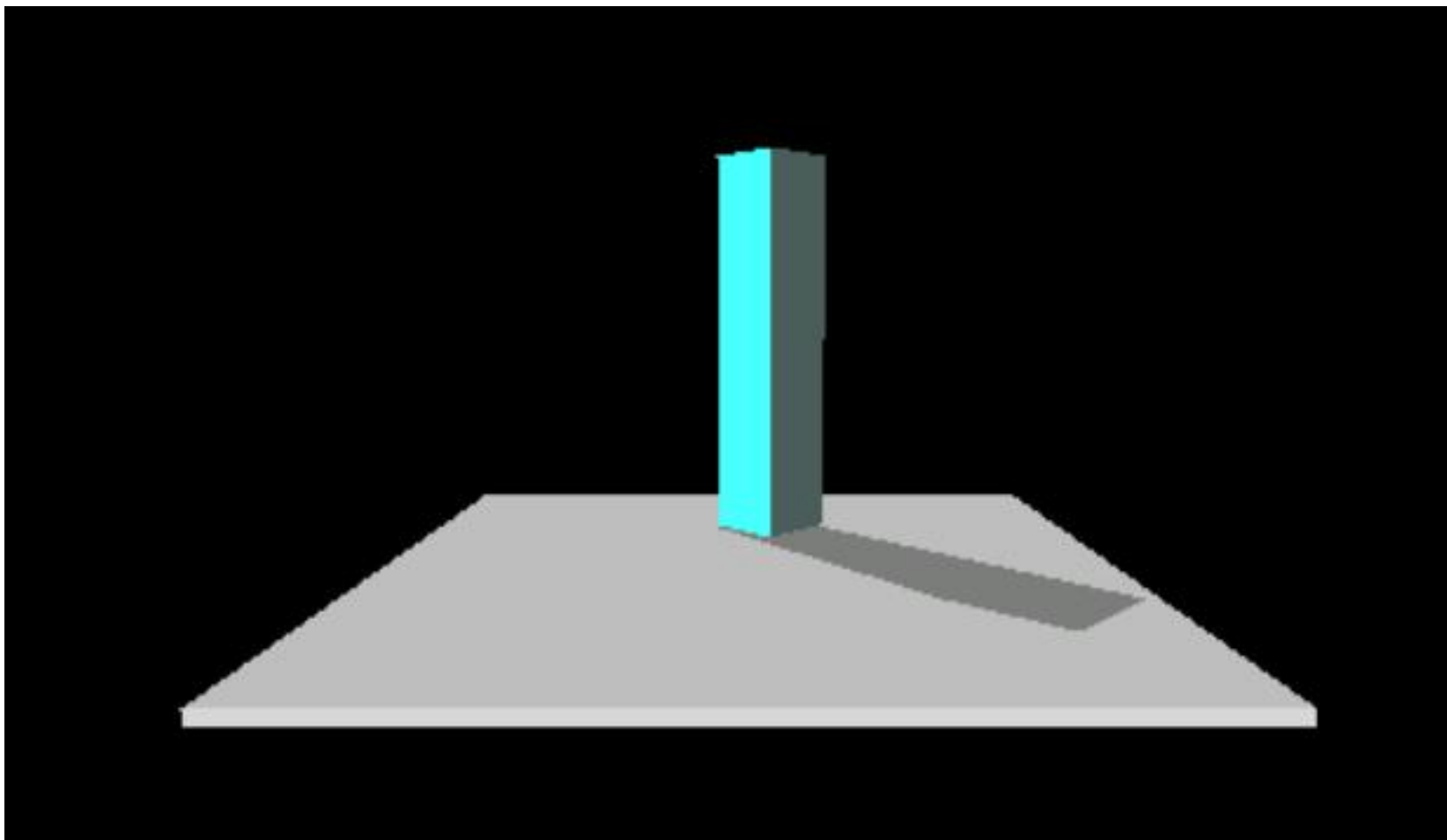


---

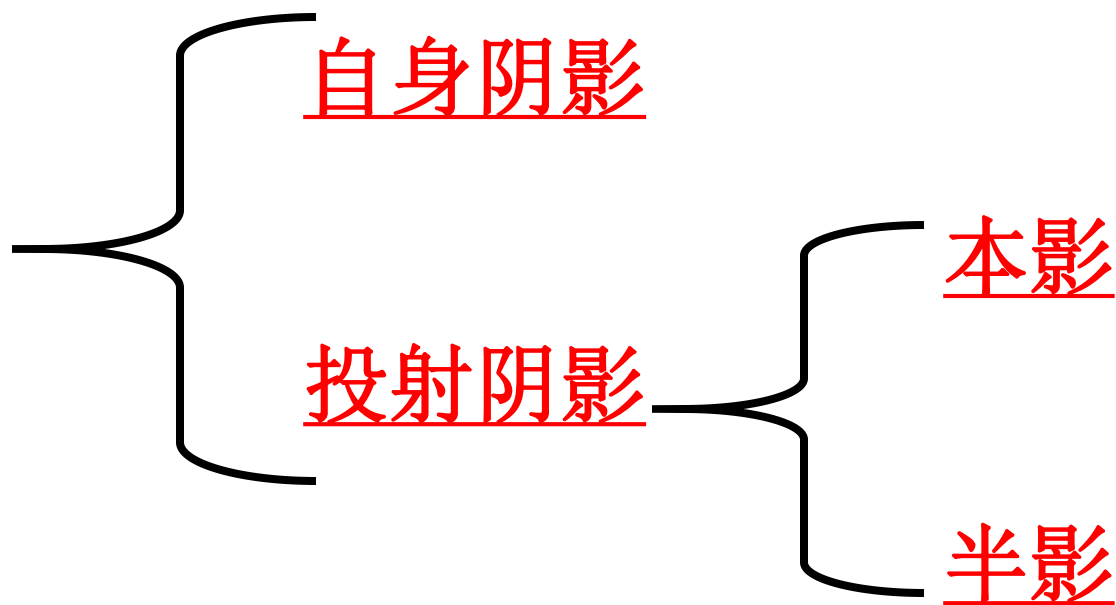
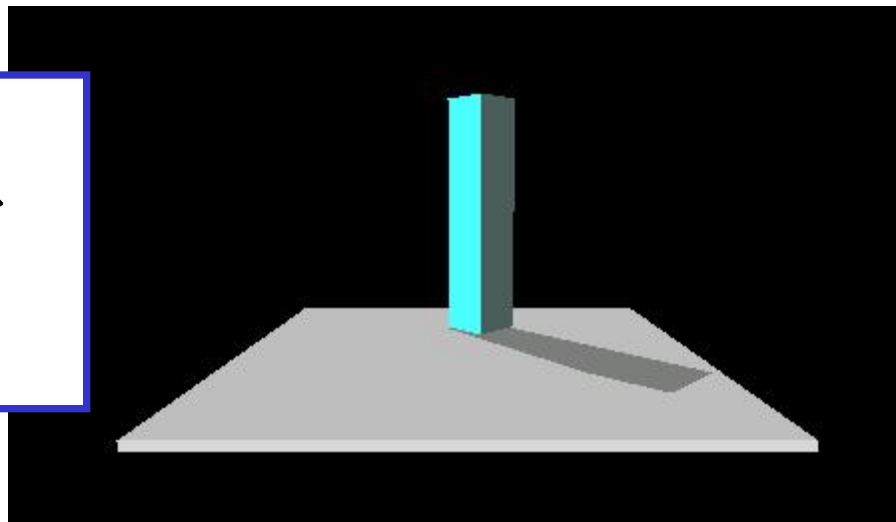
## 6.4 阴影生成



## 7.5 阴影生成算法



**定义：**阴影是指景物中那些没有被光源直接照射到的暗区



- 
- **自身阴影：**物体本身遮挡使光线照不到的某些面称为自身阴影
- 

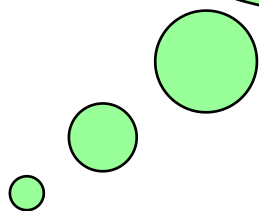
- **投射阴影：**由于物体遮挡使得场景中位于他后面的物体受不到光照而形成的

**本影：**没有被光源直接照射的部分，全黑的轮廓分明部分

**半影：**被一部分光源直接照射但没有被其余光源直接照射的部分



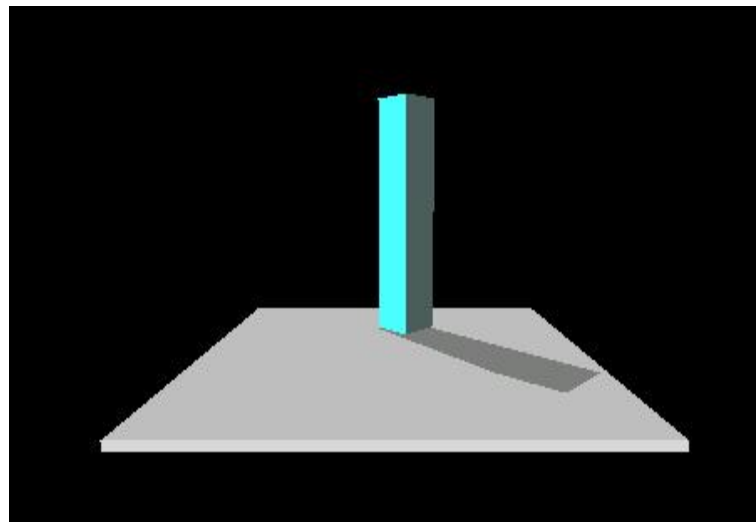
什么时候会没有半影？



我们讨论的就只有本影的情况！

# 自身阴影的生成算法！

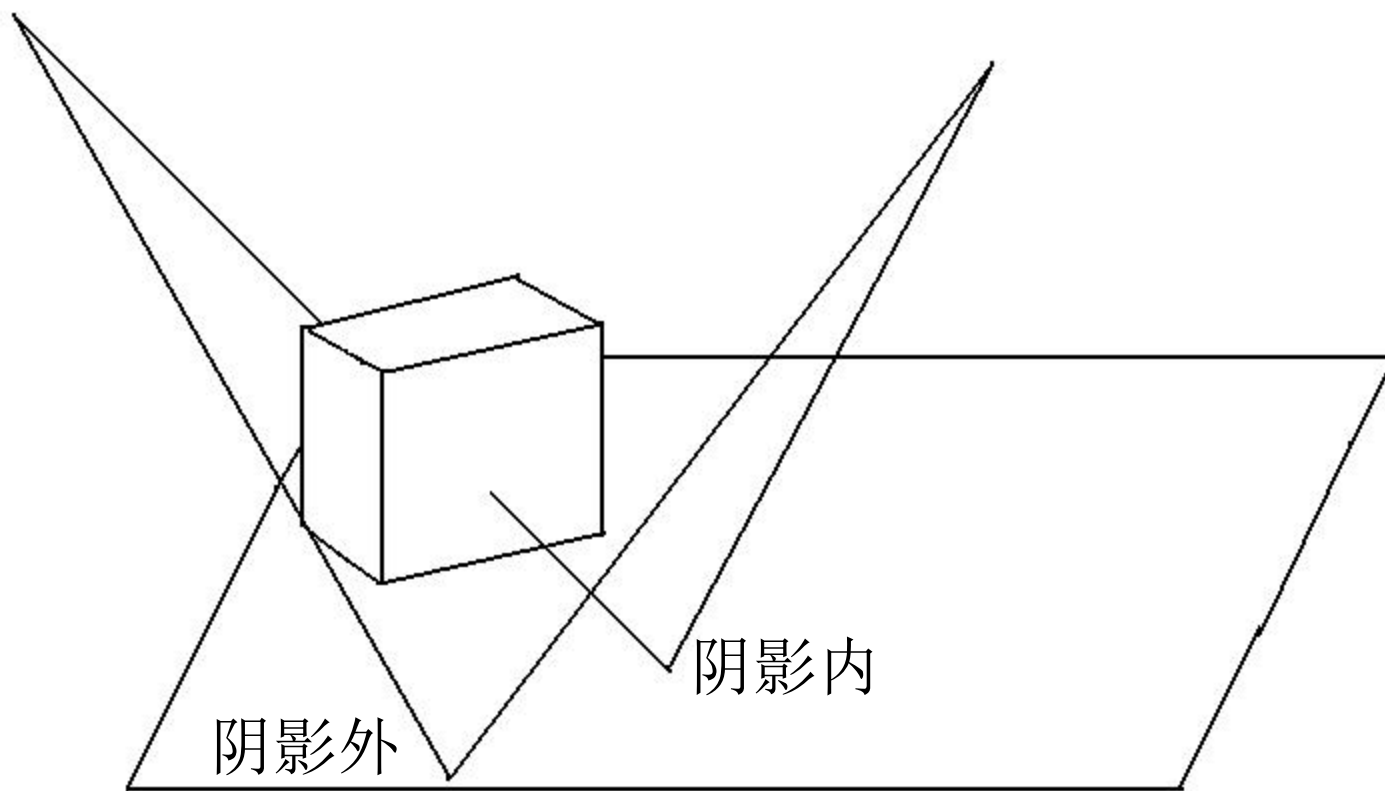
- (1)** 首先将视点至于光源位置，以光线照射方向作为观察方向，对在光照模型下的物体实施消隐算法，判别处在光照模型下物体的隐藏面，并且做上记号。
- (2)** 按照实际视点位置和观察方向，对物体实施消隐算法生成真正消隐后的立体图形。
- (3)** 检索（2）生成的立体图形中是否包含有在光照模型下的隐藏面，若有以阴影符号表示这些面。



# ■ 本影生成算法1——光线跟踪算法

光源

视点



## ■ 算法1:

- (1) 从视点出发, 向阴影的投射平面发出一条射线, 如果中间没有遮挡物, 那么射线将会和阴影投射平面又一个交点(可见点)
- (2) 从可见点出发, 向光源再发射一条射线。如果第二条射线在到达光源之前遇到了物体的阻挡(即射线和物体有交点) 那么该点处于该物体的投射阴影区内, 否则不处于投射阴影区内

## ■ 算法优缺点:

- 算法简单, 实现容易, 计算量达, 浪费时间

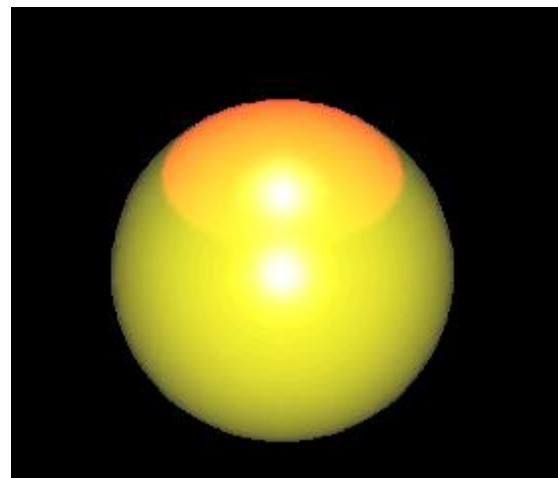




# ■ 镜面高光指数

- DEF: 用于模拟镜面反射光在空间的会聚程度
- 由物体表面材质的光滑程度决定
- 较光滑的物体表面（如金属、玻璃等）
  - 光强的空间分布较集中，高光范围较小
  - 宜取较大的值（大于100或更大）
- 粗糙的物体表面（如纸张、木材、粉笔等）
  - 光强的空间分布较分散，高光范围较大
  - 宜取较小的值（小于或接近于1）

[返回](#)



- 人所能感觉到的颜色中大部分能够通过三种基本颜色以适当比例混合而制作出来，这是自古以来从许许多多的经验中得出结论。
- 在人眼视网膜上存在感受红、绿、蓝色的光接受器（锥状体），分别对红、绿、蓝三种光最敏感，一切颜色特性都由这些锥状体的响应量的比例来表示”

[返回](#)