



第八章 真实感图形的绘制

- 第一节 漫反射及具体光源的照明
- 第二节 多边形网的明暗处理
- 第三节 阴影
- 第四节 透明
- 第五节 纹理
- 第六节 整体光照模型
- 第七节 颜色模型



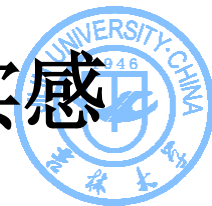
用计算机在图形设备上生成连续色调的**真实感图形**必须完成四个基本的任务。

第一 用数学方法建立所构造三维场景的**几何描述**，并将它们输入至计算机。

第二 将三维几何描述转换为**二维透视图**。

第三 确定场景中的所有可见面，这需要**使用隐藏面消除算法**将被其它物体遮挡的不可见面消去。

第四 计算场景中可见面的颜色，严格地说，就是根据基于光学物理的光照明模型计算可见面投射到观察者眼中的光亮度大小和颜色组成，并将它转换成适合图形设备的颜色值，从而确定投影画面上每一象素的颜色，最终生成图形。



在光栅图形系统上显示的三维图形的真实感取决于**明暗模型**。

- **明暗模型**：指模拟明暗效应的模型，用以计算可见表面应该显示的亮度和彩色。
- 明暗模型并不需要精确地考虑真实世界中光线和表面的性质，而只需要在兼顾精确程度和计算成本的要求下，追求更好的显示效果。



明暗模型需要考虑的主要问题是**照明特性、表面特性和观察角度**。

- **照明特性**：指可见表面被照明的情况，主要有**光源**的数目和性质，环境光及阴影效应等。
- **表面特性**：指**表面**对入射光线的反射、折射或透明的不同情形，还有表面的纹理及颜色等。
- **观察角度**：观察景物时**观察者**相对可见表面所在的**位置**。

不同明暗模型的区别：

- 模拟的**方法**，
- 实现的**复杂程度**，
- 显示**效果**等方面。



明暗模型可以分解为三个部分，

- 散射照明
 - 漫反射
 - 镜面反射
- 具体光源的照射
- 透射效应

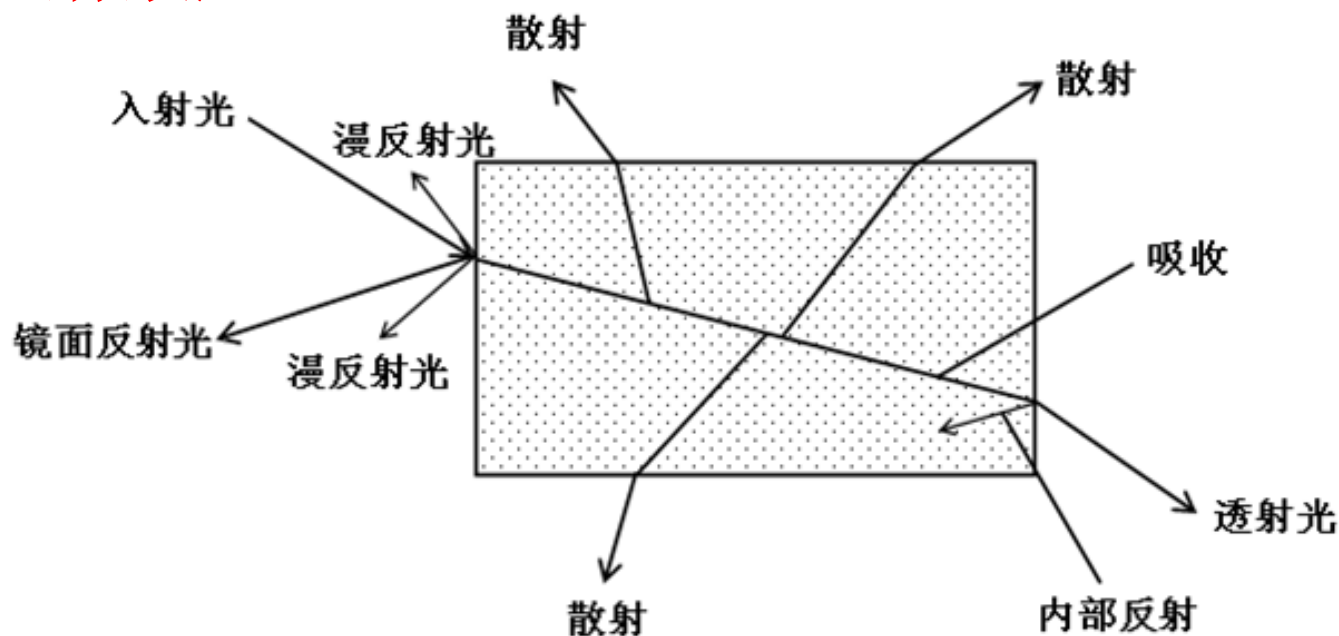
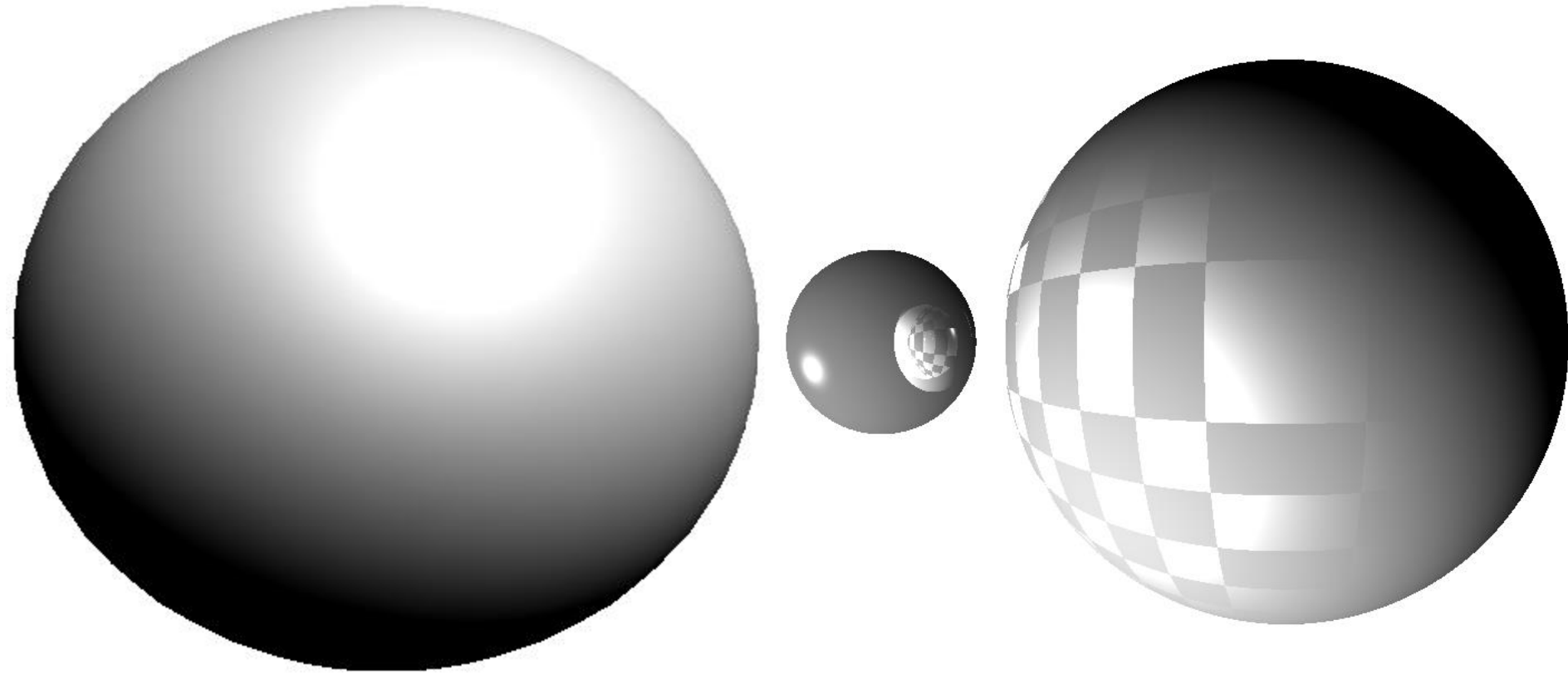


图 9.1 光照射物体



简单的光照模型仅考虑光源照射在物体表面产生的反射光。

复杂的光照明模型(整体光照模型)要考虑周围环境的光对物体表面的影响。





第一节 漫反射及具体光源的照明

1. 环境光

在多数实际环境中，存在由于许多物体表面多次反射而产生的均匀的照明光线，这就是环境光线。环境光线的存在使物体得到漫射照明。亮度计算如下：

$$I = I_a \cdot K_a$$

其中 I 是可见表面的亮度， I_a 是环境光线的总亮度， K_a 是物体表面对环境光线的反射系数，它在0到1之间。

2. 漫反射

漫反射是指来自具体光源的能量到达表面上的某一点后，就均匀地向各个方向散射出去，使得观察者从不同角度观察时，这一点呈现的亮度是相同的。

通常不光滑的粗糙表面总是呈现出漫反射的效果。

Lambert定律指出，漫反射的效果与表面相对于光源的取向有关，即：

$$I_d = I_p \cdot K_d \cdot \cos\theta$$

其中 I_d 是漫反射引起的可见表面上一点的亮度。 I_p 是点光源发出的入射光线引起的亮度。 K_d 是漫反射系数，它的取值在0到1之间，随物体材料不同而不同。 θ 是可见表面法向 N 和点光源方向 L 之间的夹角，即入射角，它应该在 0° 到 90° 之间。

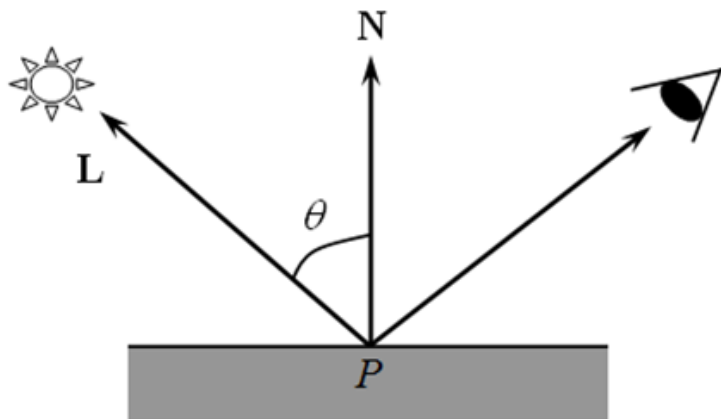


图 9.2 Lambert 漫反射几何说明

为了简化公式中余弦值的实际计算，可以假定向量 \mathbf{N} 和 \mathbf{L} 都已经正规化，即已经是长度为1的单位向量，这样就可以使用向量的数量积或内积。

因为这时 $\cos\theta = \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}$ ，于是得：

$$I_d = I_p \cdot K_d \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N})$$

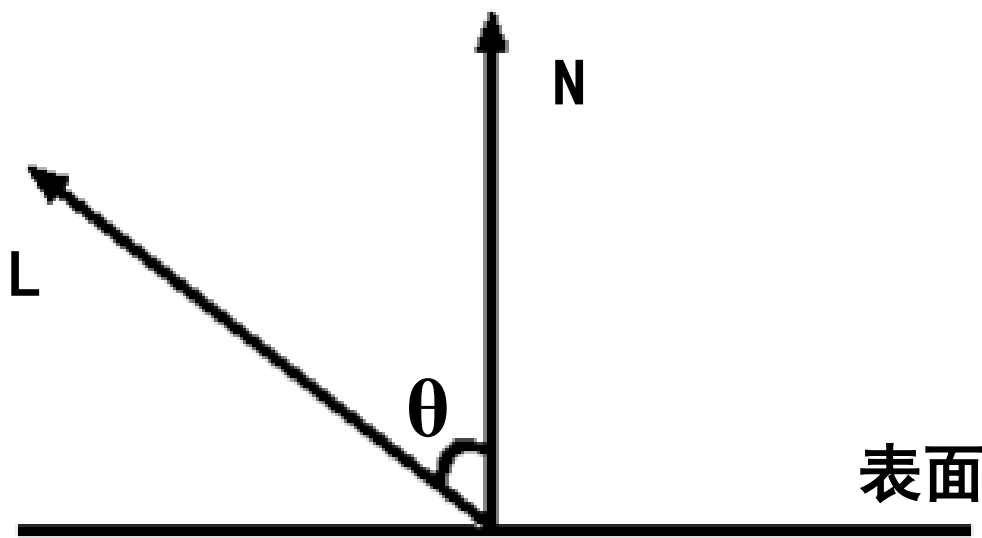
将环境光线和漫反射的效果结合起来，计算亮度的公式应该写成：

$$I = I_a \cdot K_a + I_p \cdot K_d \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N})$$



通常认为具体光源对可见表面产生的照明作用，是随着光源与表面之间距离的增加而下降的。设 R 是光线从光源发出到达表面再返回的距离，则

$$I = I_a \cdot K_a + I_p \cdot K_d \cdot (L \cdot N) / R^2$$





对于平行投影，光源在无穷远处，故距离 R 成为无穷大。对于透视投影， $1/R^2$ 也常常有很大的数值范围而使效果不好。一种比较逼真的效果，可通过用 $r+k$ 代替 R^2 来获得：

$$I = I_a \cdot K_a + I_p \cdot K_d \cdot (L \cdot N) / (r+k)$$

其中 r 是光源到表面的距离， k 是根据经验选取的一个常数。



3. 镜面反射与Phong模型

镜面反射是指来自具体光源的光能到达可见表面上的某一点后，主要沿着由**射入角等于反射角**所决定的方向传播，从而使观察者从不同角度观察时，这一点呈现的亮度并不相同。

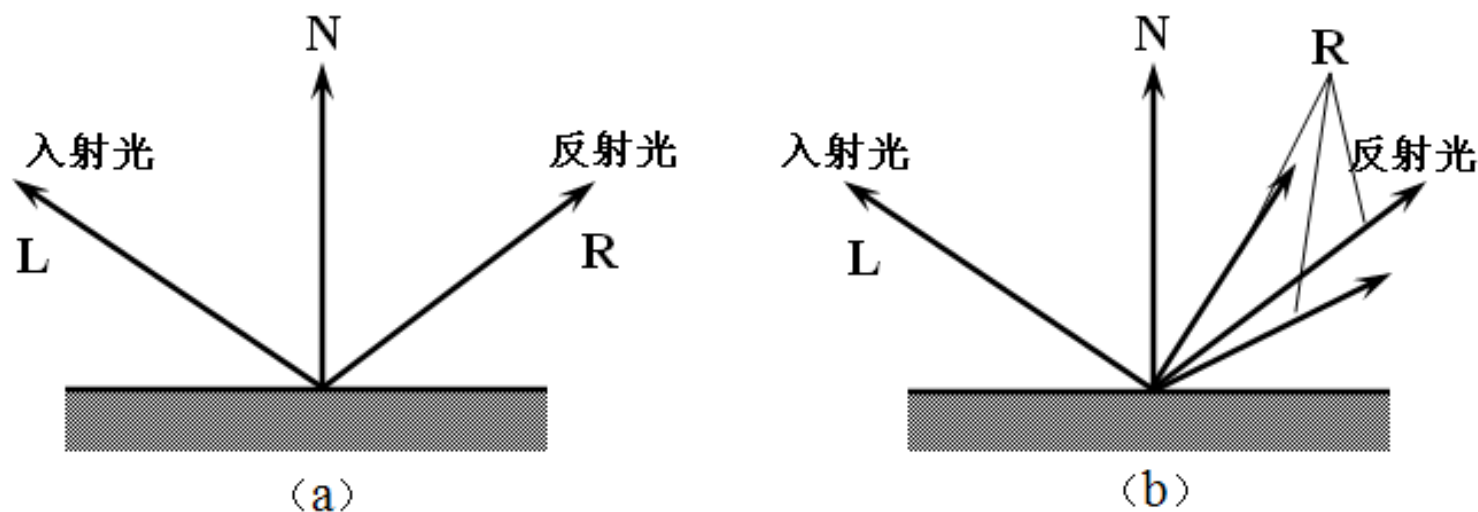


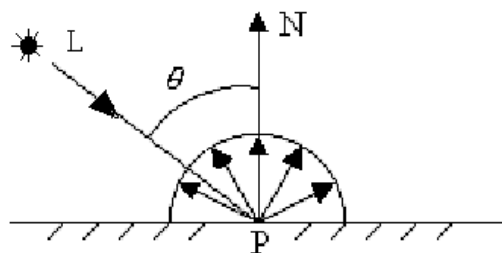
图 9.5 镜面反射几何关系

(a) 理想镜面反射； (b) 一般光滑表面的镜面反射

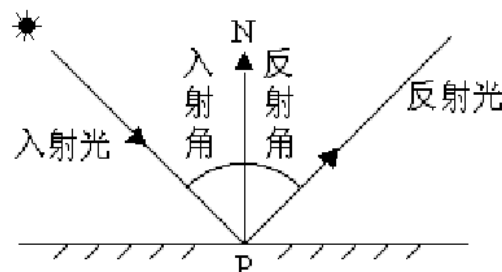


□ 光学反射模型

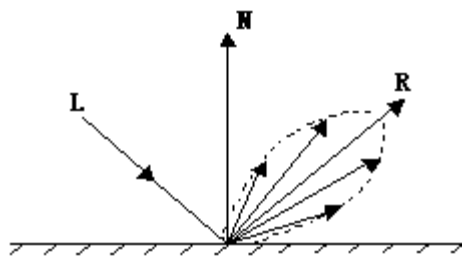
通常物体表面的反射光可以认为包含三个分量：对环境光的反射、对特定光源的漫反射和镜面反射。



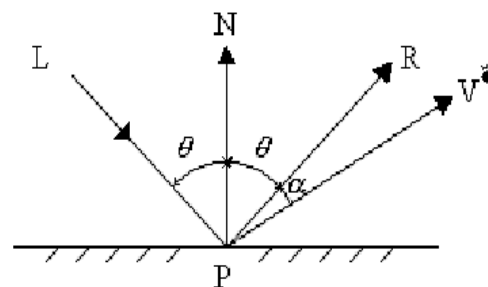
(a) 漫反射



(b) 理想镜面反射

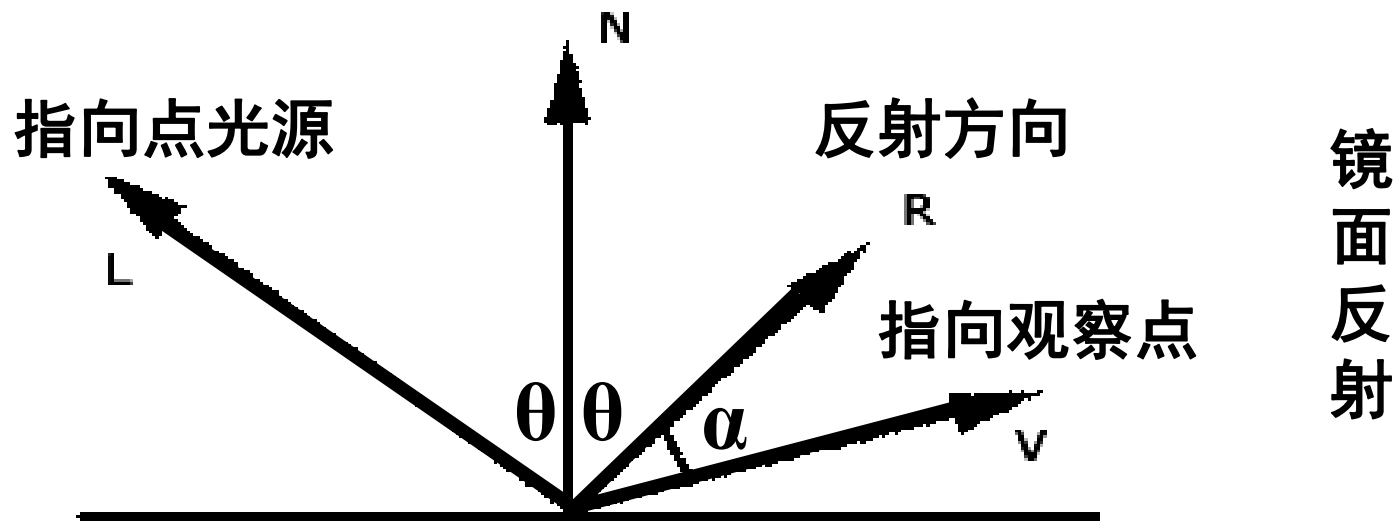


(c) 一般光滑表面的镜面反射



(d) 理想镜面反射方向
与视线方向的夹角

光学反射模型

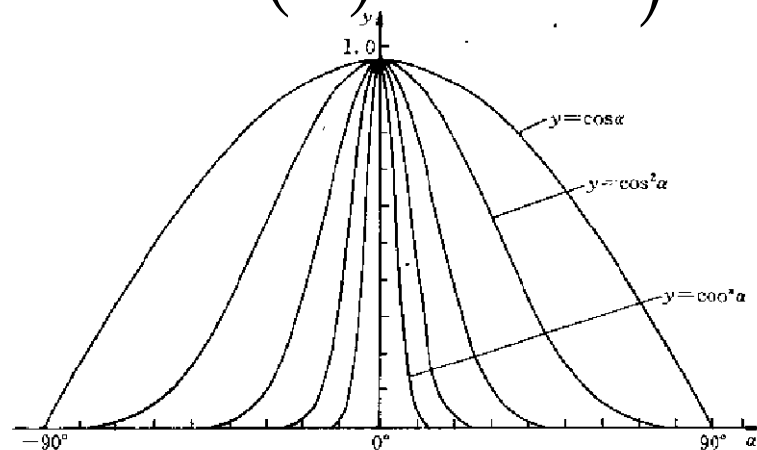


在镜面反射的示意图中，只有当观察者相对表面的方向 V 与反射光线的方向 R 之间的夹角 α 为零时，才能看到镜面反射引起的反射光线。对于不是非常理想的光泽表面，反射光线引起的亮度随着 α 的增大而迅速下降。

由 Phong Bui-Tuong 提出的光照明模型，用 $\cos^n \alpha$ 来近似反射光线引起的亮度随着 α 增大而下降的速率。 n 取值决定于反射表面的有关性质。对于理想的反射表面， n 就是无穷大。这里选用 $\cos^n \alpha$ ，是以经验观察为基础的。

被镜面反射的入射光的数量是与入射角 θ 有关的。如果将镜面反射光的百分数记为 $W(\theta)$ ，那么就可以将计算表面亮度的公式修改而得到：

$$I = I_a \cdot K_a + \frac{I_p}{r + k} \left(K_d \cdot \cos \theta + W(\theta) \cdot \cos^n \alpha \right)$$

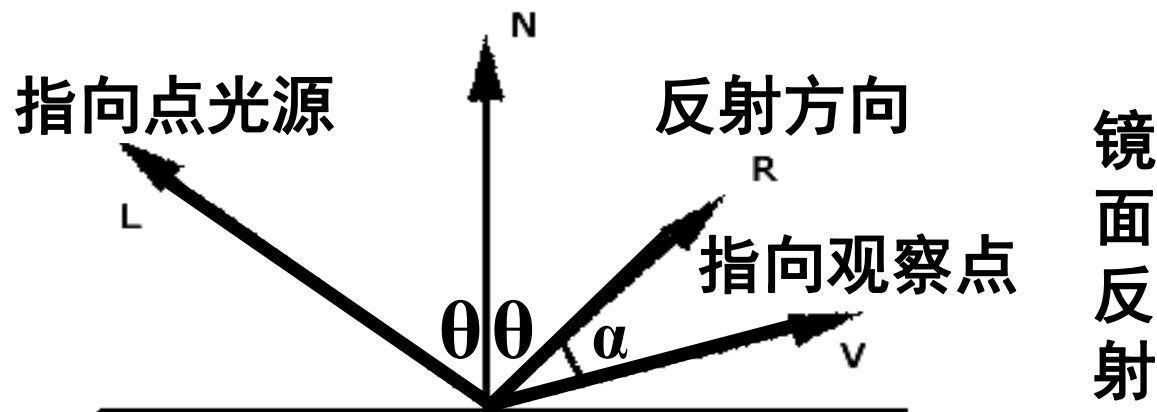




假定反射光线的方向向量 \mathbf{R} 和指向观察点的向量 \mathbf{V} 都已经正规化，即已经是长度为1的单位向量，于是可以简单地利用向量内积计算余弦值： $\cos\alpha = \mathbf{R} \cdot \mathbf{V}$ 。

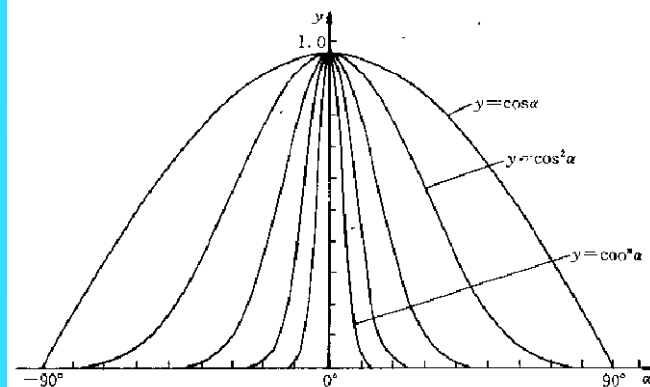
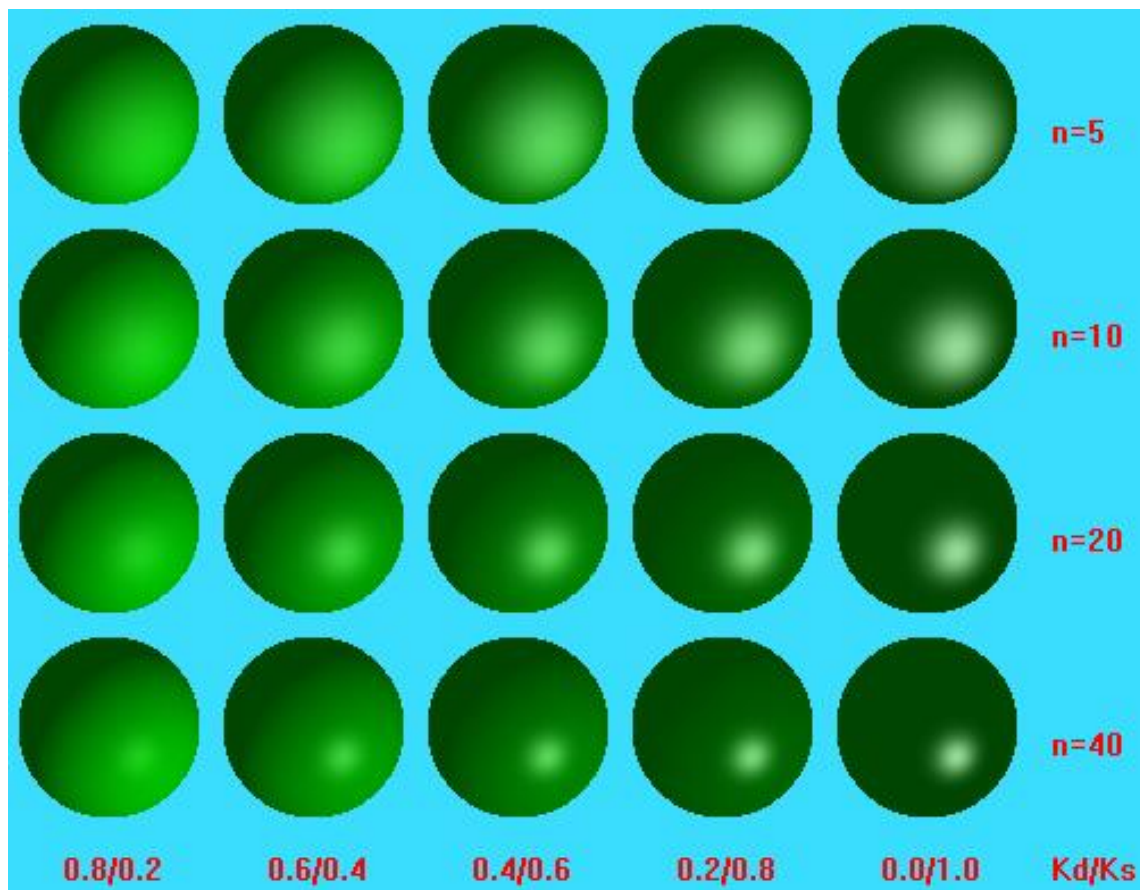
对 $W(\theta)$ ，通常根据经验选取一个常数 k_s 来代替，这样公式可写成下面更容易计算的形式：

$$I = I_a \cdot K_a + \frac{I_p}{r + k} \left(K_d (L \cdot N) + K_s (R \cdot V)^n \right)$$





Phong模型示例



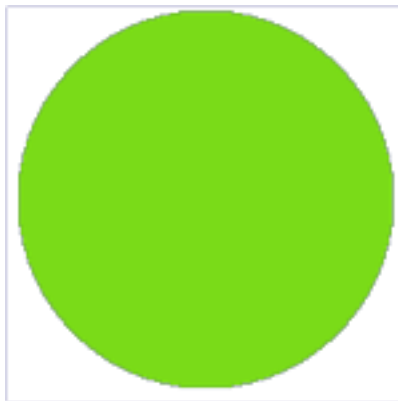


Phong模型示例



理想漫反射

+



环境光

+



镜面反射

=

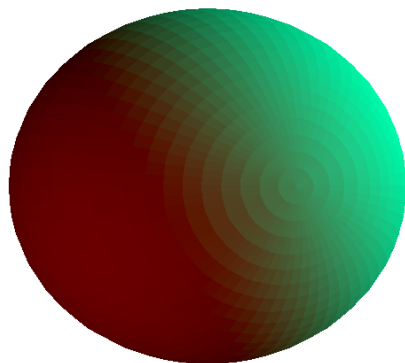




对于彩色表面，只需分别对各颜色分量进行计算。例如，选择通常的红、绿、蓝颜色系统，这时上述公式中有关亮度及反射系数等，就要看做是三元向量。通过分别对各颜色分量进行计算，就可以完成对彩色表面的亮度计算。

- **Phong**光照明模型的**RGB**颜色模型形式：

$$\begin{cases} I_r = I_{ar} K_{ar} + I_{pr} K_{dr} (L \cdot N) + I_{pr} K_{sr} (R \cdot V)^n \\ I_g = I_{ag} K_{ag} + I_{pg} K_{dg} (L \cdot N) + I_{pg} K_{sg} (R \cdot V)^n \\ I_b = I_{ab} K_{ab} + I_{pb} K_{db} (L \cdot N) + I_{pb} K_{sb} (R \cdot V)^n \end{cases}$$

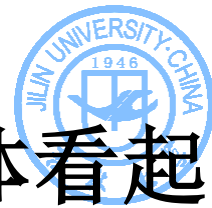




4. 光的衰减

光在传播的过程中，其能量会衰减。光的传播过程分为两个阶段：

- 从光源到物体表面的传播。第一个传播阶段的衰减使物体表面的入射光强度变弱。
- 从物体表面到人眼的传播。第二个阶段的衰减使人眼接受到的物体表面的反射光的强度变弱。



(1)光在光源到物体表面的过程中的衰减。

在同一光源的照射下，距光源近的物体看起来亮，而距光源较远的物体看起来暗。

衰减比例为光的传输距离平方的倒数，若以衰减函数 $f(d)$ 来表示衰减的比例，则

$$f(d)=1/d^2$$

其中， d 为光的传播距离。



真实的世界中物体并不是以点光源照射的。
为了弥补点光源的不足，产生真实感更强的图形，一个有效的衰减函数的取法如下：

$$f(d)=\min(1/(C_0+C_1d+C_2d^2),1)$$

考虑 $f(d)$ ，得到光照明计算式

$$I=K_a \cdot I_a + f(d) \cdot I_p \cdot [K_d(L \cdot N) + K_s(R \cdot V)]$$

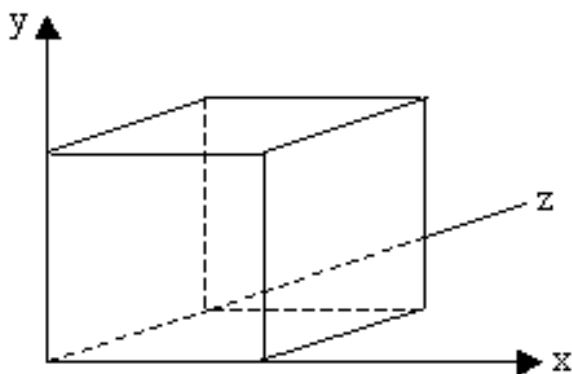


(2)光在物体表面到人眼过程中的衰减

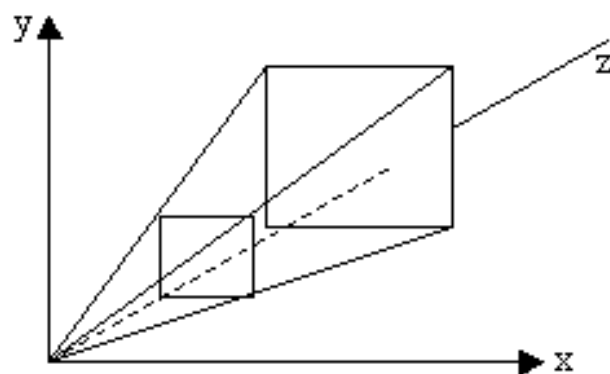
为模拟光在这段传播过程中的衰减，许多系统采用深度暗示技术（Depth Cueing）。

1. 确定衰减比例

在观察坐标系中定义两个平面 $Z=Z_f$, $Z=Z_b$, 分别为前参考面与后参考面，并赋予比例因子 S_f 和 S_b ($S_f, S_b \in [0,1]$)。



(a)



(b)



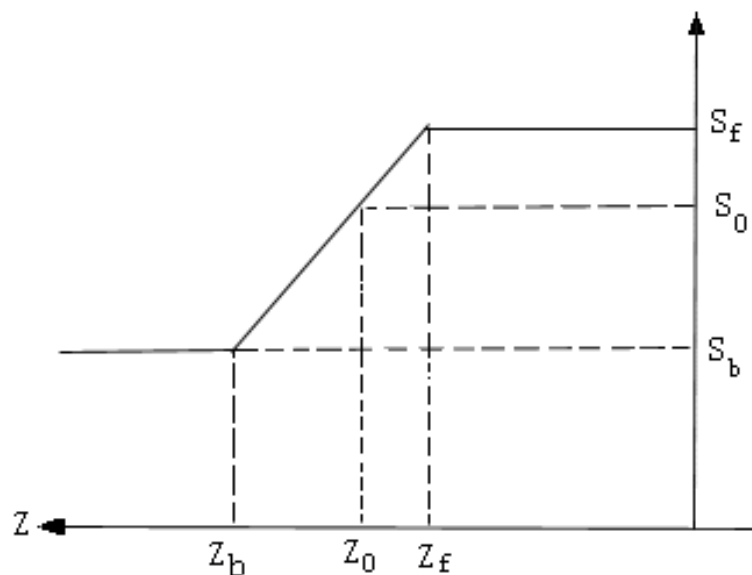
给定物体上一点的深度值 Z_0 ,该点对应的比例因子 S_0 这样来确定:

当 $Z_0 < Z_f$ 时 (Z_0 较 Z_f 更近), 取 $S_0 = S_f$

当 $Z_0 > Z_b$ 时 (Z_0 较 Z_f 更远), 取 $S_0 = S_b$

当 Z_0 在 $[Z_b, Z_f]$ 时, S_0 按下式计算

$$S_0 = S_f + \frac{Z_0 - Z_f}{Z_b - Z_f} \times (S_b - S_f) = \frac{Z_b - Z_0}{Z_b - Z_f} S_f + \frac{Z_0 - Z_f}{Z_b - Z_f} S_b$$





2. 计算显示亮度

原亮度 I （由光照明模型计算出来的值）按比例 S_0 与亮度 I_{dc} 混合，目的是获得最终用于显示的亮度 I' ， I_{dc} 由用户指定，

$$I' = S_0 I + (1 - S_0) I_{dc}$$

若取 $S_f=1$, $S_b=0$, $I_{dc}=0$,

- 当物体位于前参考面之前 ($Z_0 < Z_f$) 时, $I' = I$, 即亮度没有被衰减。
- 当物体位于后裁剪面之后 ($Z_0 > Z_b$) 时, $I' = I_{dc} = 0$, 即亮度被衰减为0。
- 当 $Z_0 \in [Z_f, Z_b]$ 时, $I' = S_0 I$, 亮度被部分衰减。由此可以产生真实效果较好的图形。

$$S_0 = S_f + \frac{Z_0 - Z_f}{Z_b - Z_f} \times (S_b - S_f) = \frac{Z_b - Z_0}{Z_b - Z_f} S_f + \frac{Z_0 - Z_f}{Z_b - Z_f} S_b$$



第二节 多边形网的明暗处理

多边形网方法是指用若干多边形表面去拟合任意形状复杂形体的方法。

对用多边形网方法表现的任意形体，形成明暗有三种基本的方法

- **常数**明暗法（均匀着色法）
- **亮度插值**明暗法（Gouraud着色方法）
- **法向量插值**明暗法（Phong着色方法）



1. 常数明暗法

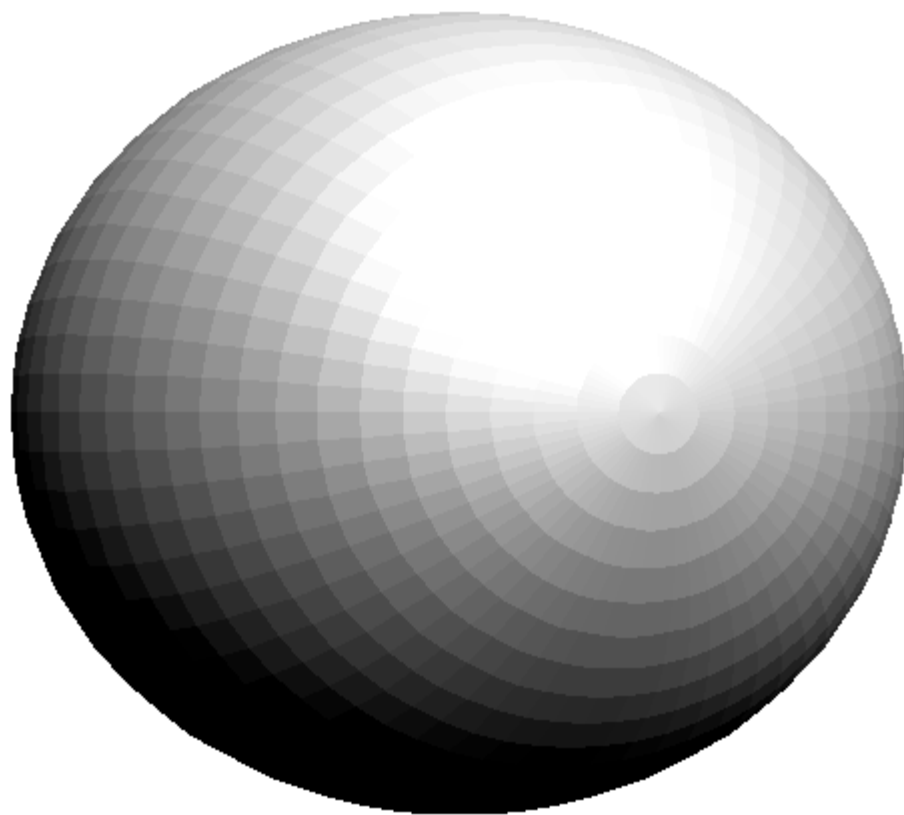
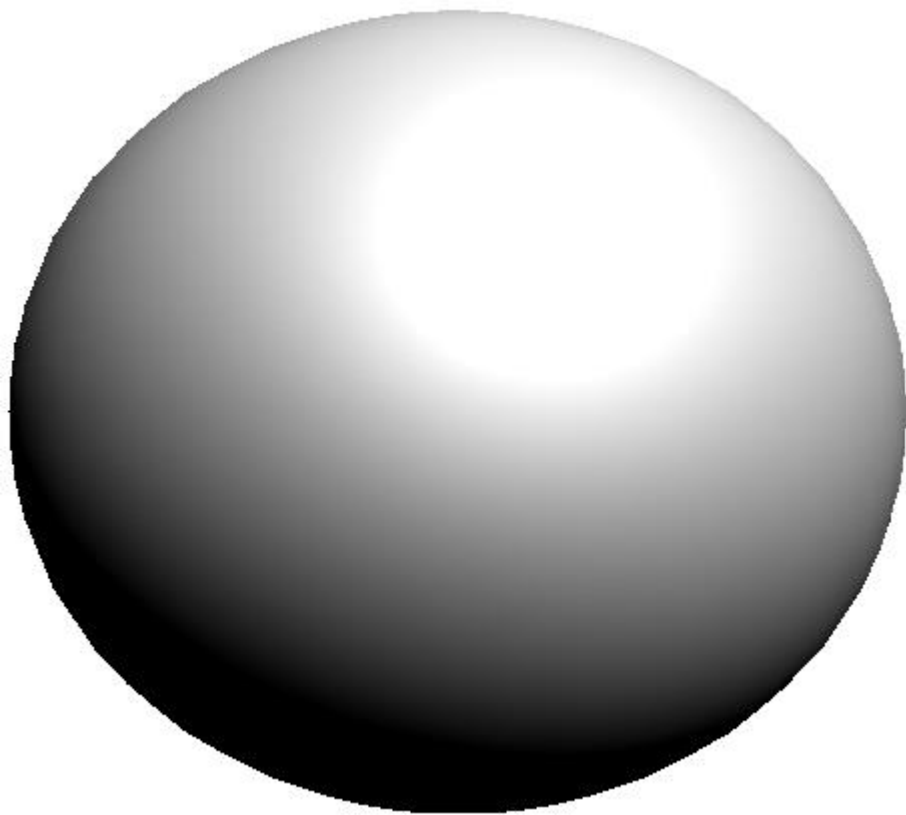
常数明暗法又称均匀着色法，就是对每个多边形表面，整个地用一个亮度值（或颜色值）。应用这种方法，应该有以下假设成立：

(1)光源在无穷远处。多边形表面上的任意点的 $N \cdot L$ 是常数。

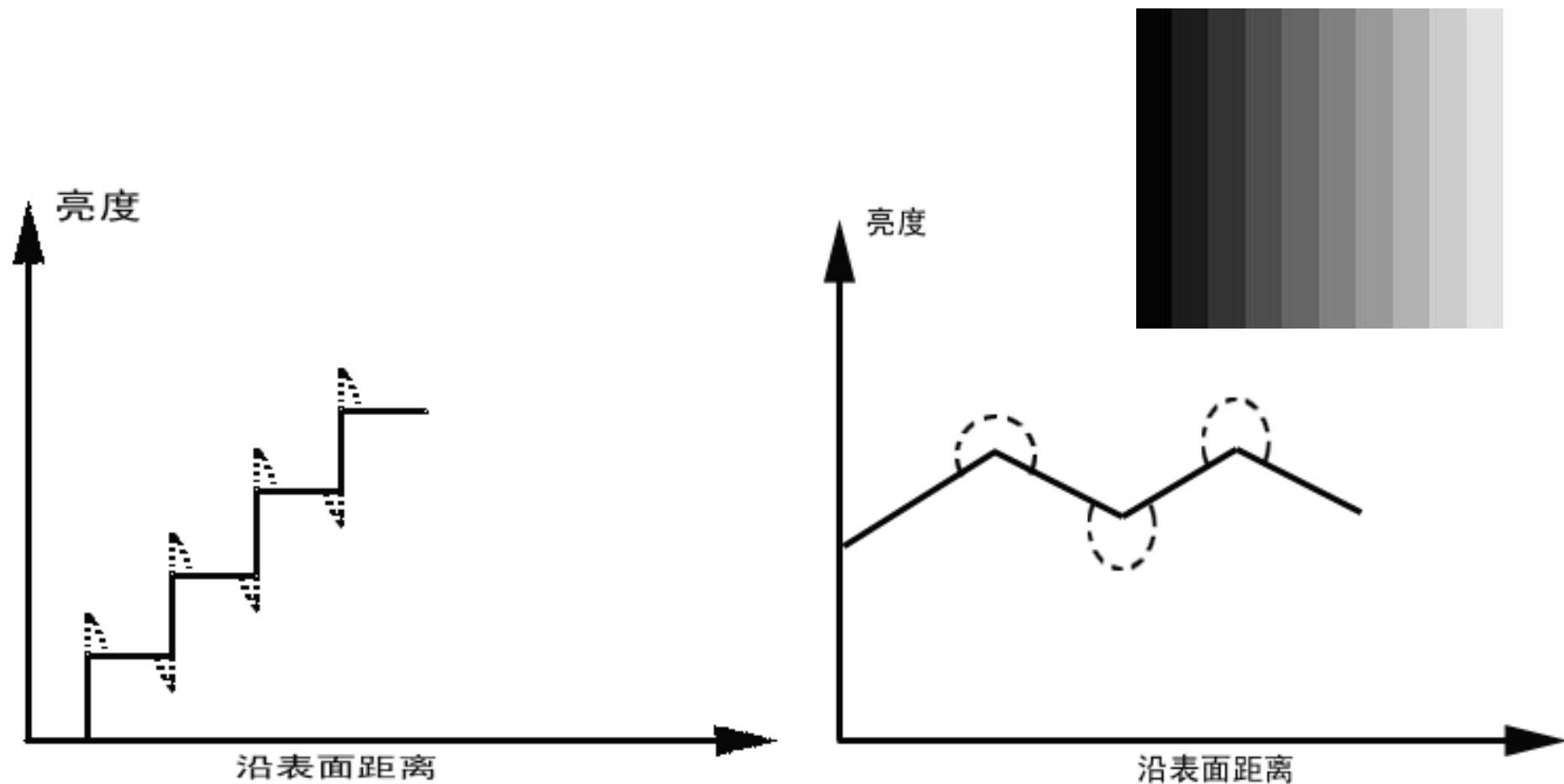
(2)观察者在无穷远处。多边形表面上的任意点的 $R \cdot V$ 也是常数。

(3)该多边形表面代替了被模拟的真实表面。

用来逼近曲面的各多边形表面可能会被分辨出来。由于每个小面与其相邻的小面在亮度上常有差别，所以在显示图形时就能看到这种差别，这种差别由于Mach带效应而得到加强。



Mach带效应指的是当亮度发生不连续的突然变化时，看上去会有一种边缘增强的感觉。视觉上会感到边缘的亮侧更亮，暗侧更暗。Mach带效应是一种由人类视觉系统加工处理而产生的一种感受现象。



2. Gouraud方法

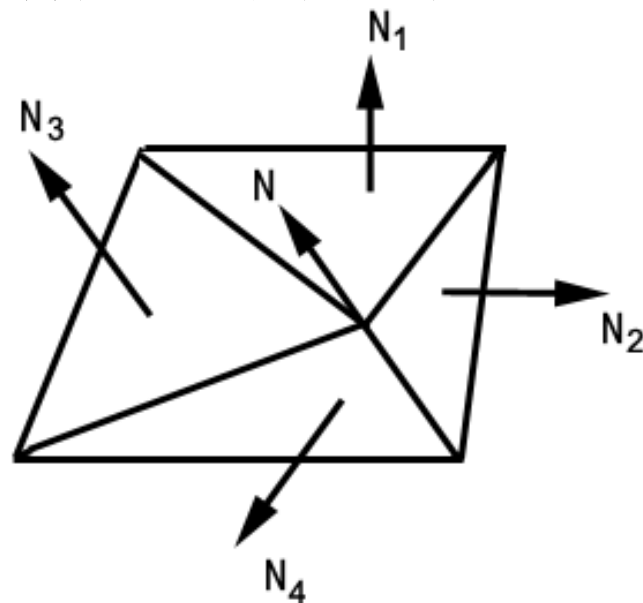
亮度（或颜色）插值明暗法 通常被称为Gouraud着色方法。增加逼近空间形体的多边形表面的数目，Mach带效应可以随之减弱。

亮度（或颜色）插值明暗法处理过程有以下四个步骤：

- (1) 计算各多边形表面的法向量。
- (2) 计算各顶点的法向量。这里顶点的法向，指共享该顶点的所有多边形表面法向的平均值。

如果有一条边是作为边界准备显示出来的，可以对这条边的每个顶点，计算两个法向量，每个是一侧各多边形表面法向量的平均值。

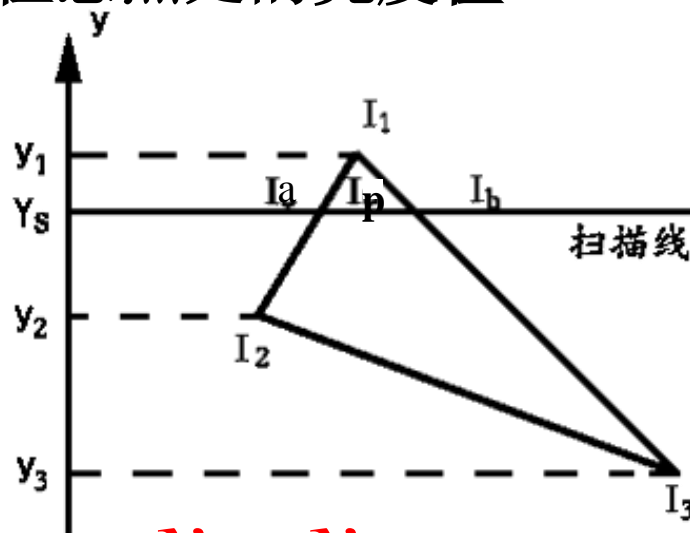
$$\mathbf{N} = (\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2 + \mathbf{N}_3 + \mathbf{N}_4) / 4$$





(3) 计算各顶点的亮度。因为各顶点的法向已经求得，所以已经可以利用上节讨论的计算亮度的公式进行计算。

(4) 计算各多边形表面上任意点处的亮度值，实行对多边形表面的明暗处理。做法是先利用顶点的亮度值，在边上做线性插值，求得边上的亮度值。再用之在扫描线上做线性插值，从而求得多边形面内任意点处的亮度值。



$$I_a = I_1 \cdot \frac{y_s - y_2}{y_1 - y_2} + I_2 \cdot \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_2} \quad I_b = I_1 \cdot \frac{y_s - y_3}{y_1 - y_3} + I_3 \cdot \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_3}$$

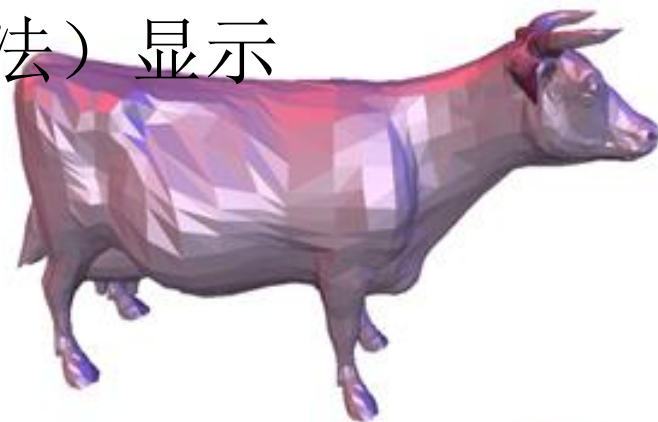
$$I_p = I_a \cdot \frac{x_b - x_p}{x_b - x_a} + I_b \cdot \frac{x_p - x_a}{x_b - x_a}$$



亮度插值模型示例

牛的三角网格模型

- 用简单光照明模型（常数明暗法）显示



- 用亮度插值光照明模型显示





3 Phong方法

法向量插值明暗法是越南人Bui-Tuong Phong提出来的，通常称为Phong氏形成明暗法。这个方法是对法向量进行插值，而不是对亮度进行插值。

- 求得各顶点法向，
- 求多边形边上各点及多边形面内任意点处法向。

这个插值可以很好地应用前面的扫描线算法。求得扫描线上每点的法向量后，在每点处实际计算亮度，可以应用任何一种光照明模型。



Phong方法vs. Gouraud方法

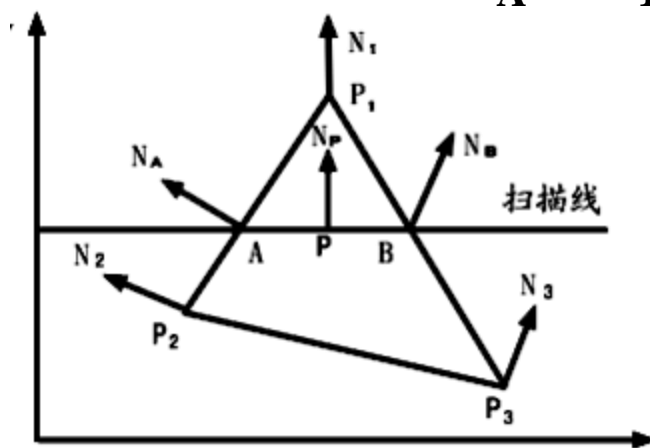
1. 如果应用镜面反射，法向插值比起亮度插值法会得到明显的改进，因为强光能更加真实地得到反映。
2. 即使不应用镜面反射，法向插值的结果也比亮度插值的结果好。这是因为对每一点都使用法向量的近似值，使得可以减少Mach带效应引起的问题。
3. 法向插值对每一点都要计算亮度，使得计算量大为增加。



绘制多边形的步骤:

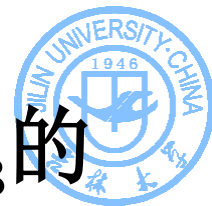
- (1) 计算多边形的单位法矢量。
- (2) 计算多边形顶点的单位法向量。
- (3) 在扫描线消隐算法中，对多边形顶点的法向量进行双线性插值，计算出多边形内部(扫描线上位于多边形内部)各点的法向量。

双线性插值的方法如图所示， N_A 由 N_1 ， N_2 线性插值得到：



$$N_A = \frac{y_A - y_2}{y_1 - y_2} N_1 + \frac{y_1 - y_A}{y_1 - y_2} N_2 \quad N_B = \frac{y_B - y_3}{y_1 - y_3} N_1 + \frac{y_1 - y_B}{y_1 - y_3} N_3$$

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



(4) 利用光照明模型计算P点的颜色。

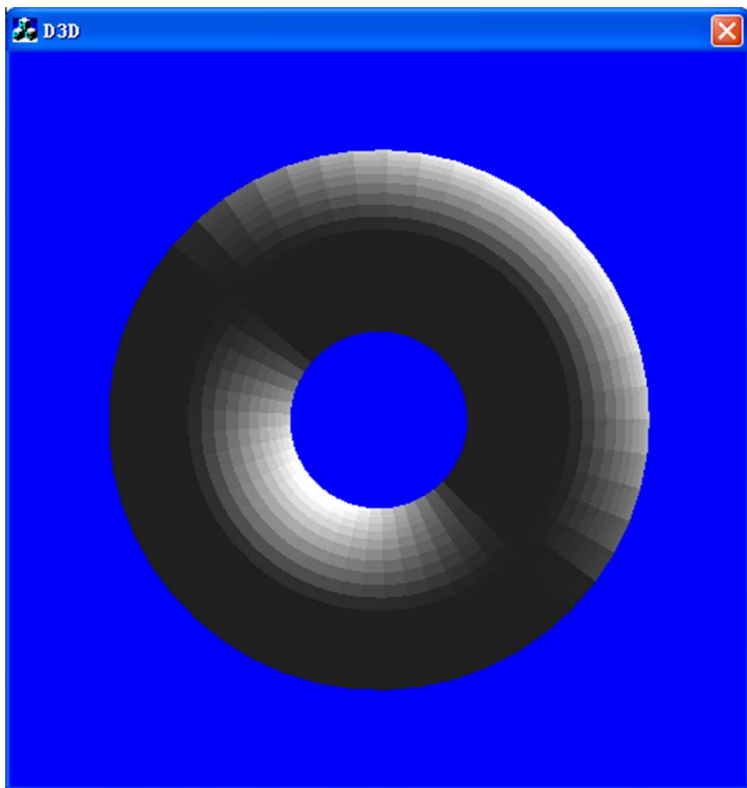
当扫描线y递增一个单位变为y+1时， N_A, N_B 的增量分别为 $\Delta N_A, \Delta N_B$ ，即

$$N_{A,y+1} = N_{A,y} + \Delta N_A \quad \Delta N_A = \frac{1}{y_1 - y_2} (N_1 - N_2)$$

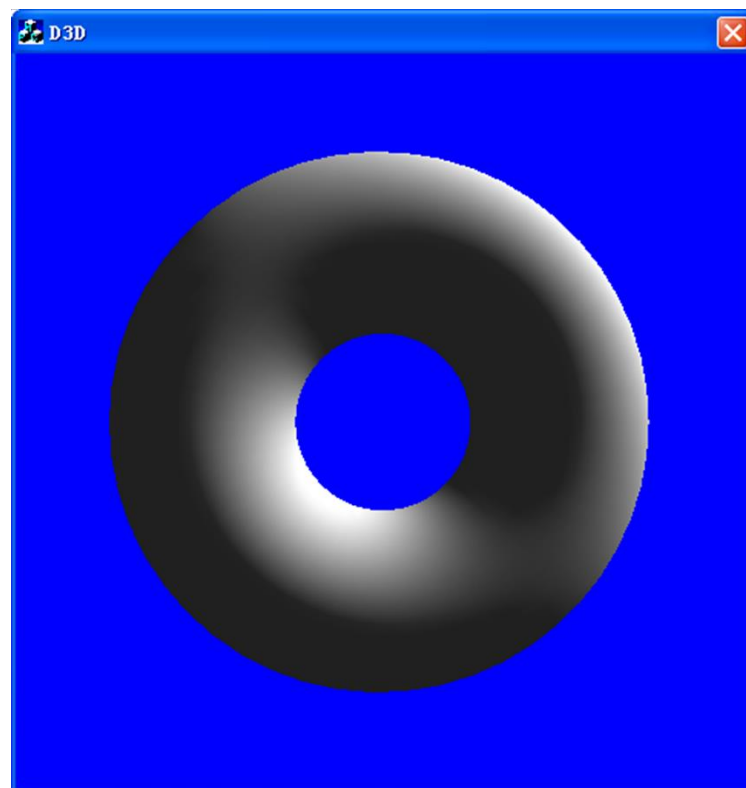
$$N_{B,y+1} = N_{B,y} + \Delta N_B \quad \Delta N_B = \frac{1}{y_1 - y_3} (N_1 - N_3)$$

当x递增一个单位（P点沿扫描右移一个单位）时， N_P 增量为 ΔN_P 即

$$N_{P,x+1} = N_{P,x} + \Delta N_P \quad \Delta N_P = \frac{1}{x_B - x_A} (N_B - N_A)$$



常数明暗法

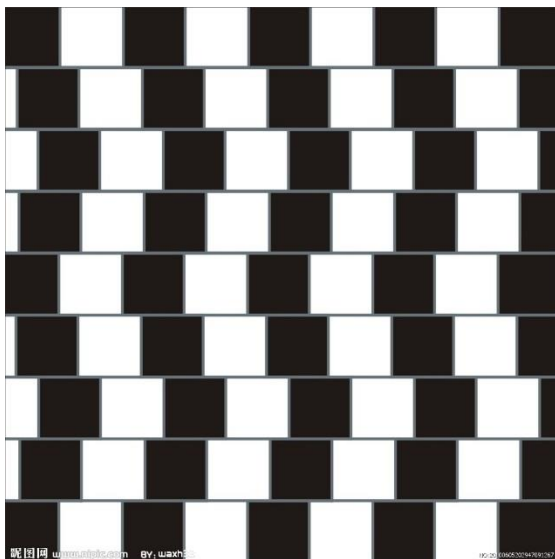


Gouraud方法

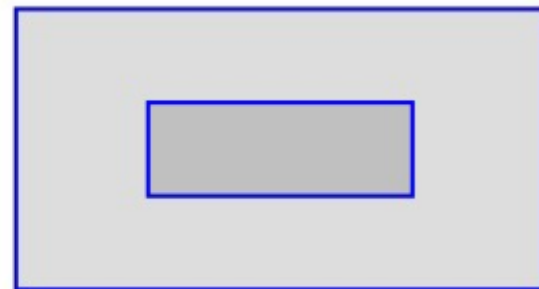
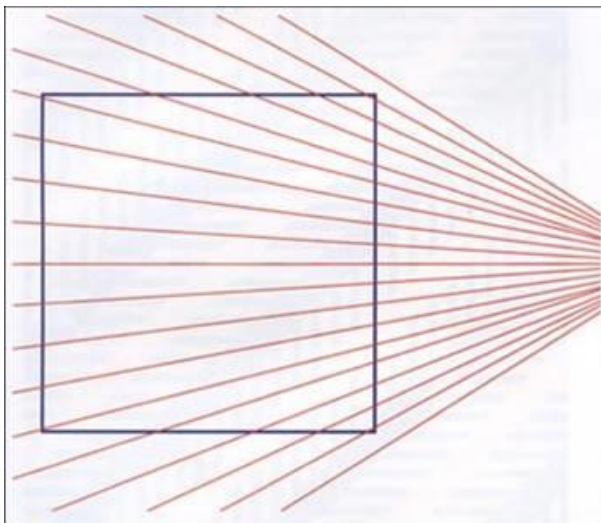
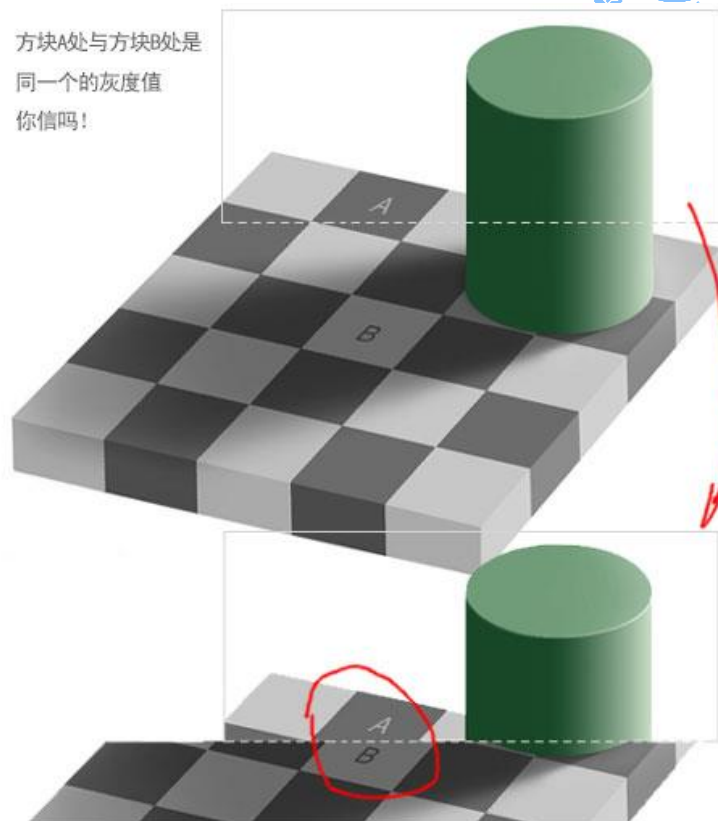


人视觉判断与计算机判断

形状
判断



亮度
判断





颜色模型

- 白光

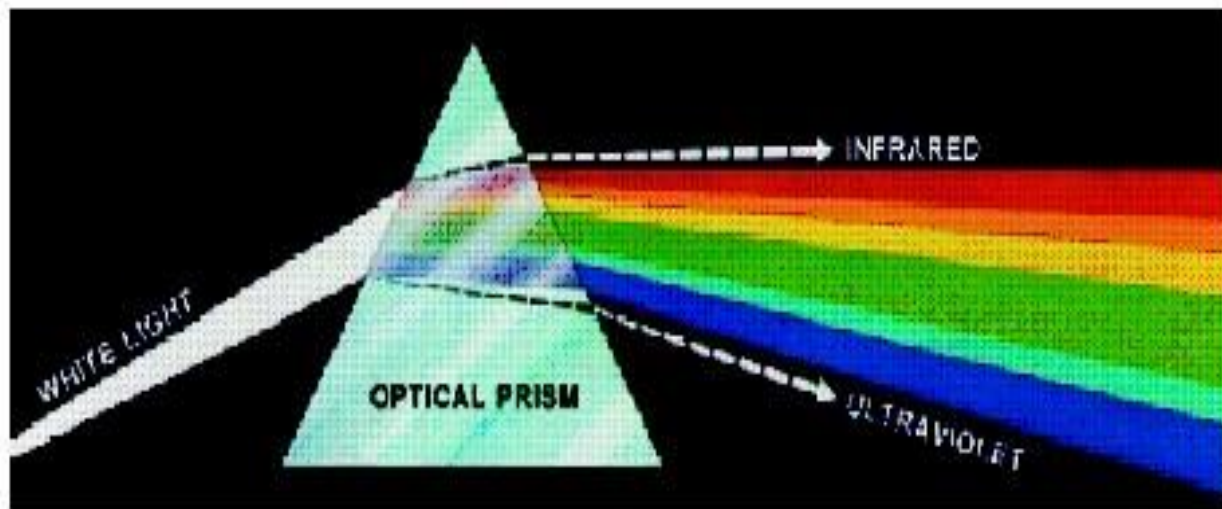
在17世纪，牛顿通过三棱镜研究对白光的折射就已发现：

白光可被分解成一系列从紫到红的连续光谱，从而证明白光是由不同颜色（而且这些颜色并不能再进一步被分解）的光线相混合而组成的。



彩色图像基础

当一束白光通过一个玻璃棱镜时，出现的光束不是白光，而是由一端为紫色到另一端为红色的连续彩色谱组成





彩色基础

- 可见光

可见光是由电磁波谱中相对较窄的波段组成，如果一个物体比较均衡地反射各种光谱，则人看到的物体是白的；

而如果一个物体对某些可见光谱反射的较多，则人看到的物体就呈现相对应的颜色。

例如，绿色物体反射具有500~570nm（纳米）范围的光，吸收其他波长光的多数能量。



彩色基础

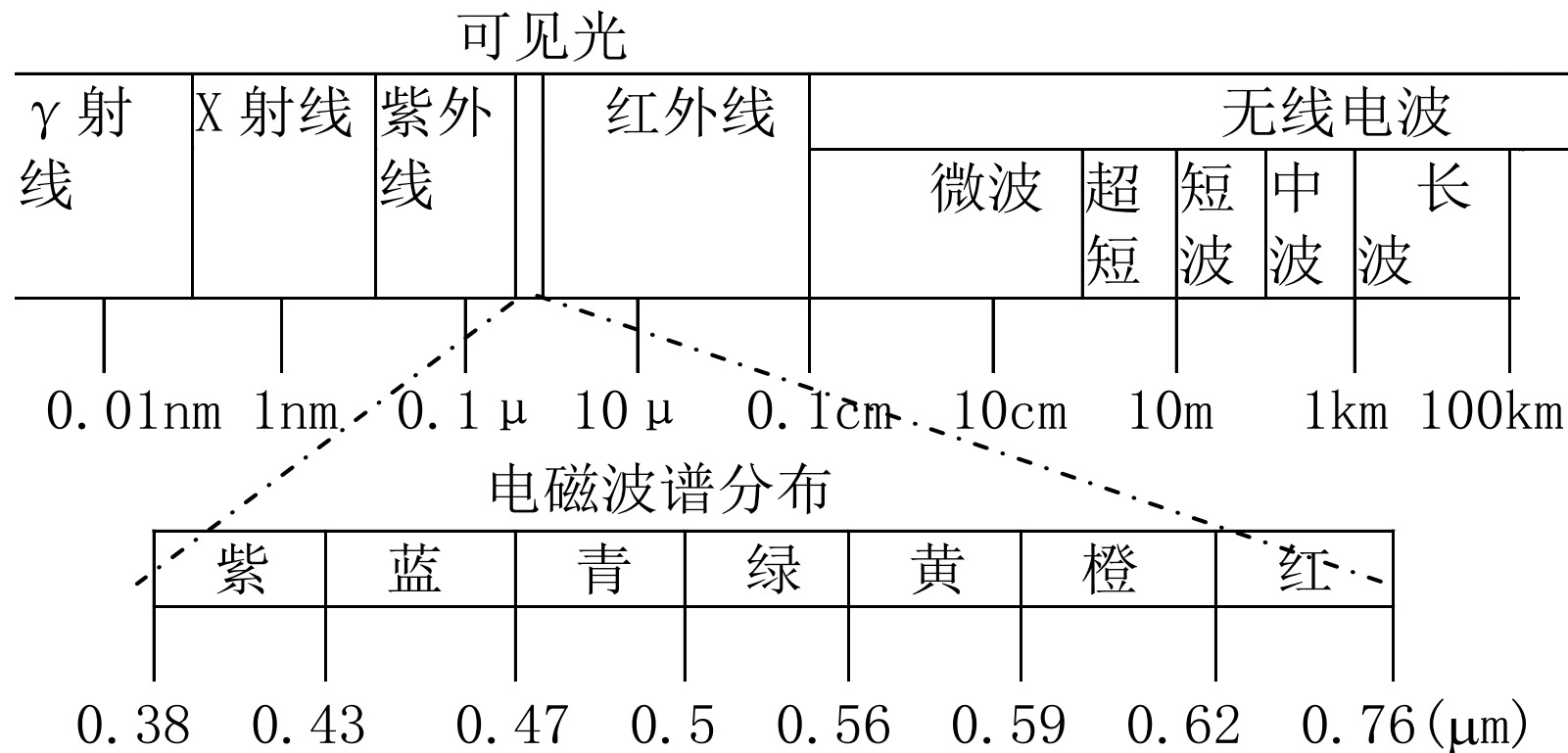


图9.1 可见范围电磁波谱的波长组成



彩色基础

- 人眼的吸收特性:

人眼的锥状细胞是负责彩色视觉的传感器，人眼的锥状细胞可分为三个主要的感觉类别。

大约65%的锥状细胞对红光敏感，33%对绿光敏感，只有2%对蓝光敏感。

由于人眼的这些吸收特性，被看到的彩色是所谓的原色红（R, red）、绿（G, green）和蓝（B, blue）的各种组合。



彩色基础

- 三原色原理

基本内容是：

任何颜色都可以用3种不同的基本颜色按照不同比例混合得到，即

$$C=aC1+bC2+cC3$$

(9.1)

式中 a ， b ， $c \geq 0$ 为三种原色的权值或者比例， $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 为三原色（又称为三基色）。



彩色基础

- 三原色原理指出
- 自然界中的可见颜色都可以用三种原色按一定比例混合得到；反之，任意一种颜色都可以分解为三种原色。
- 作为原色的三种颜色应该相互独立，即其中任何一种都不能用其他两种混合得到。



彩色基础

- 三原色原理

为了标准化起见，国际照明委员会（**CIE**）规定用波长为**700nm**、**546.1nm**、**435.8nm**的单色光分别作为**红(R)**、**绿(G)**、**蓝(B)**三原色。

红绿蓝三原色按照比例混合可以得到各种颜色，其配色方程为：



彩色基础

- 三原色原理

- 原色相加可产生二次色。

红色+蓝色=深红色(M, magenta),

绿色+蓝色=青色(C, cyan),

红色+绿色=黄色(Y, yellow)。

- 以一定的比例混合光的三种原色或者以一种二次色与其相反的原色相混合可以产生白色(W, white), 即: 红色+绿色+蓝色=白色



彩色基础

- 彩色到灰度的转换
- 相同亮度的三原色，人眼看去的的感觉是，绿色光的亮度最亮，而红色光其次，蓝色光最弱。
- 如果用 Y 来表示白色光，即光的亮度(灰度)，则有如下关系：

$$Y=0.299R+0.587G+0.114B$$



彩色基础

- 区分颜色常用三种基本特性量
- **亮度**：如果无彩色就只有亮度一个维量的变化。
- **色度**：是光波混合中与主波长有关的属性，色度表示观察者接收的主要颜色。这样，当我们说一个物体是红色、橘黄色、黄色时，是指它的色度。
- **饱和度**：与一定色度的纯度有关，纯光谱色是完全饱和的，随着白光的加入饱



色度和饱和度一起称为彩色，因此，颜色用亮度和彩色表征。

形成任何特殊颜色需要的红、绿、蓝的量称做三色值，并分别表示为 X ， Y ， Z 。进一步，一种颜色可用它的3个色系数表示，它们分别是：

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

从以上公式可得：

$$x + y + z = 1$$

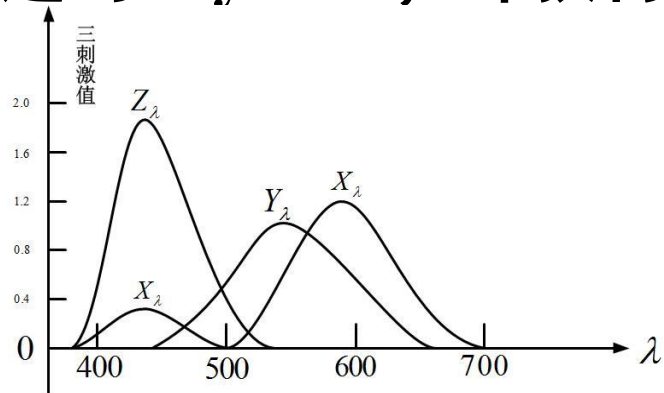


激理论假设人类眼睛的视网膜中有三种锥状视觉细胞，分别为红、绿、蓝。因此人们把这三种颜色定义为三基色。

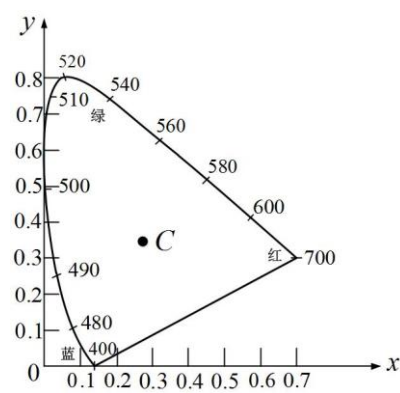
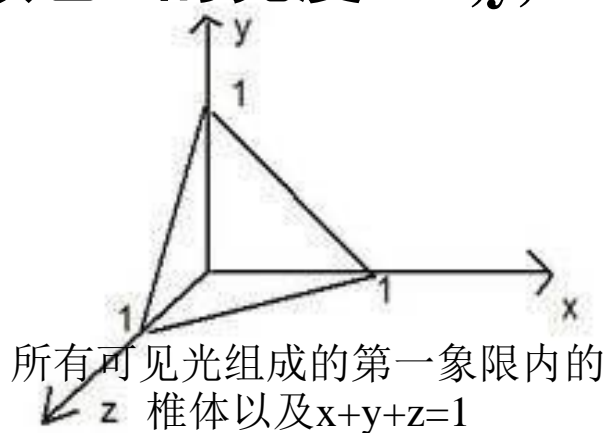
1931年，国际照明委员会（简称CIE）规定了三种基色（X、Y、Z），适当的混合在此三基色即可规定出我们眼睛所能看到的所有光感。我们对色度值写出如下定义：

$$x = \frac{X_{\lambda}}{X_{\lambda} + Y_{\lambda} + Z_{\lambda}}, \quad y = \frac{Y_{\lambda}}{X_{\lambda} + Y_{\lambda} + Z_{\lambda}}, \quad z = \frac{Z_{\lambda}}{X_{\lambda} + Y_{\lambda} + Z_{\lambda}}$$

这时 $x+y+z=1$ ，即获得颜色C的亮度（x,y,z）。



CIE-XYZ系统的颜色匹配函数图



CIE-XYZ色度图

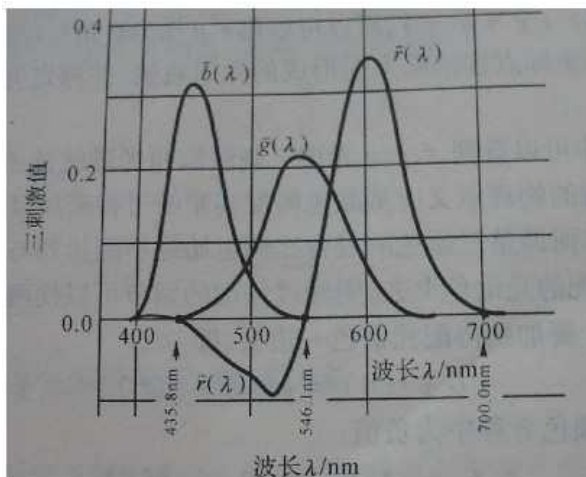
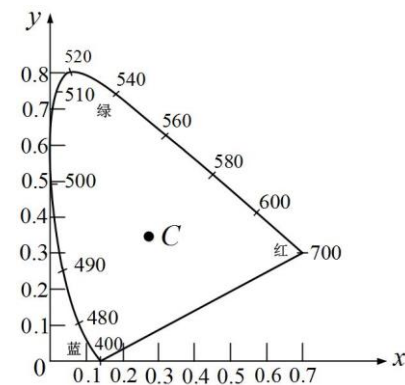
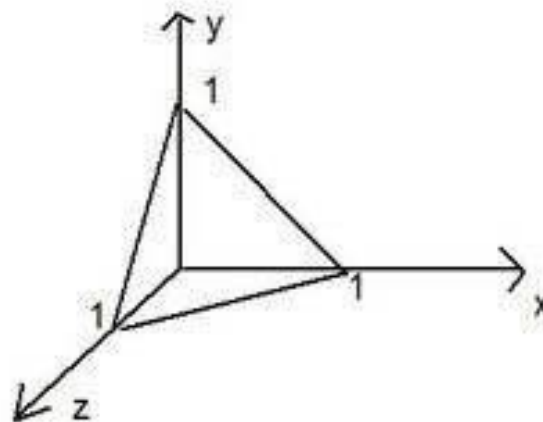
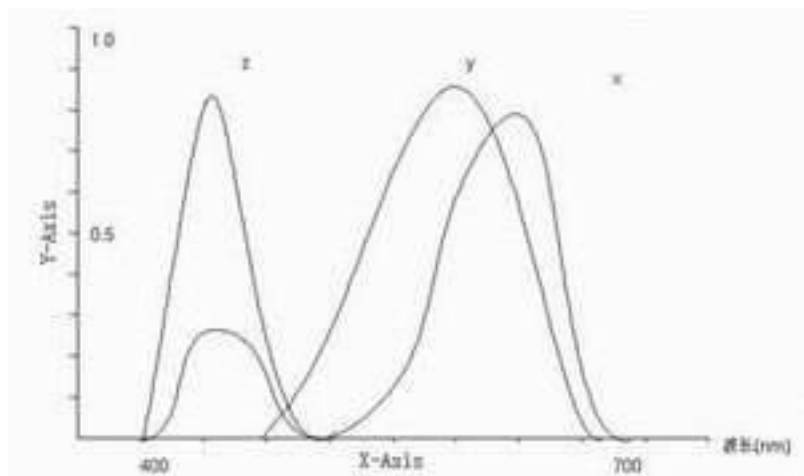
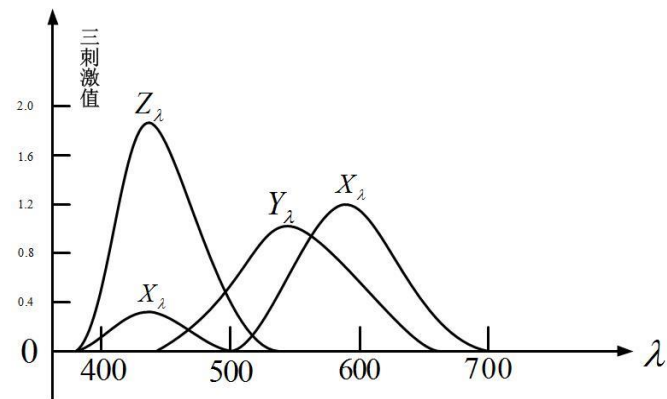


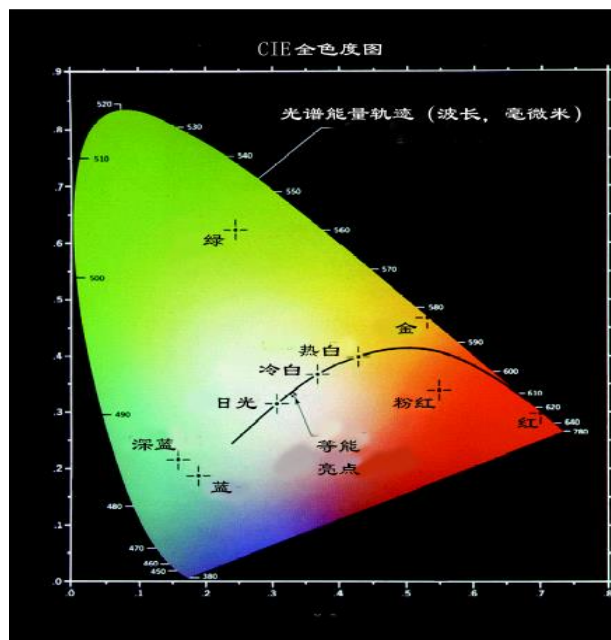
图 4.1.3 CIE1931 RGB 色度系统标光谱三刺激值曲线





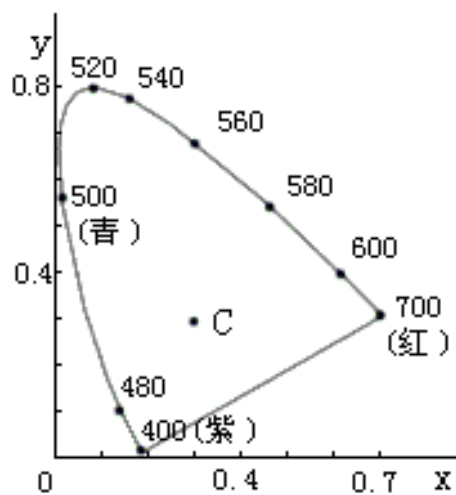
1931年CIE制定了一个色度图，如图9.4所示，图中波长单位是nm，用组成某种颜色的三原色的比例来规定这种颜色。

图中横轴代表红色色系数，纵轴代表绿色色系数，蓝色系数可由 $z=1-(x+y)$ 求得。例如，图9.4中标记为绿的点有62%的绿和25%的红成分，从而得到蓝的成分约为13%。

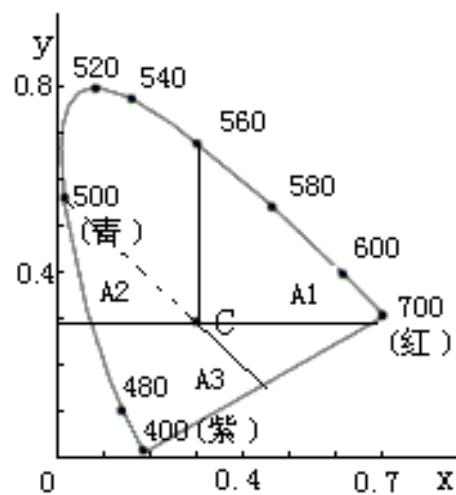




CIE色度图：马蹄形区域的内部和边界表示所有可见的色度。
马蹄形区域边界的每一点，都对应在光谱中纯度为百分之百的纯色光，图中线上标明的数字为该位置所对应色光的主波长，图中央一点C对应于用来近似太阳光的标准白色光，它被定义为一种标准光源C。



(1)

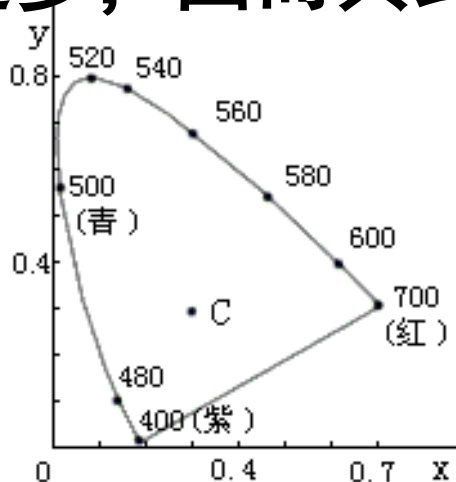


(2)

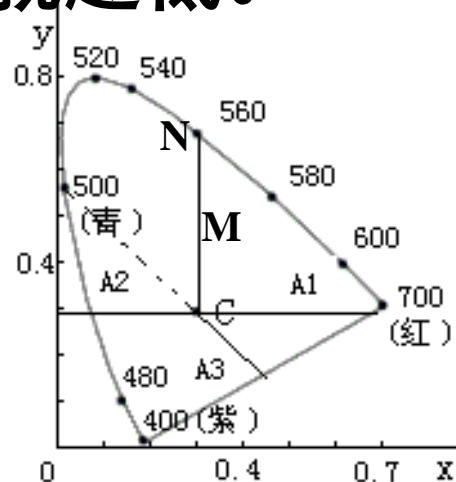
图8.13 CIE色度图及其应用



一起以匹配某一种颜色，从而能够实际测量任何一种颜色的主波长和纯度。对于图(2)中的某一点M，可以把颜色M看作是C点和N点上纯净谱光的一种混合体。这样，N就规定了主波长。MC长度与NC长度的比值就是M点的纯度Q，即 $Q=MC/NC$ ，M越靠近C，M含有的白光就越多，因而其纯度就越低。



(1)

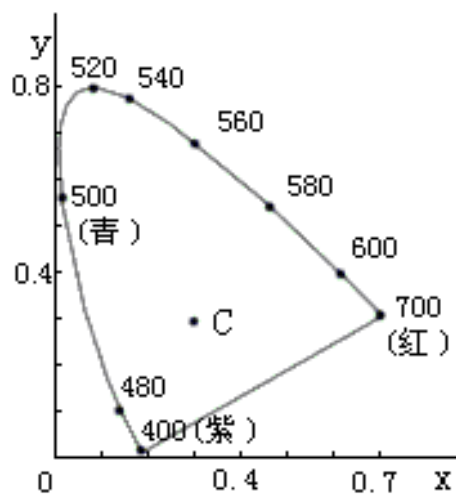


(2)

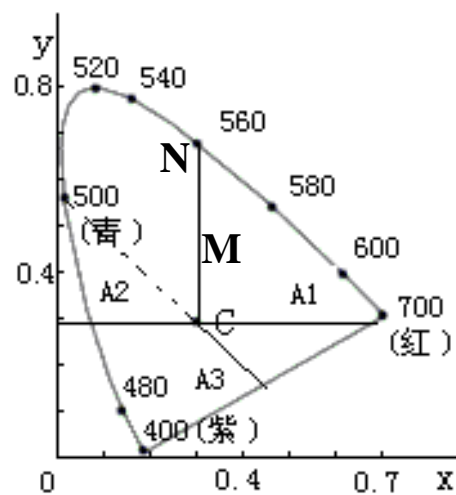
图8.13 CIE色度图及其应用



如果某点于C的连线交于底边紫色线上，则在可见光谱中找不到此颜色相应的主波长，这时其主波长可用其补色的光谱值附以后缀C表示，这一光谱值可以通过反向延伸直线与对测光谱边界线相交而得。



(1)

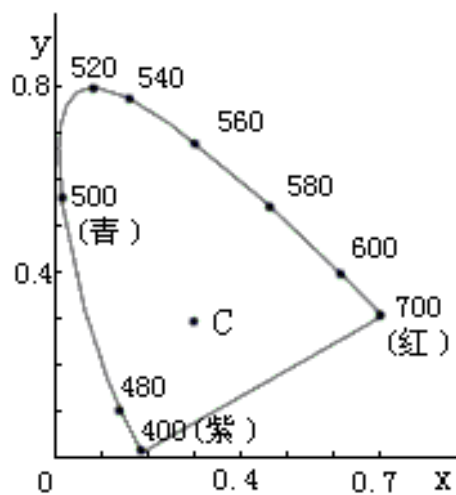


(2)

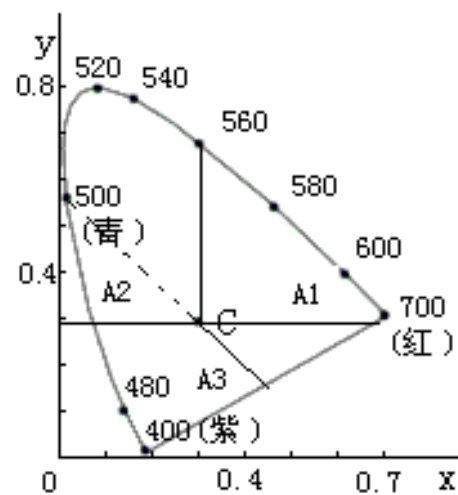
图8.13 CIE色度图及其应用



欲得到一种光谱色的补色，只需从这一点通过C点作一条直线求出其与对测光谱边界线的交点，即可求得补色的波长。例如，红橙色A1($\lambda=610\text{nm}$)的补色为蓝绿色A($\lambda=491\text{nm}$)这两种补色按一定比例相加得白色。



(1)



(2)

图8.13 CIE色度图及其应用



彩色模型

- 彩色模型（也称彩色空间或彩色系统）的用途是在某些标准下用通常可接受的方式简化彩色规范。
- 本质上，彩色模型是坐标系统和子空间的规范。位于系统中的每种颜色都由单个点来表示。
- 本节主要讨论几种图像处理应用的主要模型。



RGB模型

- **RGB模型**
- **RGB模型**是目前常用的一种彩色信息表达方式，它使用红、绿、蓝三原色的亮度来定量表示颜色。
- 该模型也称为**加色混色模型**，是以**RGB**三色光相互叠加来实现混色的方法，因而适合于显示器等发光体的显示。



RGB模型

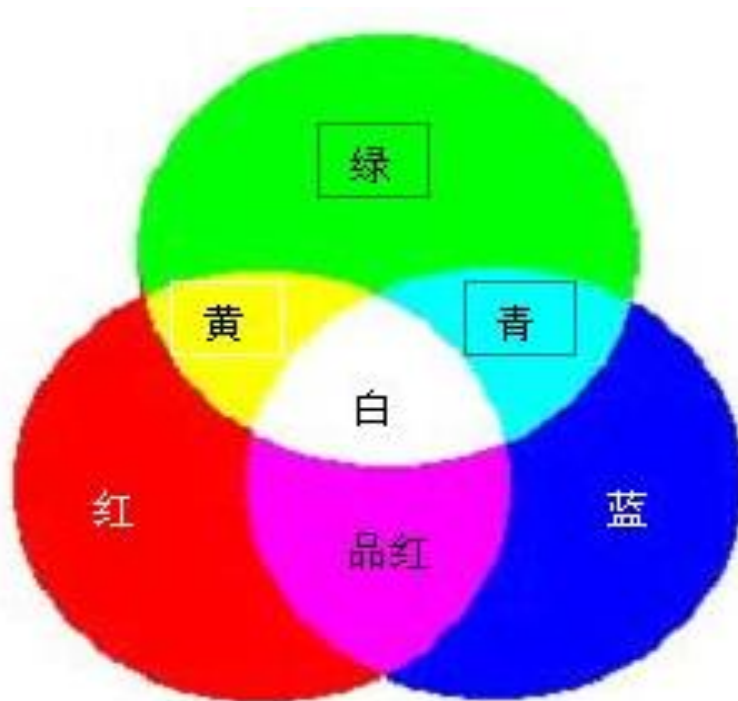


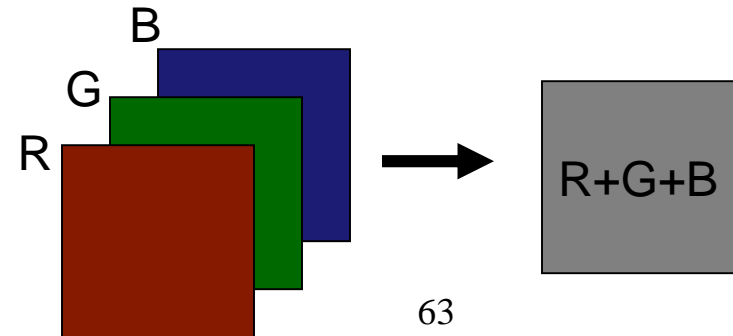
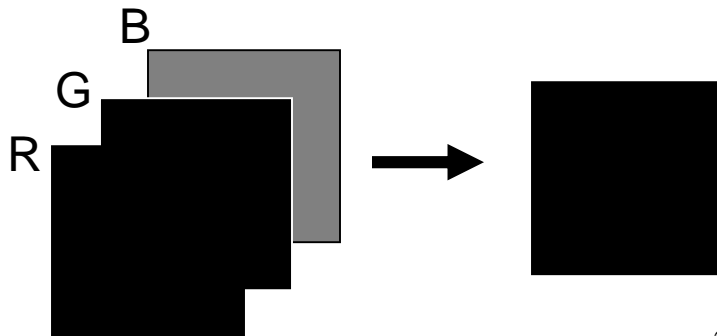
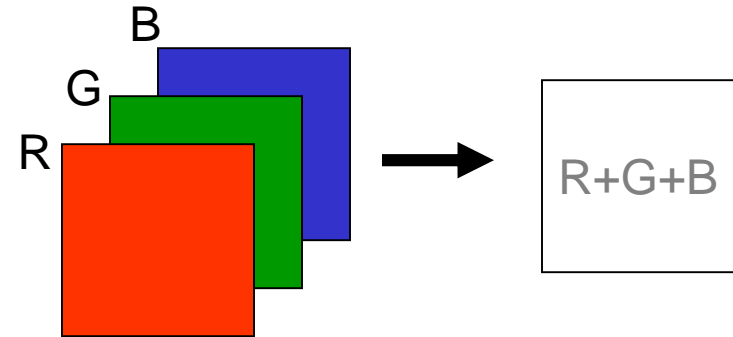
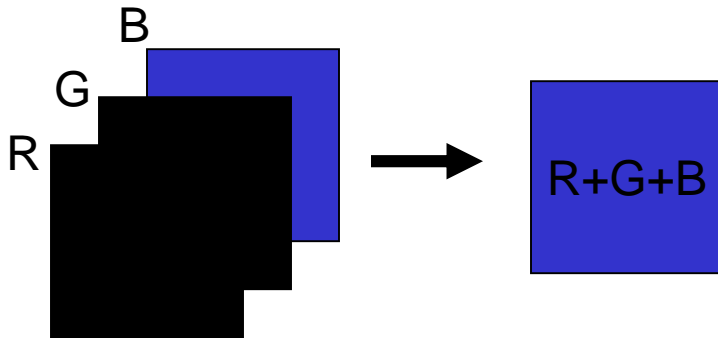
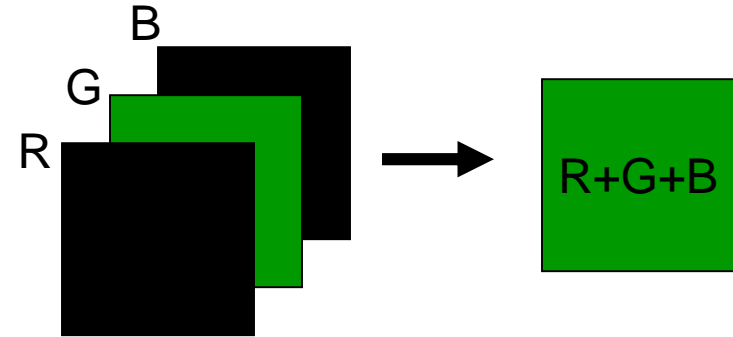
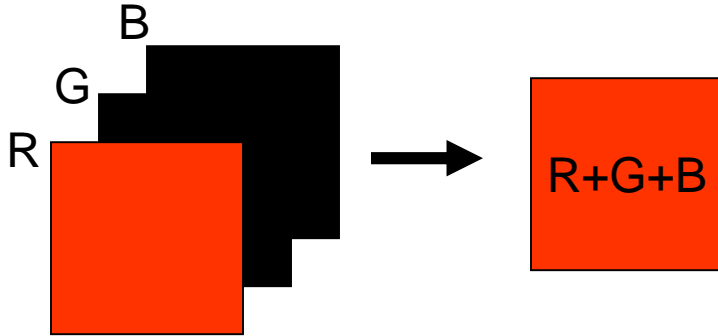
图9.2 RGB混色效果图



彩色图像的显示（RGB颜色空间）

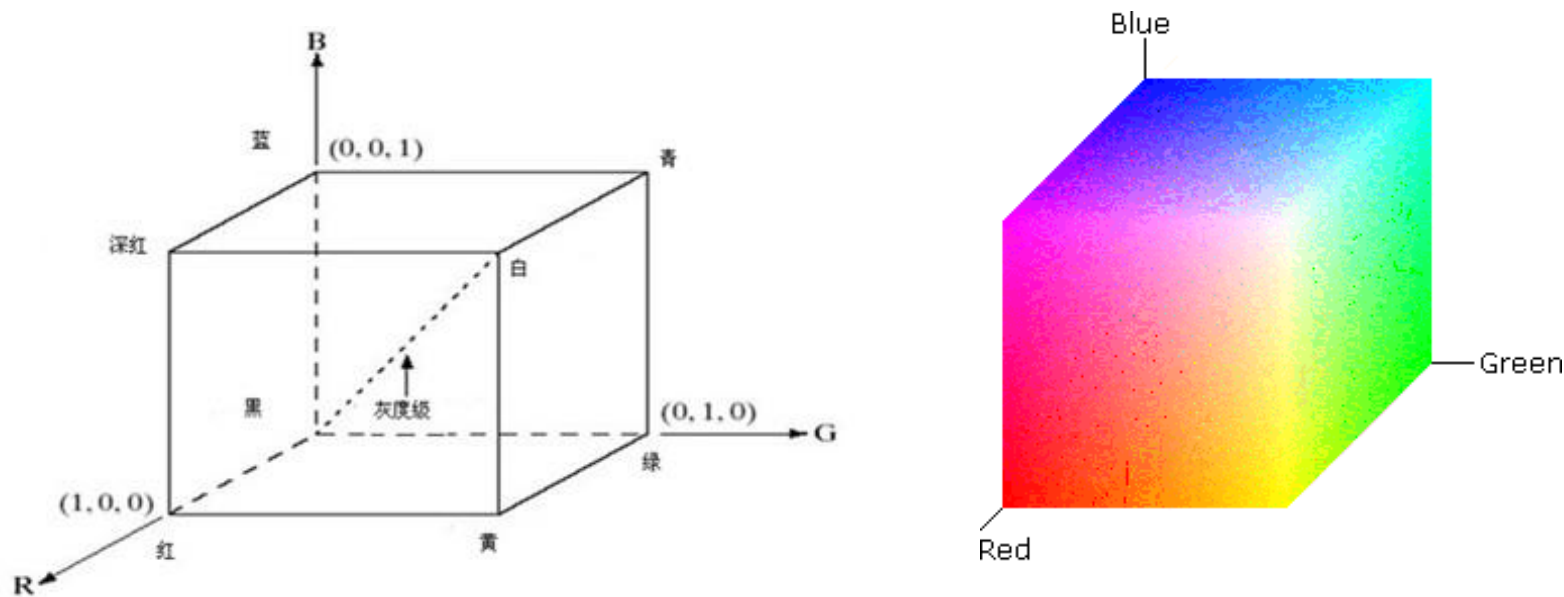
3元色：红，绿，蓝. 8位/通道，总共24位，约1千7百万种颜色。

- 红+蓝 = 品红
- 红+绿 = 黄
- 蓝+绿 = 青
- 红+绿+蓝 = 白
- 灰 = $0.3\text{红} + 0.6\text{绿} + 0.1\text{蓝}$





RGB模型



- 图9.3中，R，G，B位于三个角上；二次色深红(Magenta)、青(Cyan)、黄(Yellow)位于另外3个角上，黑色在原点处，白色位于离原点最远的角上（点 $(1, 1, 1)$ ）。
- 在本模型中，不同的颜色处在立方体上或其内部，并可用从原点分布的向量来定义。为方便起见，假定所有的颜色值都归一化，即所有R，G，B的值都在 $[0, 1]$ 范围内取值。



RGB模型

考虑**RGB**图像，其中每一幅红、绿、蓝图像都是一幅**8bit**图像，在这种条件下，每一个**RGB**彩色像素有**24bit**深度（3个图像平面乘以每平面比特数，即 **3×8** ）。

24bit的彩色图像也称全彩色图像。在**24bitRGB**图像中颜色总数是 **$2^{24}=16777216$** 。



RGB模型

一幅 $m*n$ （ m ， n 为正整数，分别表示图像的高度和宽度）的**RGB**彩色图像可以用一个 $m*n*3$ 的矩阵来描述，图像中的每一个像素点对应于红、绿、蓝三个分量组成的三元组。

在**Matlab**中，不同的图像类型，其图像矩阵的取值范围也不一样。例如若一幅**RGB**图像是 **double**类型的，则其取值范围在 $[0, 1]$ 之间，而如果是**uint8**或者**uint16**



CMY和CMYK彩色空间

- CMY(青、深红、黄)、CMYK (青、深红、黄、黑)

⑩✓ 运用在大多数在纸上沉积彩色颜料的设备，如彩色打印机和复印机

✓CMYK

⑩➤ 打印中的主要颜色是黑色

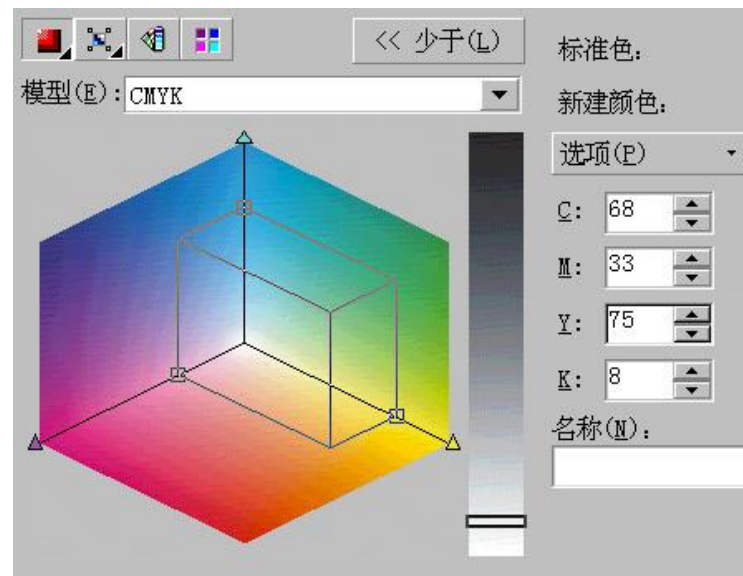
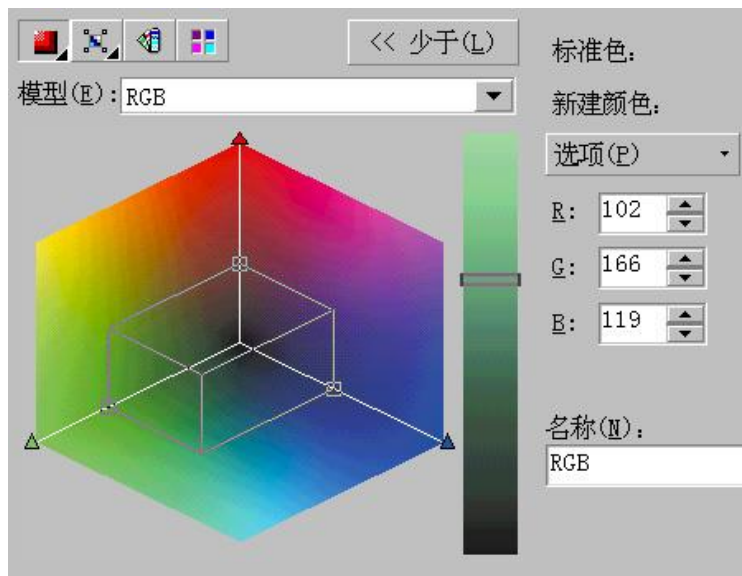
⑩➤ 等量的CMY原色产生黑色，但不纯

⑩➤ 在CMY基础上，加入黑色，形成CMYK彩色空间



两个系统的关系可以由下式给出

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix}$$





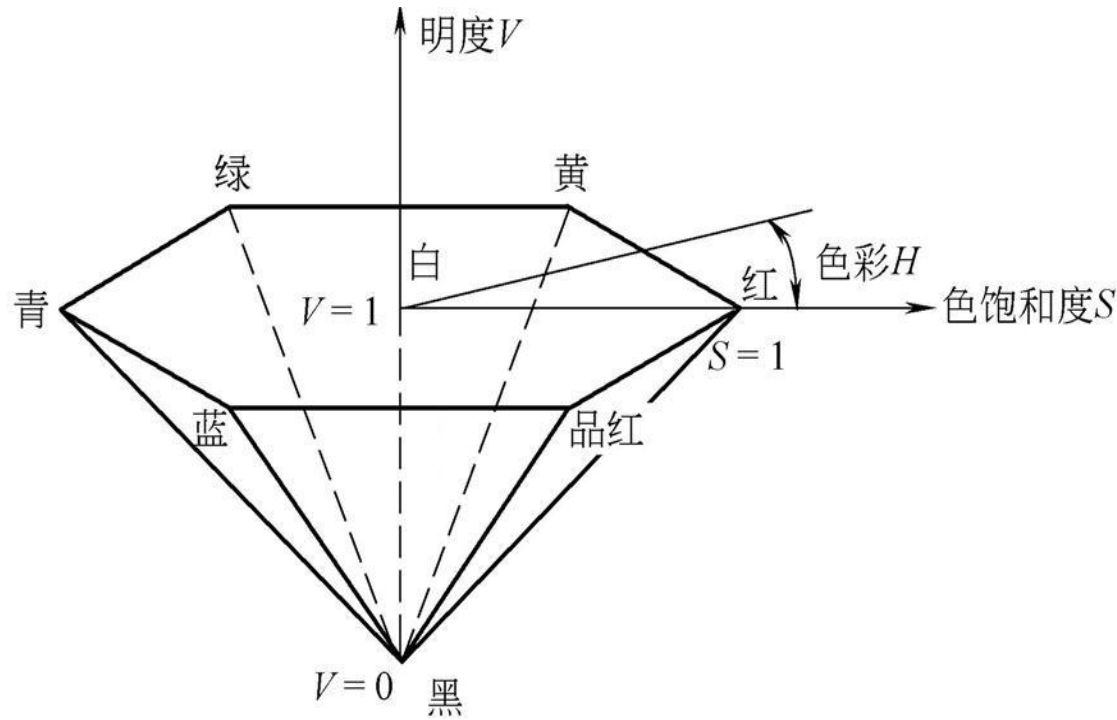
HSI模型

- HSI (**Hue-Saturation-Intensity**, HSI) 模型用H、S、I三参数描述颜色特性。
- H定义颜色的波长，称为色度；
- S表示颜色的深浅程度，称为饱和度；
- I表示强度或亮度。



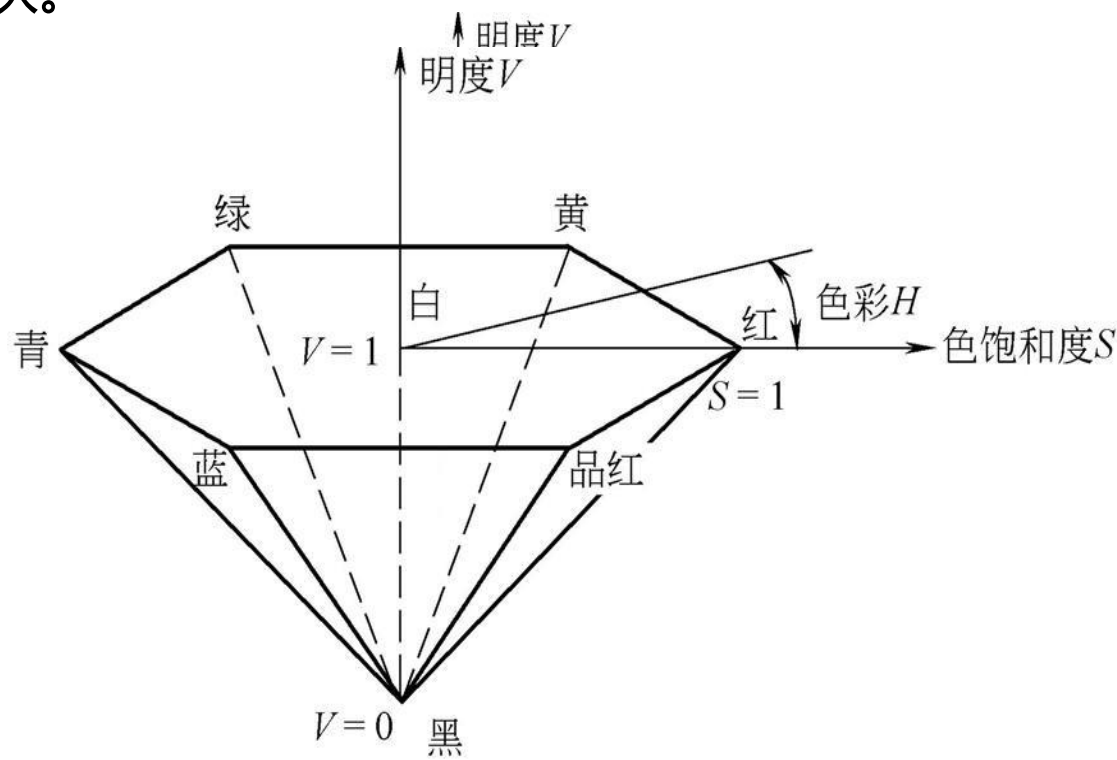
4.HSV颜色系统

- HSV(色彩、色饱和度、明度值)颜色体是史密斯于1978年提出的一个颜色模型。假如沿RGB颜色立方体(见图8-30a)的主对角线由白端向黑端看过去,它在平面上的投影将构成一个六边形,RGB三原色及相应的补色分别位于六边形的各顶点上。显然,降低各原色的色饱和度就得到一个较小的RGB颜色立方体,其在平面上的投影生成的六边形也较小。若将RGB颜色立方体和其子立方体的投影,沿着主对角线层层叠加就形成一个六棱锥体。





- 它的中心轴线表示颜色的明度 V ,对应黑色一端 $V=0$,而对应白色一端 $V=1$ 。明度 V 沿轴线由棱锥顶点的0逐渐递增到顶面时取最大值1,色饱和度 S 由棱锥上的点至中心轴线的距离决定,而色彩 H 则表示成它与红色的夹角($0^\circ \sim 360^\circ$)。在图8-32中,红色置于 0° 处。色饱和度取值范围由轴线上的0至外侧边缘上的1,只有完全饱和原色及其补色有 $S=1$,由三色构成的混合色值不能达到完全饱和。在 $S=1$ 处,由三原色构成的混合色值不能达到完全饱和。在 $S=0$ 处,色彩 H 无定义,相应的颜色为某层次的灰色。沿中心轴线,灰色由浅变深,形成不同的层次。





1. 从RGB模型转换到HSV模型

从RGB到HSI的变换是一个非线性变换。

对任何三个在 $[0, 1]$ 范围内的 R , G , B 值,

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)}[\min(R, G, B)]$$

$$H = \begin{cases} \theta & G \geq B \\ 2\pi - \theta & G < B \end{cases}$$

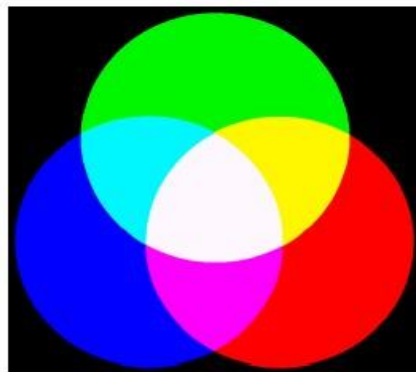
其中:

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

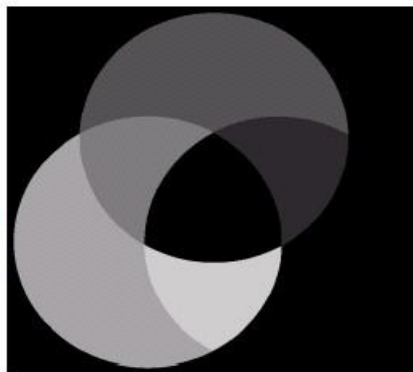


RGB图像和与之对应的HSI图像分量

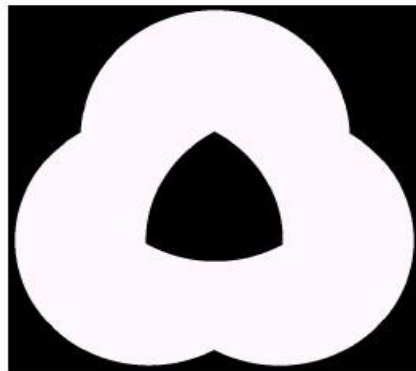
RGB图像



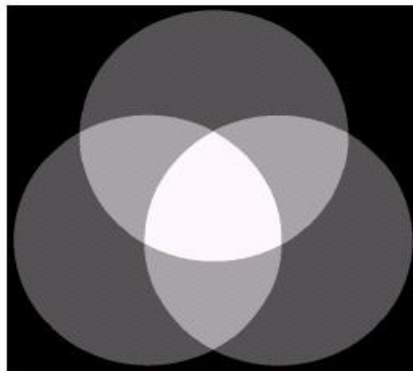
色度



饱和度

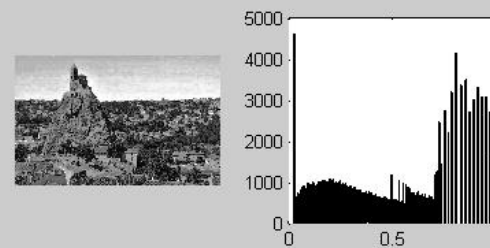
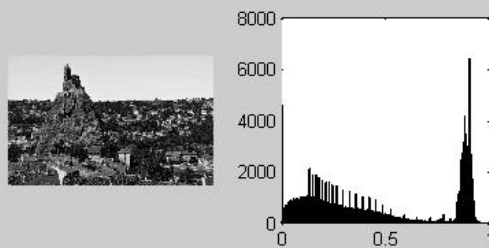
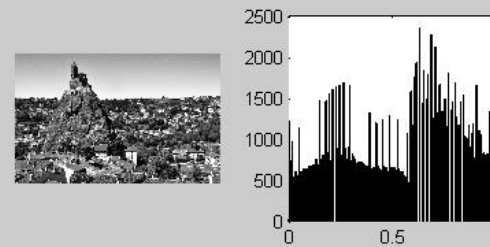
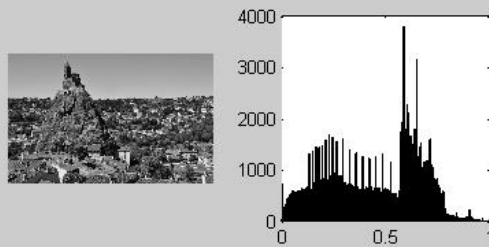
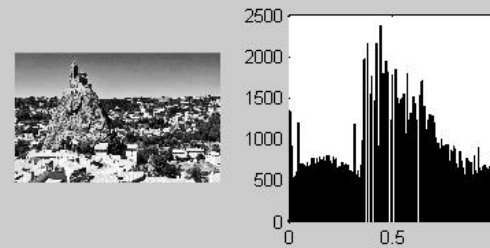
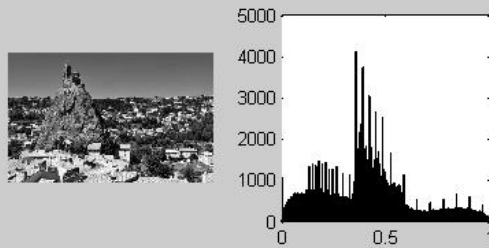


强度



a b
c d

FIGURE 6.16 (a) RGB image and the components of its corresponding HSI image: (b) hue, (c) saturation, and (d) intensity.





(o)



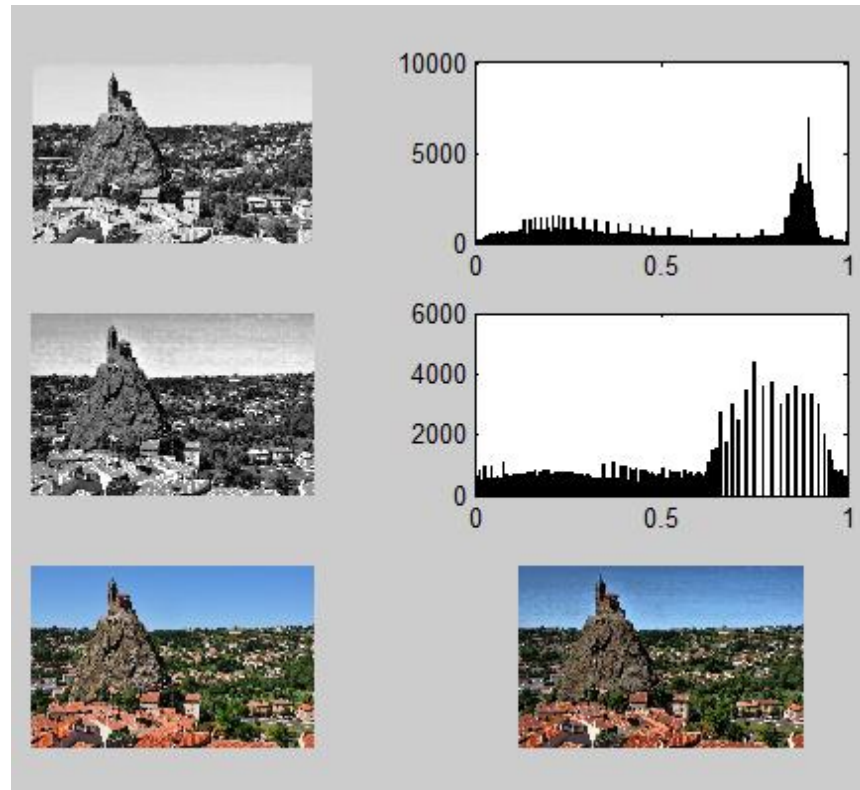
(h)



(s)



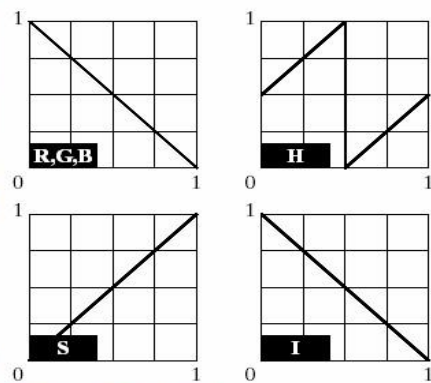
(i)





红色在补色中用青色代替，黑色在补色中用白色代替

原图



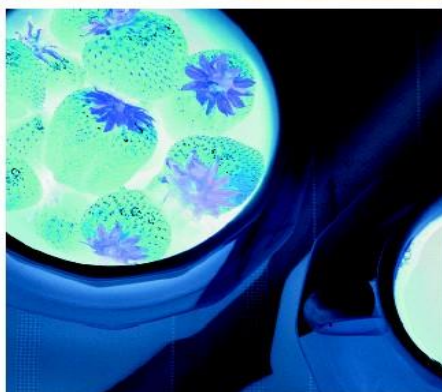
a b
c d

FIGURE 6.33

Color complement transformations. (a) Original image. (b) Complement transformation functions. (c) Complement of (a) based on the RGB mapping functions. (d) An approximation of the RGB complement using HSI transformations.

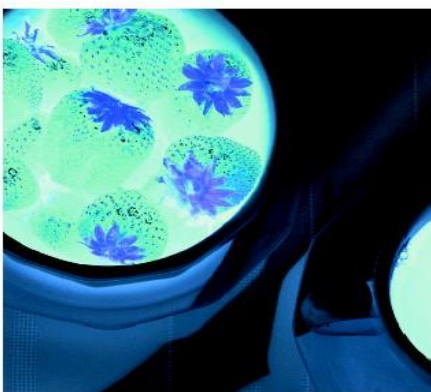
RGB

补图



HSI

补图





由HSI到RGB的转化公式有些不同，它取决于要转换的点落在原始色所分割的哪个扇区。

$$\text{当 } 0 \leq H < \frac{2\pi}{3} \text{ 时: } R = I \left[1 + \frac{S \cos(H)}{\cos(\pi/3 - H)} \right]$$

$$B = I(1 - S)$$

$$G = 1 - (R + B)$$

$$\text{当 } \frac{2\pi}{3} \leq H < \frac{4\pi}{3} \text{ 时: } G = I \left[1 + \frac{S \cos(H - \frac{2\pi}{3})}{\cos(\pi - H)} \right]$$

$$R = I(1 - S)$$

$$B = 1 - (R + G)$$

$$\text{而当 } \frac{4\pi}{3} \leq H < 2\pi \text{ 时: } B = I \left[1 + \frac{S \cos(H - \frac{4\pi}{3})}{\cos(\frac{2\pi}{3} - H)} \right]$$

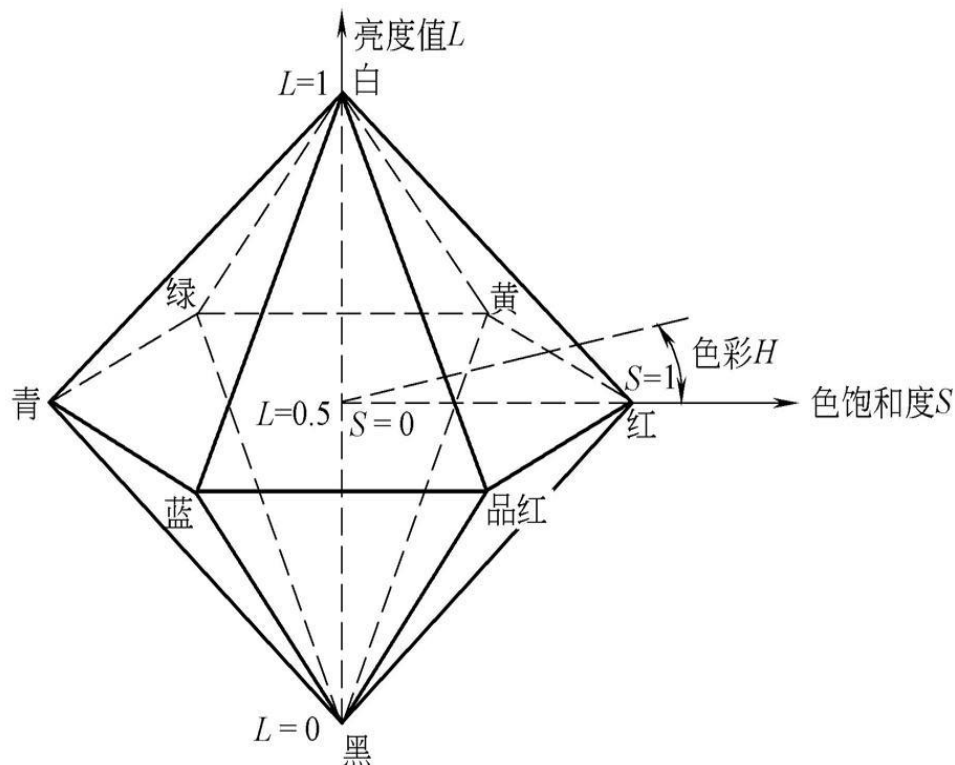
$$G = I(1 - S)$$

$$R = 1 - (B + G)$$



5.HLS颜色系统

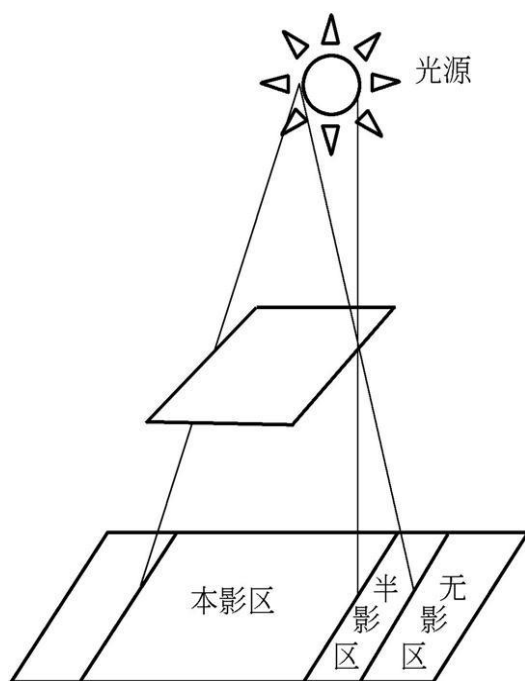
- HSV六棱锥模型可推广为双六棱锥HLS(色彩、亮度、色饱和度)模型。在HLS模型中,RGB颜色立方体投影在平面的两侧形成一个双六棱锥,如图8-33所示。亮度值 L 沿轴方向逐渐变化,黑色顶点处 $L=0$,而白色顶点处 $L=1$ 。如同HSV模型一样,其色饱和度由与中心轴线的径向距离决定,其完全饱和原色及其补色有 $S=1$ 。当 $S=0$ 时,色彩 H 无定义。





第三节 阴 影

当观察方向与光源方向重合时,观察者将看不到任何阴影,一旦两者不一致,就会出现阴影,阴影使人感到画面上景物远深近浅,从而极大地增强了画面的真实感。



阴影由两部分组成:本影和半影,位于中间全黑的轮廓分明的部分称为本影,本影周围半明半暗的区域称为半影,在计算机图形学中常用的点光源只产生本影,位于有限距离内的分布光源则将同时形成本影和半影。



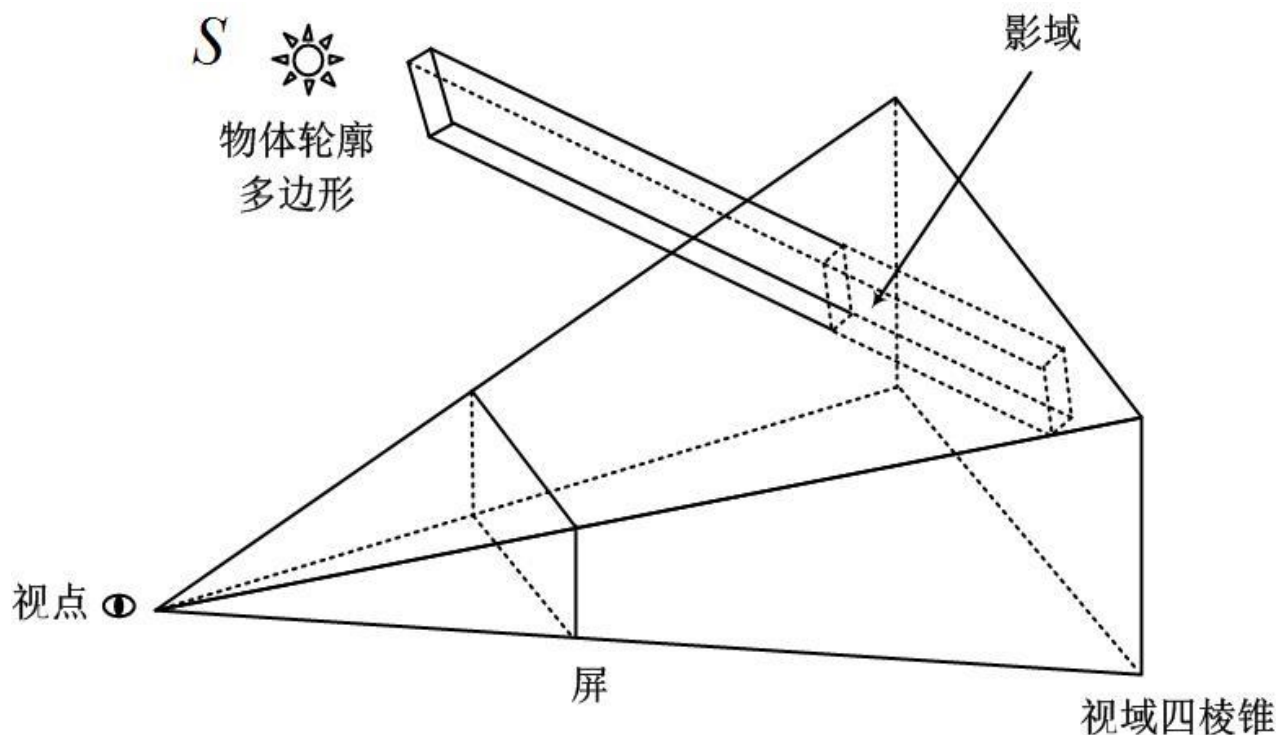
- 本影是任何光线都照不到的区域,而半影区域则为可接收到从分布光源来的部分光线的区域,为避免大量计算,一般只考虑由点光源形成的本影。阴影计算的开销与光源的位置有关,处于无穷远处的点光源是最容易计算的,其影子可以由正投影决定;而对视区之外有限距离处的点光源的计算就难得多,最困难的情况是点光源位于视区之内的情形。



一、影域多边形方法

使用影域多边形的方法。由于物体遮挡光源后，将在它们后面形成一个影域，所以确定某点是否落在阴影中只要判别该点是否位于影域中即可。

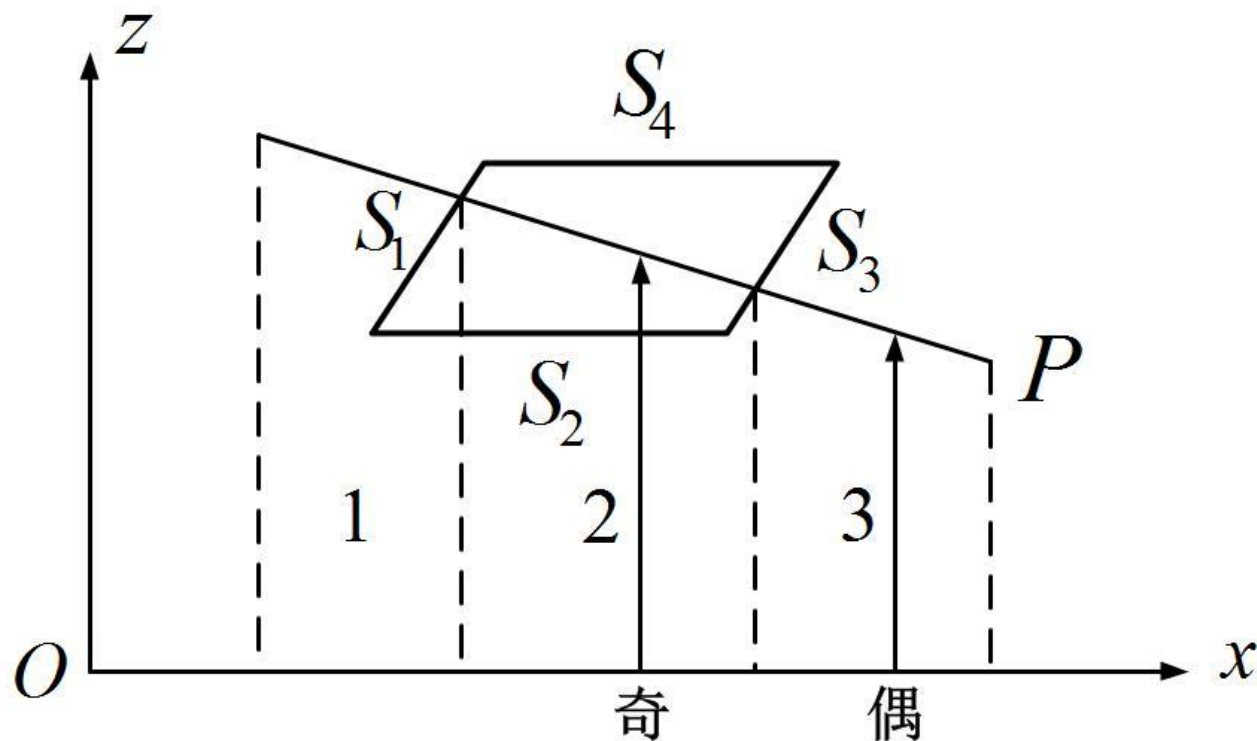
物体的影域定义为多面体和光源在景物空间中被该物体轮廓多边形遮挡的区域的布尔交。组成影域的多边形称为影域多边形。





在使用扫描线算法生成画面时，可通过以下处理进行阴影判断：

S_1, S_2, \dots, S_N 为当前扫描线平面和影域多边形的 N 个交线， P 为当前扫描线平面和景物多边形的交线，若连接视点与 P 上任一点的直线需穿越偶数（包括 0）个同一光源生成的影域多边形 S_i ，则该点不在阴影中，否则该点在阴影中，扫描线区间 1 和 3 中的 P 不在阴影中，但在区间 2 内， P 位于阴影区域内。





如果规定影域是凸多面体、影域多边形均取外法向,那么可根据 P 前后两侧的影域多边形属于前向面(其法矢量和视线矢量夹角小于 $\pi/2$ 的影域多边形)或后向面(其法矢量和视线矢量夹角大于 $\pi/2$ 的影域多边形)来确定阴影点。若沿视线方向, P 上任一点的后面有一后向面,前面有一前向面,那么该点必在阴影中,否则该点不在阴影中。

使用影域多边形计算本影的方便之处在于不必专门编制阴影程序,而只需对现有的扫描线消隐算法稍加修改即可。

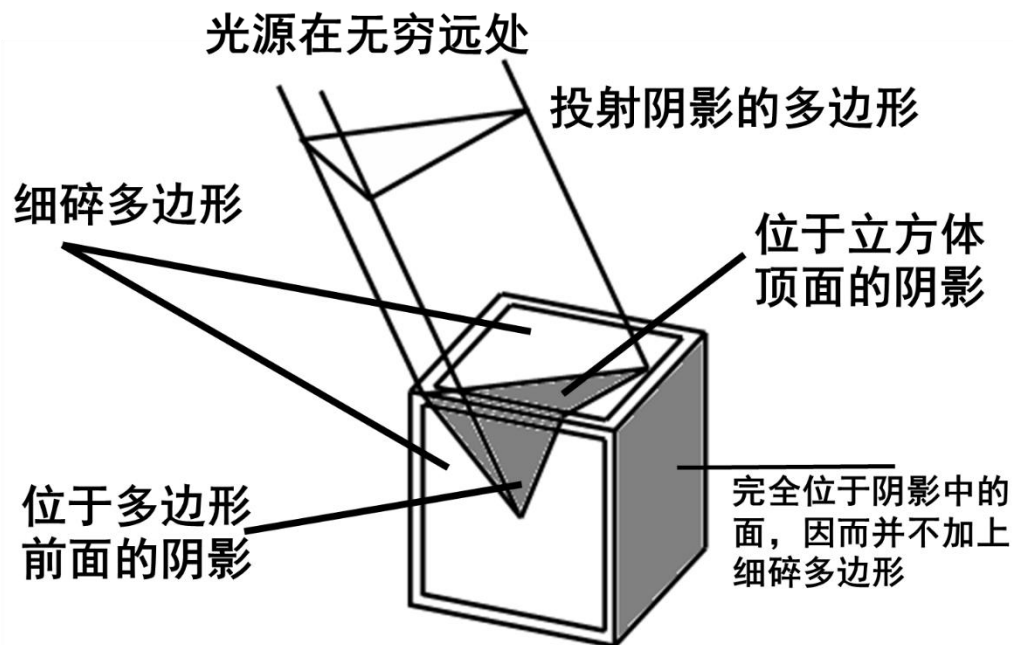


二、曲面细节多边形方法

Atherton 等人提出了另一种阴影算法，这种算法基于多边形区域分类的隐藏面消去算法。通过从光源和视点两次消隐生成阴影。

取光源方向为视线方向对景物进行第一次消隐，产生相对光源可见的景物多边形（称为曲面细节多边形）。并通过标识数将这些多边形与它们覆盖的原始景物多边形联系在一起。位于编号 i 的原始景物多边形上的曲面细节多边形也注以编号 i 。

取视线方向对景物进行第二次消隐，虽然曲面细节多边形不加入第二次消隐，但它们影响点的光亮度计算。如果多边形某部分相对视点可见，但没有覆盖曲面细节多边形，那么这部分的光亮度按阴影处理。反之，如果某部分可见，但为曲面细节多边形所覆盖，则计算这部分点的光亮度时需计入相应光源的局部光照明效果。





第四节 透明

表现场景整体照明效果的一个重要方面是透明现象的模拟。

- 非折射透明

透过透明性能很好的透明体，如玻璃窗，观察到的景物不会产生变形。

- 考虑折射的透明

透过一些透明物体，如透明球等进行观察时，位于其后的景物呈现严重的变形。这种变形是由于光线穿过透明介质时发生折射而引起的，因而是一种几何变形。

- 模糊变形

有些透明物体的透明性更差，观察者通过它们看到的只是背后景物朦胧的轮廓。

这种模糊变形是由于透明体表面粗糙或透明物体材料掺有杂质以至于从某方向来的透射光宏观上不遵从折射定律而向各个方向散射。此外，透明材料的滤光特性也影响透明性能。



非折射透明

1. 插值透明

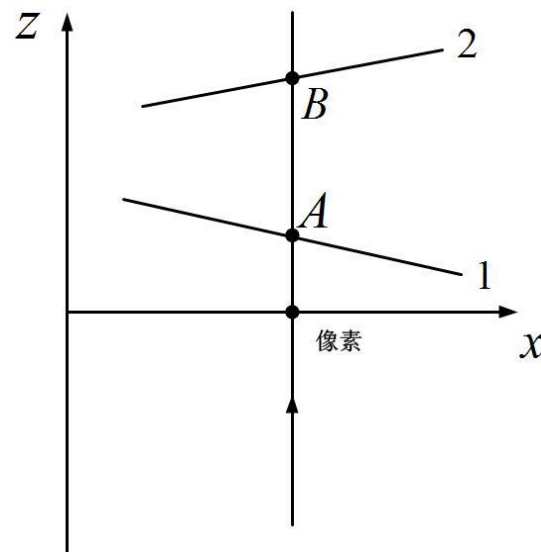
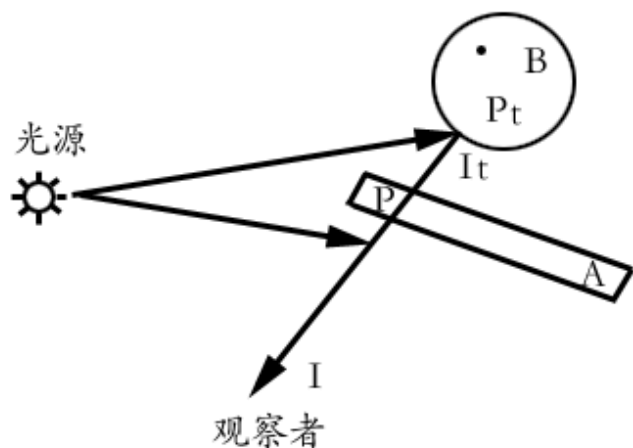
当一个透明平面多边形位于视点与另一个不透明平面多边形之间时，如错误!未找到引用源。所示，对于透明物体 1 和不透明物体 2 的投影重叠区域，透明的插值模型用线性插值法来计算物体表面像素的光亮

强度和颜色，像素的颜色 I_λ 由 A、B 两点的颜色 $I_{\lambda 1}$ 和 $I_{\lambda 2}$ 的插值产生，即

$$I_\lambda = (1 - K_{t1})I_{\lambda 1} + K_{t1}I_{\lambda 2} \quad (8-1)$$

式中，多边形 1 的透射系数是 K_{t1} ，它反映了多边形 1 的透明度，在 0~1 之间变化。 $K_{t1} = 0$ 表示多边形完

全不透明，则 $I_\lambda = I_{\lambda 1}$ ，即看不到多边形 2 的表面； $K_{t1} = 1$ 表示多边形 1 完全透明，这有 $I_\lambda = I_{\lambda 2}$ 。

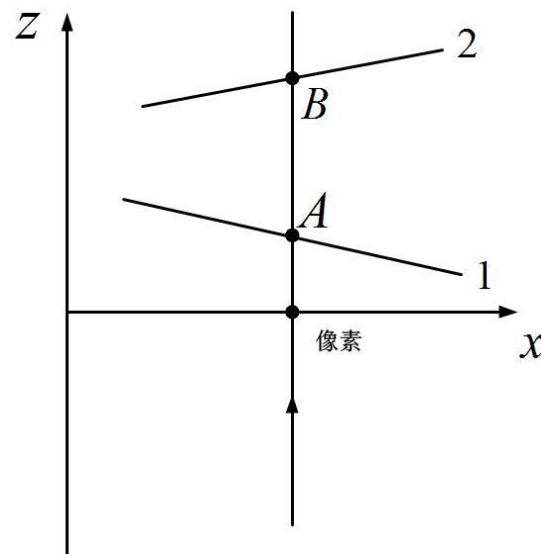


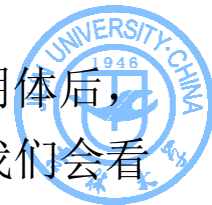


2. 过滤透明

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 1} + K_{t1} C_{t\lambda} I_{\lambda 2} \quad (8-1)$$

式中, K_{t1} 仍然是透射系数, 但它的变化范围不再局限于 0~1 之间。 K_{t1} 越大, 多边形 2 的颜色透过来的越多。 C_{t2} 对不同的颜色各不相同, 若 $C_{t2} = 0$, 则表示某种颜色的光不能透过多边形 1。





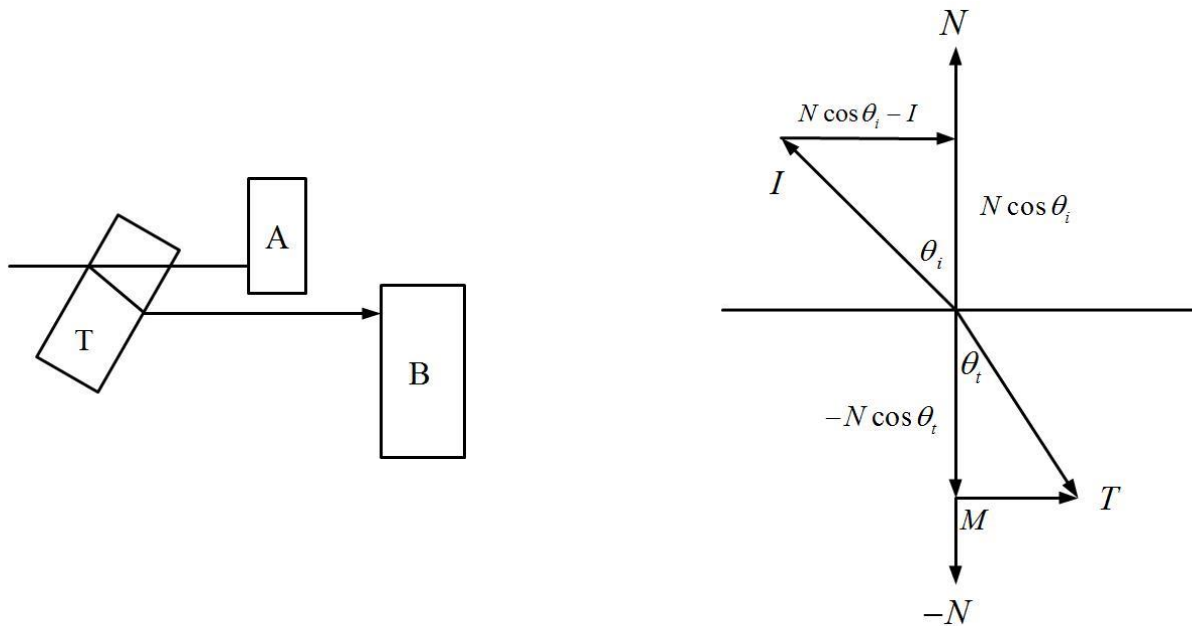
二、考虑折射的透明

考虑折射的透明计算要比不考虑折射的透明计算困难得多。因为光通过透明体后，它的几何方向发生了变化。如果没有折射，按视线的方向，通过透明体 **T** 后，我们会看到物体 **A**。但是当考虑了折射后，我们却看到了物体 **B**。

光线通过透明体时，发生了折射。光线的折射符合斯涅尔（**Snell**）折射定律，即折射光与入射光位于平面法线的两侧，而且折射角与入射角的关系符合

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

式中， η_i 和 η_t 分别为光线在第 1 种媒质和第 2 种媒质中的折射率。





记单位入射光矢量为 I （它的方向与光线的入射方向相反），单位法矢量为 N ，单位透射光矢量为 T ，则：

$$T = M - N \cos \theta_t \quad (8-1)$$

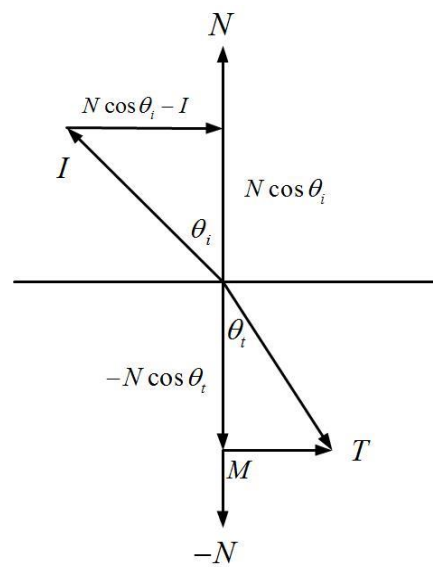
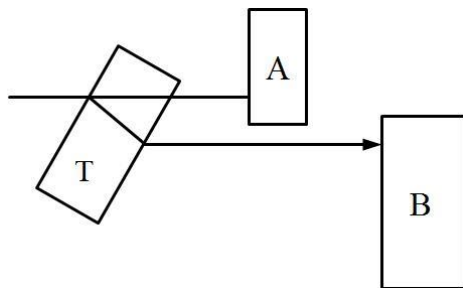
矢量 M 与矢量 $N \cos \theta_i - I$ 同向，且它的长度满足折射定律，即

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{|N \cos \theta_i - I|}{|M|} = \frac{\eta_t}{\eta_i} \quad (8-2)$$

则有

$$|M| = \eta |N \cos \theta_i - I| \quad (8-3)$$

式中， $\eta = \frac{\eta_i}{\eta_t}$



由式(8-26)得

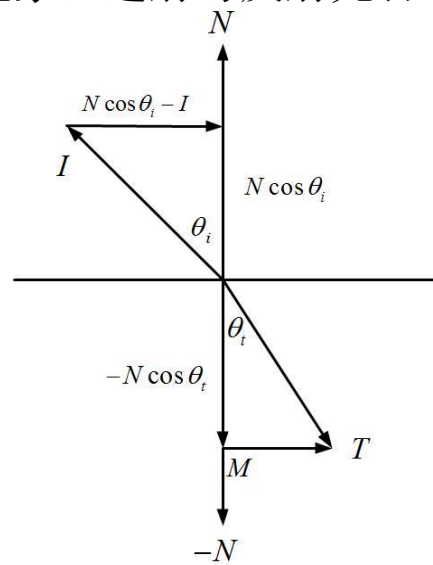
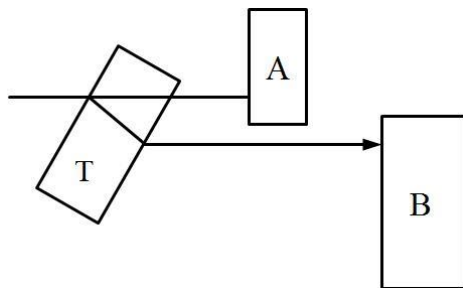
$$M = \eta |N \cos \theta_i - I| \frac{N \cos \theta_i - I}{|N \cos \theta_i - I|} = \eta (N \cos \theta_i - I) \quad (8-1)$$



将式(8-27)代入式(8-24)并整理，得透射光矢量的表达式为

$$T = (\eta \cos \theta_i - \cos \theta_t) N - \eta I \quad (8-2)$$

当光线从高密度介质射向低密度介质时， $\eta_i > \eta_t$ 即 $\theta_t > \theta_i$ ，如果入射角不断增大，到一定的程度，折射角 = 90° ，此时透射光线沿着平行于分界面的方向传播，称此时的 θ_i 为临界角度，记为 θ_c 。当 $\theta_i > \theta_c$ 时，发生全反射现象，透射与反射光合二为一。





第五节 纹 理

通过颜色色彩或明暗度变化体现出来的表面细节,这种纹理称为颜色纹理。另一类纹理则是由于不规则的细小凹凸造成的,称为几何纹理。

颜色纹理通常采用纹理映射的方法进行模拟,即将在纹理空间中 uv 平面上预先定义的二维纹理(函数、图形、图像等)映射到景物空间的三维景物表面上,通过投影变换,再进一步映射到图像空间的二维图像平面上。有时两步映射合并为一步并采用由纹理空间至图像空间的有理线性映射函数。



纹理映射主要有两种实现方法。

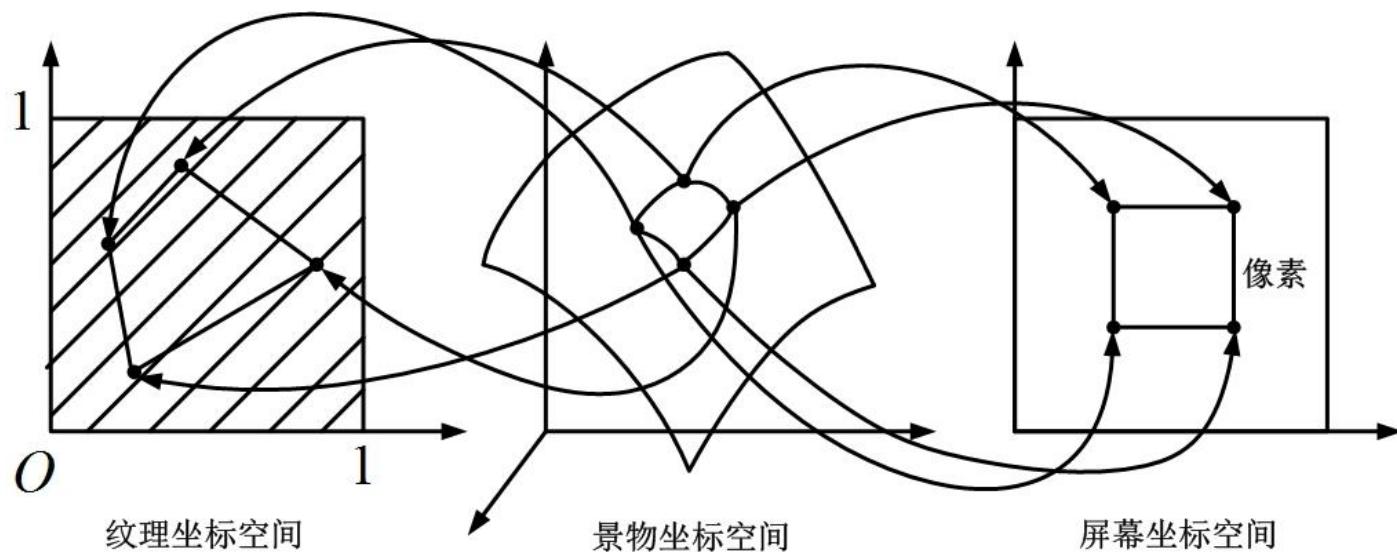
- 正向映射：即由纹理空间向图像空间映射。在纹理空间中，对二维纹理函数依序采样并一一映射到图像平面上，取同一像素内各纹理函数采样值的平均值作为该像素的显示光强。
- 逆向映射：即由图像空间映射到纹理空间，将屏幕像素映射到纹理平面上。



颜色纹理

Catmull曲面分割方法

对曲面进行分割，反映在参数空间是对正方形进行切割。据此可以很容易地建立起曲面片上的某一小块与参数空间中的某一小范围之间的对应关系。这样，当经过充分分割后、曲面片上每一小块在屏幕上的投影就可能至多只覆盖一个像素。





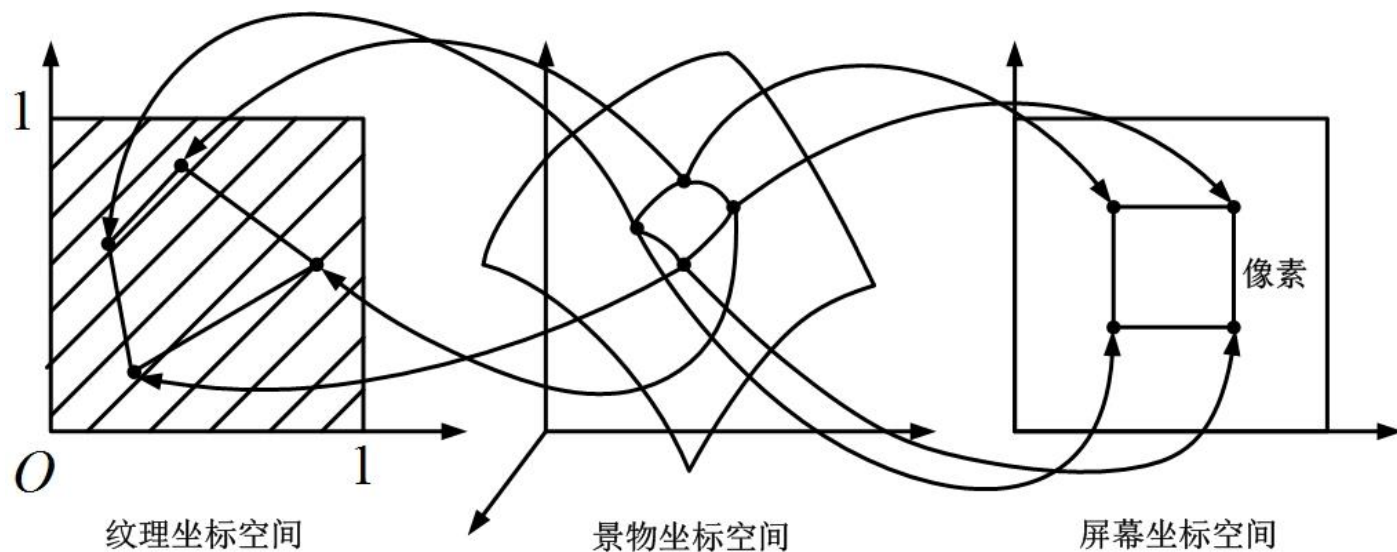
Catmull曲面分割方法

由像素找出投影后会覆盖在其上的那个小块（若无这种小块，该像素置背景值）上，再由该小块确定它在参数空间中的那个小范围，然后将定义在这个小范围上的纹理值取平均后作为该像素的显示值（如此可控制图形的失真）。

当曲面片定义在正交坐标系 (s, t) 中，而纹理定义在另一个正交坐标系 (u, v) 中，

若我们能在这两个坐标系之间找到一个恰当的变化，则问题即告解决。实际中经常使用的是一个双线性变换

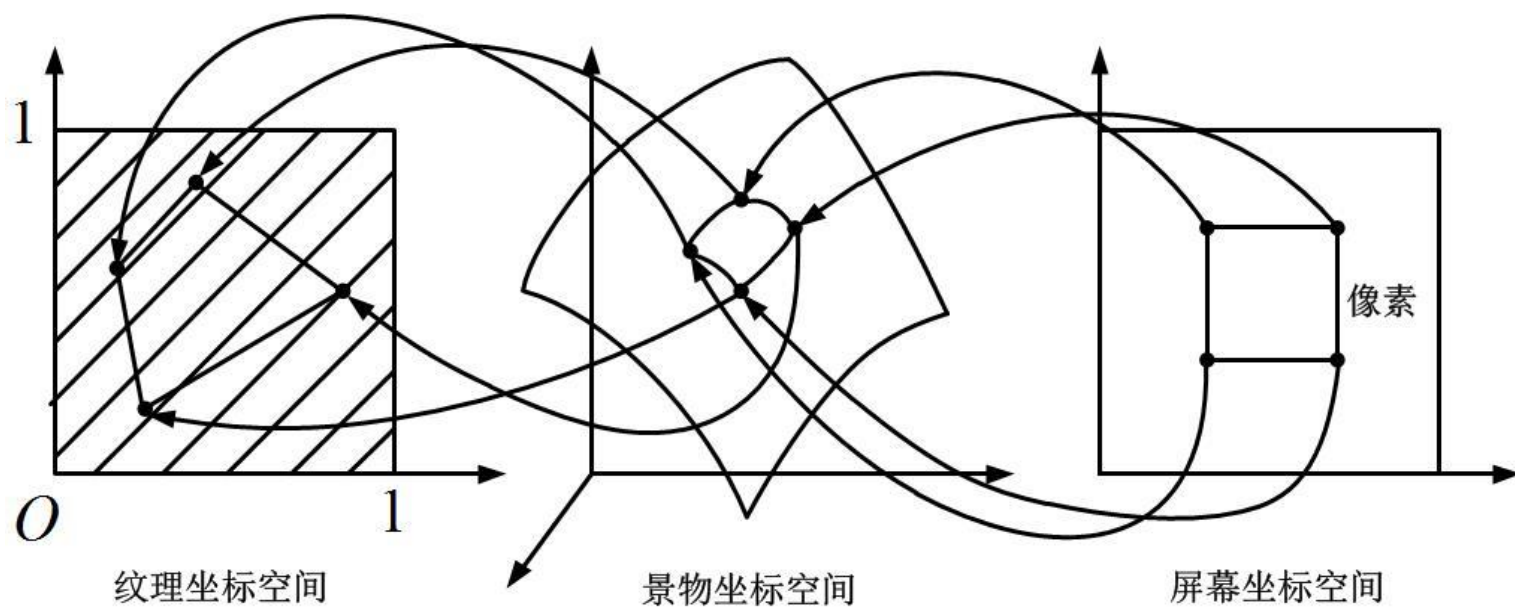
$$\begin{cases} s = Au + B \\ t = Cv + D \end{cases}$$





像素逆向映射

逆映射方法与正映射方法相比,一个主要的差别在于此方法是从屏幕空间中像素所占的小矩形出发的,而不是从对象空间中曲面片的某一小块出发。求像素的逆,实际上是求它四个顶点的逆,即找出显示对象上与之对应的四个点,从而确定与该像素对应的曲面片上的一小块。通过描述曲面片的参数方程的逆,又可以将这一小块曲面片与参数空间上的某个范围建立对应。最后利用参数空间与纹理空间的映射确定在后者中的区域,从而计算其上纹理的平均值,并将其作为一开始讨论的那个像素的显示值。





Mip图映射方法

Mip图映射方法是一种以牺牲部分精度来提高速度的纹理绘制方法。它将任一位置的纹理值用一个正方形区域上的样本平均值来近似,即采用一个正方形区域来近似表示屏幕像素在纹理空间的对应区域。



Mip图实际上是一张查找表。设 $t(u,v)$ 是纹理函数,那么给定一分辨率 $N \times N$ (如 512×512),可将纹理空间划分成 $N \times N$ 个小正方形区域。取每个小正方形区域中的纹理函数值的平均即得 $N \times N$ 个纹理函数平均值,按红、绿、蓝分量分别存放于三个 $N \times N$ 的二维数组中,即为Mip图的第一级数据。将第一级数据压缩一倍(即取每相邻的4个数据的算术平均得到一个数据)就得到Mip图的第二级数据,对第二级数据压缩一倍就得到第三级数据。依此压缩下去,可得到 $\log_2 N + 1$ 个不同等级的Mip图数据,其中某一级的数据由比它高一级的数据压缩一倍(进行算术平均)形成。这个由不同级纹理函数平均值组成的表称为Mip图,这种纹理映射方法称为Mip图映射。



由于纹理映射需计算各屏幕像素在纹理空间中对应区域上的纹理函数平均值,而Mip图事先已算出纹理平面上不同大小区域的纹理函数平均值并存放于表中,因此在求某个纹理区域的纹理函数平均值时只需查找Mip图即可。这就是设计Mip图的用意所在。

Mip图的查找由 u 、 v 、 D 三个量决定,其中 (u,v) 是屏幕像素中心的纹理空间坐标,而 D 为屏幕像素在纹理空间中所近似对应的正方形区域的边长,一般可取 D 为像素 e 映射至纹理空间后的曲边四边形的最大边长。



几何纹理

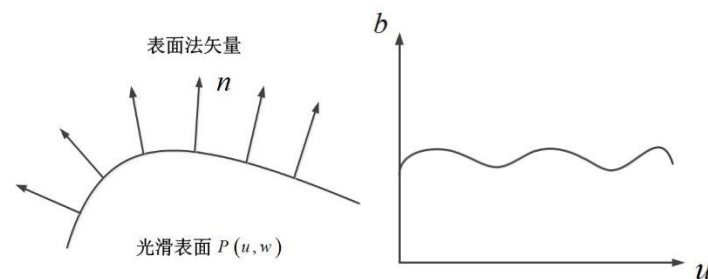
对于具有不同粗糙程度的物体表面纹理的实现,可以通过对表面**法向量进行扰动**,来产生凹凸不平的视觉效果.

Blinn通过在原始表面上增加一个干扰函数 $T(u,v)$,来定义一个具有粗糙纹理效果的新表面.

设 $O(u,v)$ 是一个表面,用 (u,v) 来表示该表面上的一点.

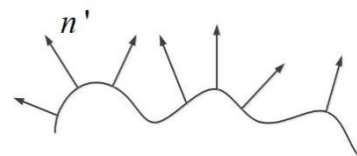
表示此点的法向量

$$\mathbf{N} = \frac{\partial O}{\partial u} \times \frac{\partial O}{\partial v}$$



新表面上对应点的位置矢量为:

$$O'(u, v) = O(u, v) + T(u, v) \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|}$$



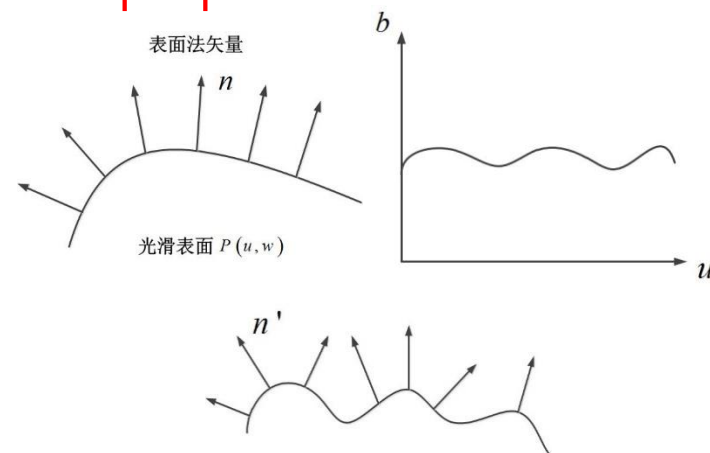


新的表面的法向量为

$$\mathbf{N}' = \frac{\partial \mathbf{O}'}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{O}'}{\partial v}$$

$$\frac{\partial \mathbf{O}'}{\partial u} = \frac{\partial \mathbf{O}}{\partial u} + \frac{\partial T}{\partial u} \cdot \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|} + T(u, v) \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|} \right)$$

$$\frac{\partial \mathbf{O}'}{\partial v} = \frac{\partial \mathbf{O}}{\partial v} + \frac{\partial T}{\partial v} \cdot \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|} + T(u, v) \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|} \right)$$





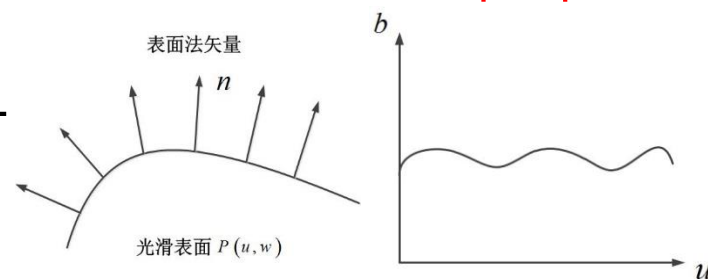
当 $T(u,v)$ 很小时,上式中的最后一项可以忽略,则有:

$$\frac{\partial O'}{\partial u} = \frac{\partial O}{\partial u} + \frac{\partial T}{\partial u} \cdot \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|} \quad \frac{\partial O'}{\partial v} = \frac{\partial O}{\partial v} + \frac{\partial T}{\partial v} \cdot \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|}$$

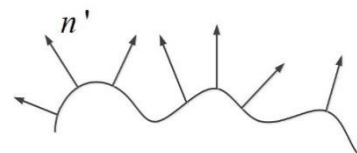
$$\mathbf{N}' = \frac{\partial O'}{\partial u} \times \frac{\partial O'}{\partial v}$$

$$= \frac{\partial O}{\partial u} \times \frac{\partial O}{\partial v} + \frac{T_u (\mathbf{N} \times O_v)}{|\mathbf{N}|} + \frac{T_v (\mathbf{N} \times O_u)}{|\mathbf{N}|} + \frac{T_u T_v (\mathbf{N} \times \mathbf{N})}{|\mathbf{N}|^2}$$

$$\mathbf{N}' = \mathbf{N} + \frac{T_u (\mathbf{N} \times O_v)}{|\mathbf{N}|} + \frac{T_v (\mathbf{N} \times O_u)}{|\mathbf{N}|}$$



或 $\mathbf{N}' = \mathbf{N} + \mathbf{D}$, \mathbf{D} 为一个干扰向量,在这里为上式后两项的和.



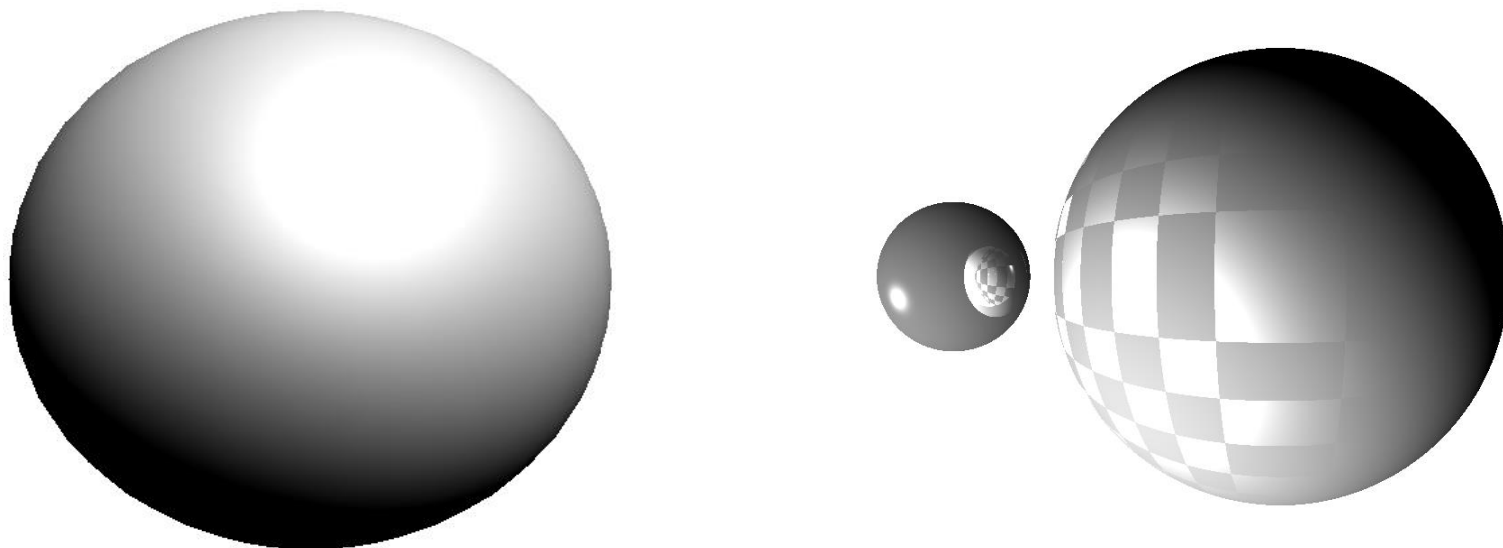


第六节 整体光照明模型

一、整体光照模型的概念

局部光照明模型：物体的简单光照模型，只考虑光源和被照表面的朝向，以确定到达观察者眼中的反射光的光强，而将周围环境对物体表面光强的影响简单地概括为环境光，忽略了物体间光线的相互影响，

整体光照明模型：场景中其他物体反射或透射来的光以及其他光源的入射光都不能忽略。因为光源照射到某一物体后的反射光，以及经由透明物体的折射光，对另一个物体而言则成光源。





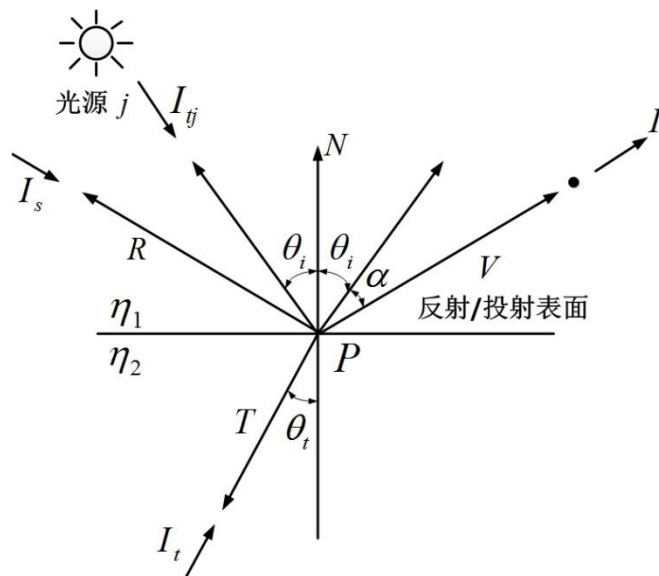
二、Whitted 整体光照模型

Whitted 光照模型保留了简单光照模型中的环境光、朗伯漫反射和 Phong 的镜面反射项，增加了环境镜面反射光和环境规则透射光，以模拟周围环境的光投射在景物表面上产生的理想镜面反射和规则透射现象。

被跟踪的入射光 V 到达物体表面上点 P ，观察者位于 $-V$ 方向上，光线 V 在点 P 处按 R 方向反射和按 T 方向折射（假定表面透明）。 I_s 为逆镜面反射方向到达表面点 P 并反射到观察者眼中的光线光强， I_t 为逆折射方向进入表面点 P 并投射到观察者眼中的光强， L_j 为第 j 个光源所在方向。由上可知，到达观察者眼中的光线光强 I 由三部分组成：一是由光源直接照射产生的反射光强，另外两部分则是 I_s 和 I_t ，于是到达观察者的光线光强为

$$I = K_\alpha I_\alpha + I_{tj} \sum_j \left(K_d \cos \theta_i + K_s \cos^n \alpha \right) + K_s I_s + K_t I_t \quad (8-1)$$

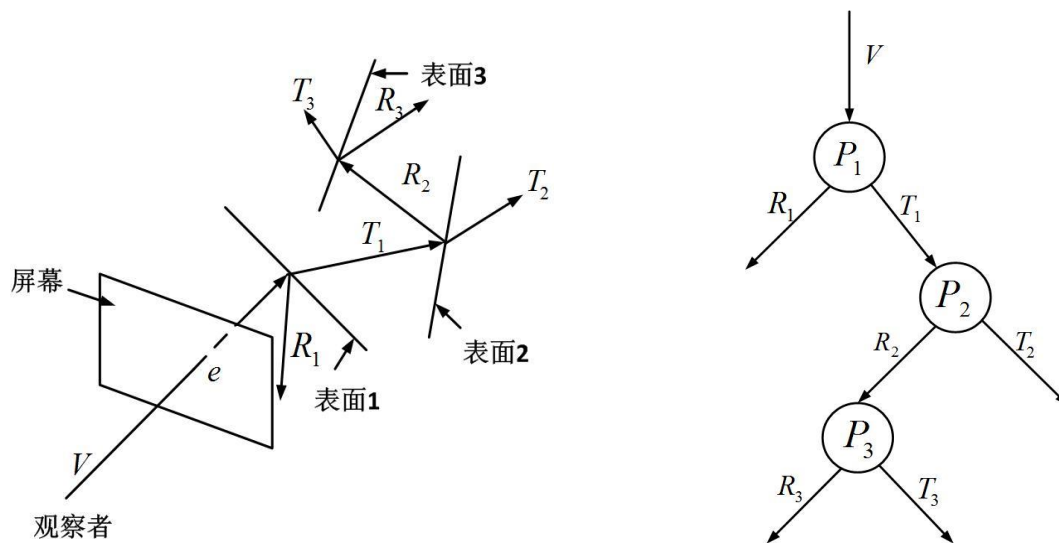
式中， K_α, K_d, K_s, K_t 分别为环境光照射、漫反射、镜面反射和透射系数，其他系数的含义请见简单光照模型。





三、光线跟踪

光线跟踪算法利用了光线的可逆性原理，不是从光源出发，而是从视点出发，沿视线方向进行跟踪。我们这里讨论的整体光照模型中的可见面计算，与不透明面光线投射算法不同之处在于，并非求出光线第一次和表面交点时就结束。观察者沿视线 V 出发，通过屏幕上一像素 e 的投射光线，求此光线与场景中最近物体的交点 P_1 ，在交点 P_1 处，光线沿 R_1 方向反射和沿 T_1 方向折射，于是在点 P_1 处生成两支光线，再继续跟踪这两支光线，找出它们与场景中表面2的交点 P_2 和表面3的交点 P_3 ，在交点 P_2 和 P_3 处生成的两支光线分别为 R_2, T_2 和 R_3, T_3 。重复以上跟踪过程，直到每一支光线都不再与场景中的物体相交为止。整个跟踪过程可用一棵树（称为光线树）来描述。树的每一节点表示光线与表面的交点（根节点除外），其左子树表示表面的反射光线，右子树表示折射光线。



a) 光线与表面交点 b) 光线树



因为 \mathbf{V} , \mathbf{R} , \mathbf{T} 均为单位矢量, 因此

$$\begin{aligned} |\overrightarrow{PC}| = |\overrightarrow{AP}| = |\overrightarrow{PE}| = 1, |\overrightarrow{PB}| = \cos \theta, |\overrightarrow{FE}| = 2 \cos \theta \\ \overrightarrow{PE} = \overrightarrow{PF} + \overrightarrow{FE} \end{aligned}$$

于是单位反向光矢量为 $\mathbf{R} = \mathbf{V} + 2\mathbf{N} \cos \theta = \mathbf{V} + 2\mathbf{N}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})$ 。

设 η_1 是 \mathbf{V} 方向空间媒质的折射率, η_2 是物体的折射率, 由

$$\frac{\overrightarrow{AB}}{\overrightarrow{CD}} = \frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

可解得

$$\cos \theta' = \left[1 - \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^2 (1 - \cos^2 \theta) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[1 - \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^2 (1 - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\overrightarrow{AB} = \mathbf{V} + \mathbf{N} \cos \theta = \mathbf{V} + \mathbf{N}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})$$

$$\overrightarrow{CD} = \frac{\eta_1}{\eta_2} \overrightarrow{AB}$$

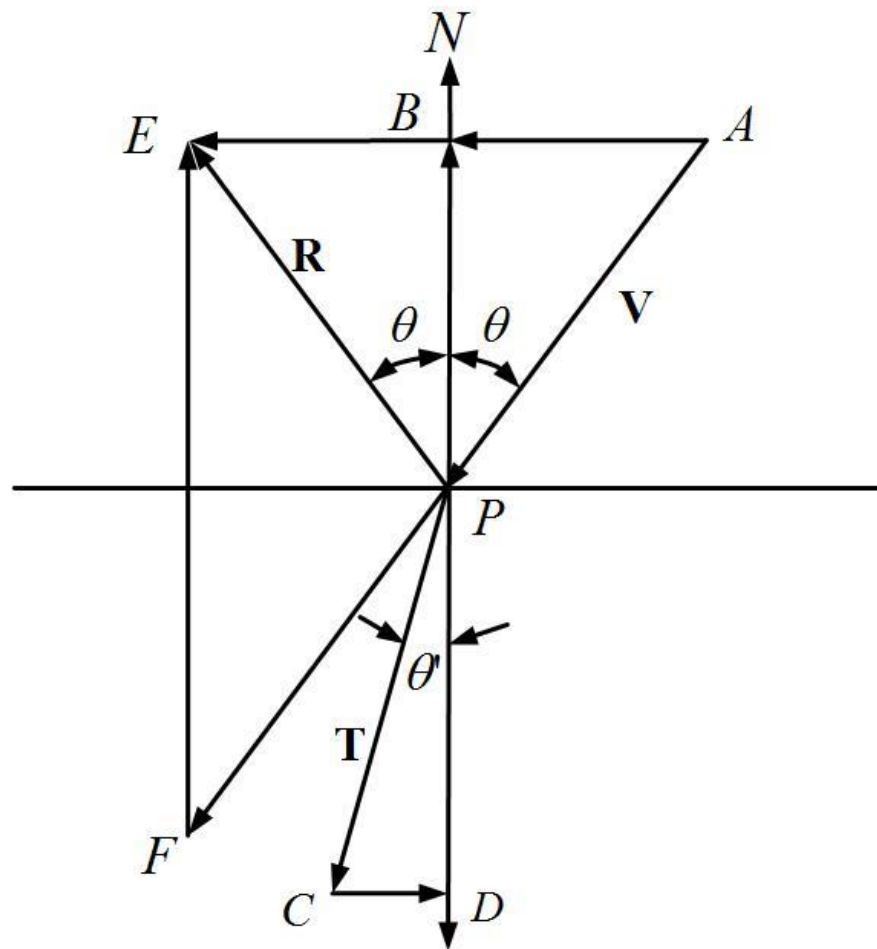
$$\overrightarrow{CD} = \frac{\eta_1}{\eta_2} (\mathbf{V} + \mathbf{N}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}))$$

$$\overrightarrow{PD} = -\mathbf{N} \cos \theta'$$

$$\overrightarrow{PC} = \overrightarrow{PD} - \overrightarrow{CD}$$

于是单位折射光矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= -\mathbf{N} \cos \theta' - \frac{\eta_1}{\eta_2} (\mathbf{V} + \mathbf{N} \cos \theta) \\ &= -\frac{\eta_1}{\eta_2} \mathbf{V} - \left(\cos \theta' + \frac{\eta_1}{\eta_2} \cos \theta \right) \cdot \mathbf{N} \\ &= -\frac{\eta_1}{\eta_2} \mathbf{V} - \left(\left[1 - \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^2 (1 - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})^2) \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{\eta_1}{\eta_2} (\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}) \right) \cdot \mathbf{N} \end{aligned} \quad (8-1)$$





虽然光线在景物间的反射和折射可以无限进行下去，但在计算机中不可能做无休无止的光线跟踪，需要给出光线跟踪的结束条件。当被跟踪的光线射出画面或跟踪深度达到给定层次时，应停止跟踪过程。考虑到被跟踪光线经多次反射和透射后会衰减（由于 k_s 和 k_t 的作用），也可通过判别跟踪光线对显示像素光亮度 I 的贡献是否小于一阈值来动态控制跟踪深度。设颜色灰度等级为 G （通常为255）， k 为所取阈值，那么凡是对显示像素光亮度 I 的贡献小于 k 个灰度级，或者说其贡献系数小于 k/G 的反射、透射光亮度都没有必要再计算下去。



Compute ray-tracing

```

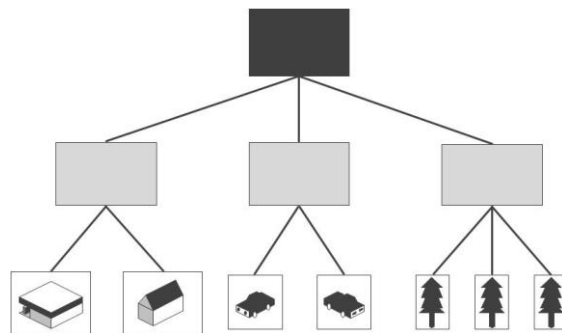
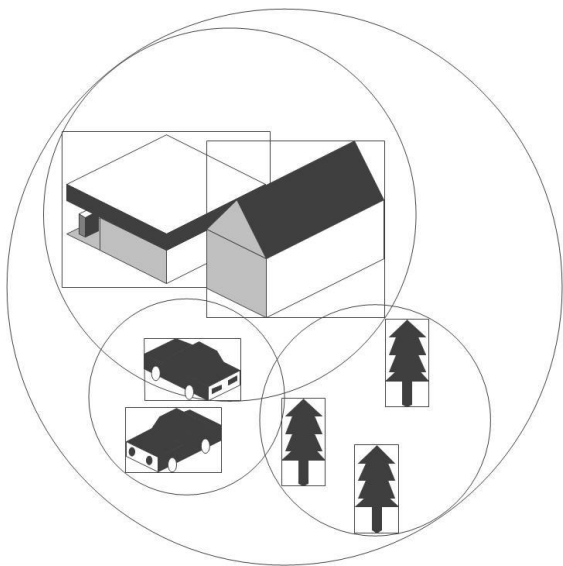
{
  for (需要计算光亮度的每一像素e){
    确定通过视点V和像素e的光线R;
    ray-tracing(R,I,1);
    置e的光亮度为I
  }
}
ray-tracing(R,I,A){
  /*R为当前跟踪光线, I为当前跟踪光线的光亮度, A为I对总光亮度的贡献系数*/
  if(A<k/G) I=0; //贡献系数小于k/G的反射、透射光亮度都没有必要再计算下去。
  else{
    R与景物求交, 返回可见点P1;
    计算P1点的局部照明光亮度Ic;
    若P1所在表面为光滑镜面, 确定P1的镜面反射光线Rr;
    ray-tracing(Rr,Is,ksA);
    若P1所在表面为透明面, 确定P1的规则透射光线Rt;
    ray-tracing(Rt,It,ktA);
    I=Ic+ksIs+ktIt
  }
}

```



四、加速光线跟踪算法

光线跟踪的求交计算和场景的复杂程度有密切关系。当景物仅由为数不多的平面和二次曲面片组成时，计算耗费不大。但是较为复杂的场景，常蕴含成千上万个景物表面，不仅数量多，而且还可能具有复杂的形状与解析表示，若求取光线与场景交点需与场景中所有景物表面一一进行求交测试，则计算耗费将大大增加。



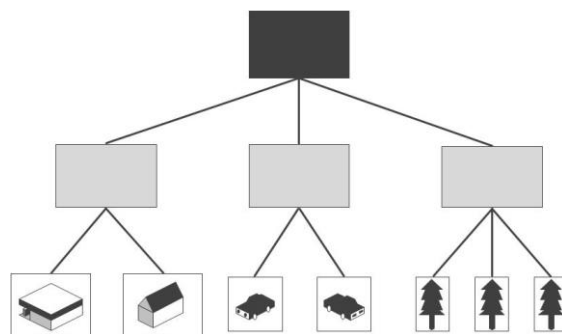
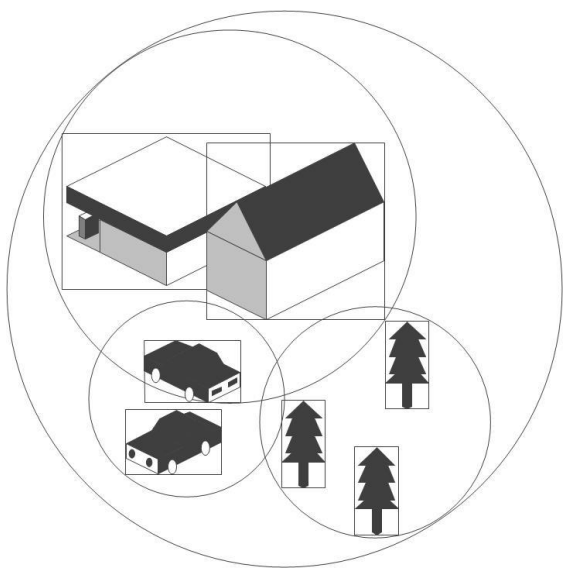


四、加速光线跟踪算法

一根光线只和场景中极少数场景表面相交,该光线与场景中所有表面一一做求交运算是无意义的。为此,可采用场景的分层次表示和包围盒技术。

场景的分层次表示,是指将场景中的所有表面按景物组成和景物间的相对位置分层次组织成一棵景物树.树的根节点表示整个场景,而以下节点则表示由若干景物表面组成一个个局部场景。

包围盒技术是指用几何形状相对简单的封闭表面(如长方形/球/圆柱等)将一复杂景物包裹起来。若被跟踪的光线与包围盒不交,则它与包围盒内所含所有景物表面均无交。由于判别光线与包围盒有交或不相交较容易,从而避免了许多不必要的求交计算。包围盒技术与场景的分层次表示结合使用时可大大减少求交的计算量。





算法8 - 1基于层次包围盒结构的光线跟踪算法。

```
void intersection(ray,scene)
```

```
{
```

```
//ray:光线
```

```
//scene:场景树节点
```

```
    if(ray与scene的包围盒有交点){
```

```
        if(scene是终节点){
```

```
            ray与scene求交。若有交，则将交点置入交点表中。
```

```
        }else{
```

```
            for (scene的所有儿子 child-of-scene) {
```

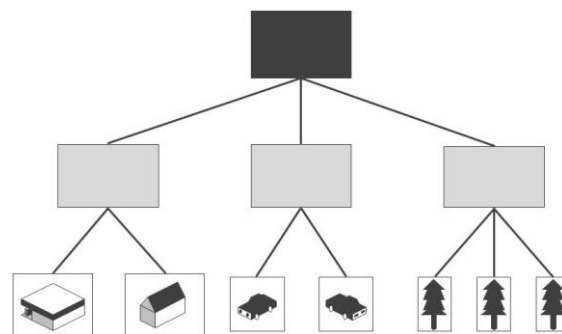
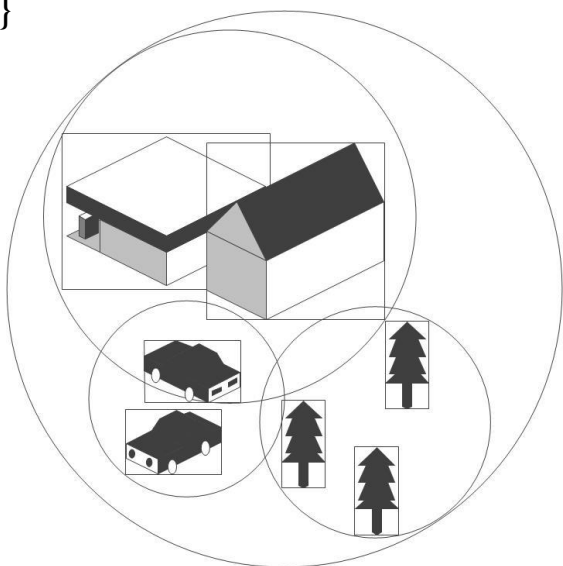
```
                intersection(ray,child-of-scene);
```

```
            }
```

```
        }
```

```
    }
```

```
}
```





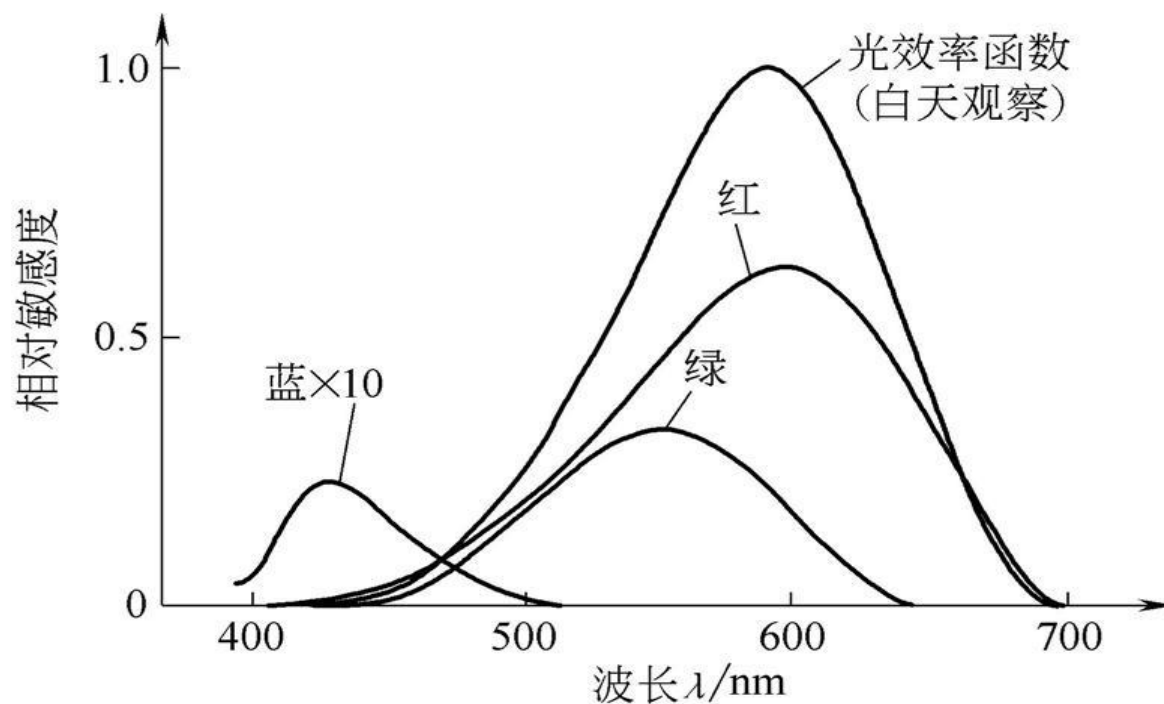
第七节 颜色模型

一、色度

当眼睛接收到的光包含所有波长的可见光信号,且其强度大致相等时,则发出光线的光源或所看到的物体是非彩色的。非彩色的光源为白光,而从物体反射或透射的非彩色光可能呈现白色、黑色或不同层次的灰色。在光源的白光照射下,若物体可反射80%以上的入射光,则物体看上去是白色的;若反射率小于3%,则物体看去是黑色的;介于它们之间的反射率,则形成了各种深浅不同的灰色。通常,反射光强取值在0~1之间,0对应黑色,1对应白色,而各中间值对应灰色。



亮度和明度这两个难于严格区分的概念。通常亮度是指发光体本身所发出的光为眼睛所感知的有效数量(多—少),而明度是指本身不发光而只能反射光的物体所引起的一种视觉(黑—白)。物体的亮度或明度取决于眼睛对不同波长的光信号的相对敏感度。图所示为眼睛的相对敏感度曲线。





颜色在心理生物学上可用色彩、色饱和度和明度三个参量来描述。色彩是某种颜色据以定义的一个名称,如红色、绿色、蓝色等;色饱和度是单色光中掺入白光的度量,单色光的色饱和度为100%,白光加入后,其色饱和度下降,非彩色光的色饱和度为0;明度为非彩色光的光强值。

同样的,颜色在心理物理学上也有三个与色彩、色饱和度和明度相对应的参量,它们是:主波长、色纯和亮度。在可见光谱上,单一波长的电磁能所产生的颜色是单色的。我们用 E_1 表示单色光的能量, E_2 表示单色光中掺入白光的能量,于是色纯可由 E_1 、 E_2 值的相对大小来决定。显然,当 E_2 降至0时色纯增到100%,当 E_2 增至 E_1 时色纯降至0,此时光呈白色。色纯可表示为

$$\left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \times 100\%, E_1 \geq E_2 \quad (8-39)$$

亮度是单位面积上所接受的光强,它与光的能量成正比。



二、三色学说

1807年,托马斯杨(T.Young)和赫尔曼·赫姆霍尔兹(H.Helmholtz)根据红、绿、蓝三原色可以产生各种色调及灰度的颜色混合规律,假设在人眼内有三种基本的颜色视觉感觉纤维。后来发现这些假设的纤维和视网膜的锥体细胞的作用类似,所以近代的三色理论认为三种颜色感觉纤维实际上是视网膜的三种锥体细胞。

赫姆霍尔兹假定的三种锥体细胞的吸收特性不完全一致,但却非常接近。现代研究测得存在长、中、短三种色素,它们分别单独存在于三种锥体细胞中。这些锥体细胞可分别被称为L、M、S锥体细胞。它们的三种色素的吸收峰分别在445nm、535nm和570nm附近,并具有较宽范围的光谱感觉性。这个学说现在通常称为杨-赫姆霍尔兹学说,也叫作三色学说。



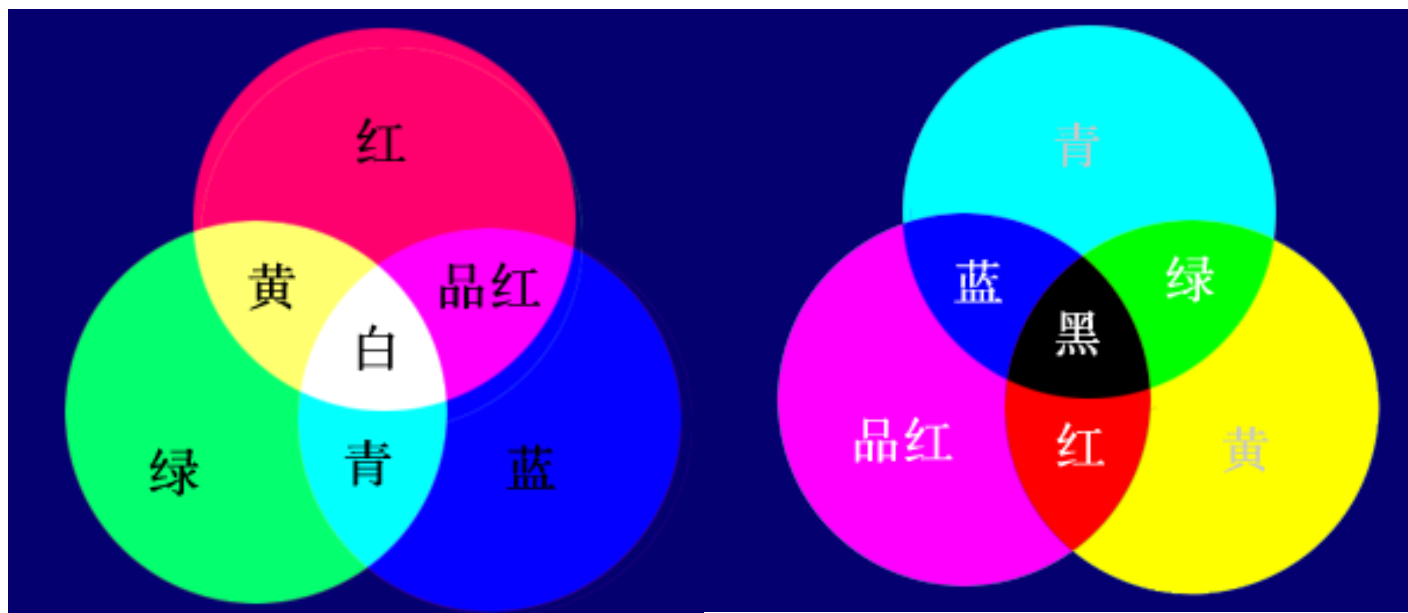
杨-赫姆霍尔兹学说的最大优越性是能充分说明各种颜色的混合现象。赫姆霍尔兹用简明的三种神经纤维的假设,使颜色实践中颜色混合这一核心问题得到满意的解释。

杨-赫姆霍尔兹学说是真实感图形学的生理视觉基础,我们所采用的RGB颜色模型以及其他的计算机图形学中的颜色模型都是根据这个学说提出来的,还可以根据这个学说用RGB来定义颜色。三色学说是颜色视觉中最基础、最根本的理论。



三、原色混合系统与颜色匹配实验

在计算机图形学中有两种原色混合系统,它们是红、绿、蓝(RGB)加色系统和青、品红、黄(CMY)减色系统。两种系统中的颜色互为补色。所谓一种颜色的补色是从白色中减去该颜色后所得到的颜色。可见青色是红色的补色,或说青色是白色减去红色所得颜色。其他颜色的互补关系照此类推。



加色系统和减色系统



对于反射体,例如印刷油墨、胶卷以及非发光显示器,常采用CMY减色系统。在减色系统中,应从白光光谱中减去其补色的光波。

对于发光体,例如彩色CRT显示器或彩色灯光,常采用RGB加色系统。通过试验可知,三种单色是得以匹配可见光谱中几乎所有颜色的最小数量的原色,但要求这三种匹配光在可见光谱中相距远,并且其中任意两种匹配光混合后都不能生成第三种匹配光,这三种光的颜色就是原色。然而,仍然有不少试验光无法用三色光相加的方法获得匹配。

人们通过大量实验统计得出结论:人的视觉系统大约可以分辨35000种颜色。当颜色仅在色彩上不同时,人眼大约可以分辨128种不同的色彩。如果仅改变颜色的色饱和度,则人眼大约可以分辨16种不同色饱和度的黄色和23种不同色饱和度的红色或紫色。



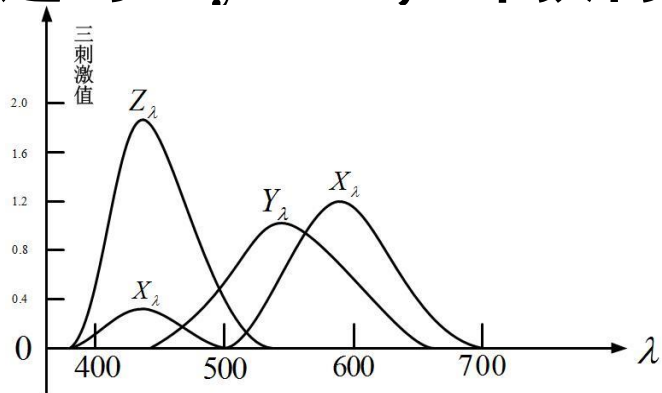
四、CIE色度图

人类对颜色的感知是以三刺激理论为基础的。三刺激理论假设人类眼睛的视网膜中有三种锥状视觉细胞，分别为红、绿、蓝。因此人们把这三种颜色定义为三基色。

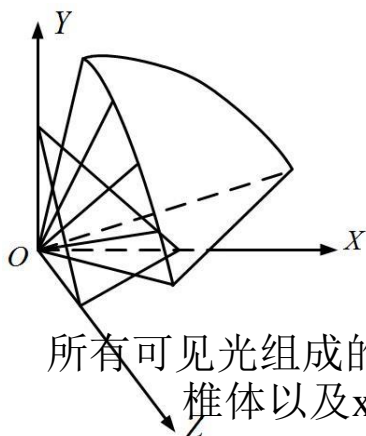
1931年，国际照明委员会（简称CIE）规定了三种基色（X、Y、Z），适当的混合在此三基色即可规定出我们眼睛所能看到的所有光感。我们对色度值写出如下定义：

$$x = \frac{X_\lambda}{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}, \quad y = \frac{Y_\lambda}{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}, \quad z = \frac{Z_\lambda}{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}$$

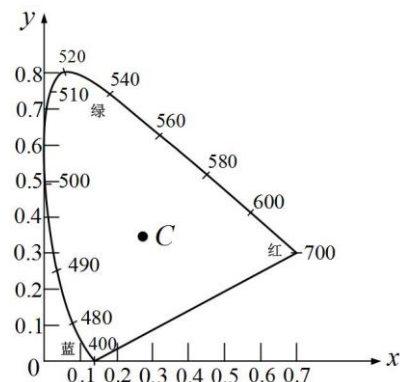
这时 $x+y+z=1$ ，即获得颜色C的亮度（x,y,z）。



CIE-XYZ系统的颜色匹配函数图



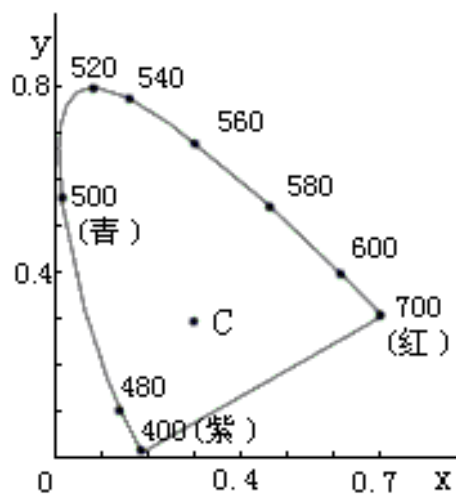
所有可见光组成的第一象限内的
锥体以及 $x+y+z=1$



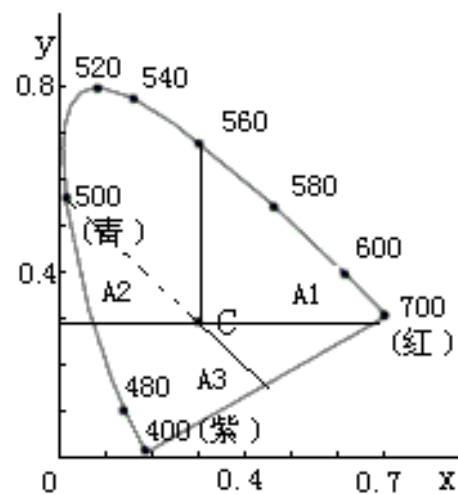
CIE-XYZ色度图



CIE色度图：马蹄形区域的内部和边界表示所有可见的色度。马蹄形区域边界的每一点，都对应在光谱中纯度为百分之百的纯色光，图中线上标明的数字为该位置所对应色光的主波长，图中央一点C对应于用来**近似太阳光的标准白色光**，它被定义为一种标准光源C。



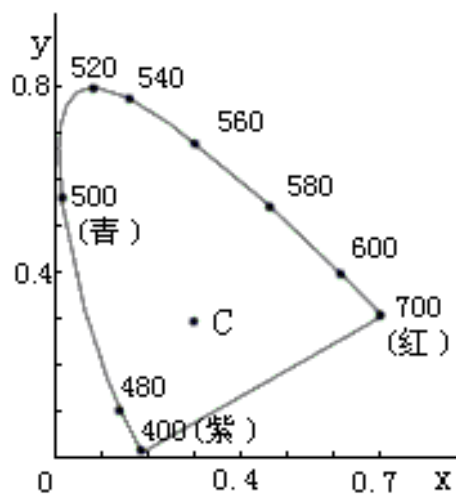
(1)



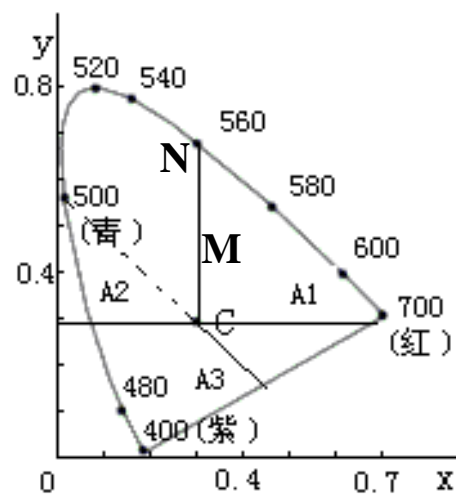
(2)

图8.13 CIE色度图及其应用

利用的CIE色度图，可以把三个CIE原色混合在一起以匹配某一种颜色，从而能够实际测量任何一种颜色的主波长和纯度。对于图8.13(2)中的某一点M，可以把颜色M看作是C点和N点上纯净谱光的一种混合体。这样，N就规定了主波长。MC长度与NC长度的比值就是M点的纯度Q，即 $Q=MC/NC$ ，M越靠近C，M含有的白光就越多，因而其纯度就越低。



(1)

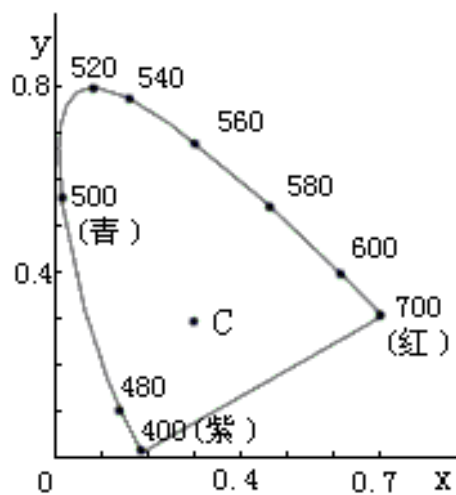


(2)

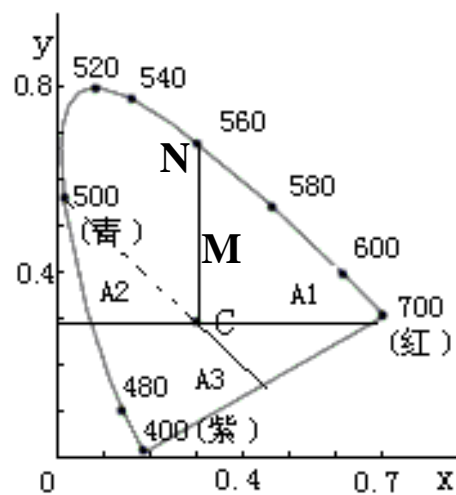
图8.13 CIE色度图及其应用



如果某点于C的连线交于底边紫色线上，则在可见光谱中找不到此颜色相应的主波长，这时其主波长可用其补色的光谱值附以后缀C表示，这一光谱值可以通过反向延伸直线与对测光谱边界线相交而得。



(1)

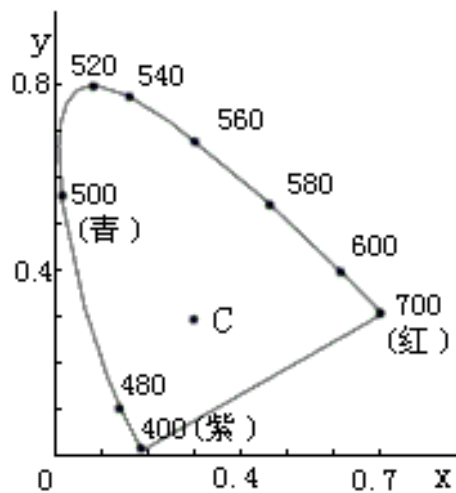


(2)

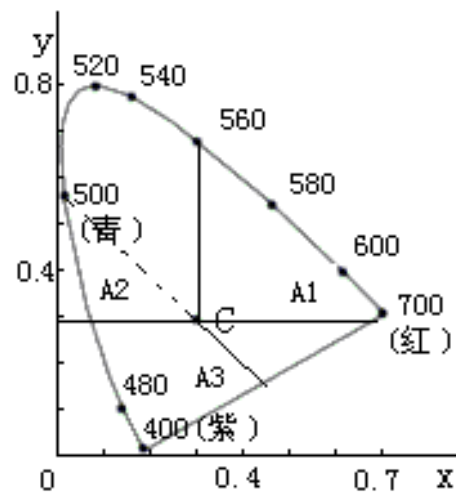
图8.13 CIE色度图及其应用



如图8.13 (2) 中A3的主波长为500nm. 欲得到一种光谱色的补色, 只需从这一点通过C点作一条直线求出其与对测光谱边界线的交点, 即可求得补色的波长。例如, 红橙色A1($\lambda=610\text{nm}$)的补色为蓝绿色A($\lambda=491\text{nm}$)这两种补色按一定比例相加得白色。



(1)



(2)

图8.13 CIE色度图及其应用



五、几种颜色系统

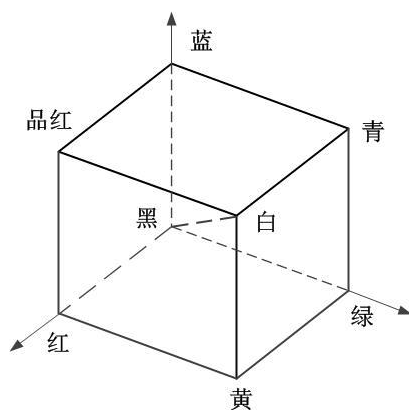
1. YIQ系统

- 1953年,美国电视标准委员会(NTSC)采用了一种新的颜色标准,即YIQ系统。该系统建立在CIE-XYZ系统的基本概念上。考虑到频带宽度的限制,取其中一个 Y 信号表示亮度信息。在 Y 信号中,NTSC红、绿、蓝三原色按适当比例混合以获得标准的光谱光效率曲线。NTSC标准中的标准白色原为CIE中的标准照明体C的颜色,但目前已广泛采用CIE中标准照明体 D_{6500} 作为标准白色。
- YIQ系统采用红色、绿色、蓝色之差的线性组合和 Y 信号表示色彩和色饱和度等彩色信息。它和RGB系统可以互相转换。

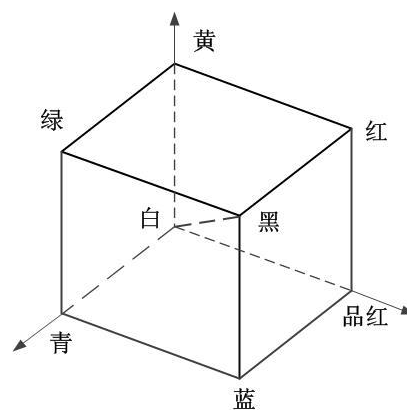


2. 颜色立方体

如同CIE-XYZ三刺激值一样,RGB和CMY颜色空间也是三维空间,它们可用一个三维颜色立方体来表示,如图所示。



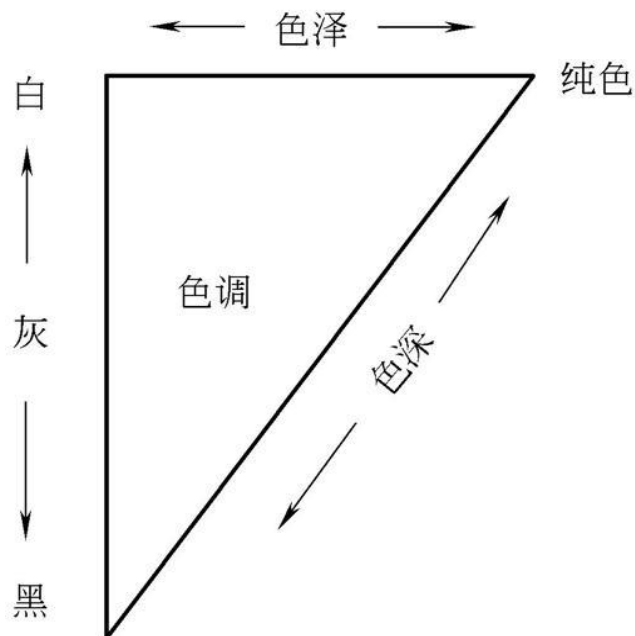
RGB



CMY



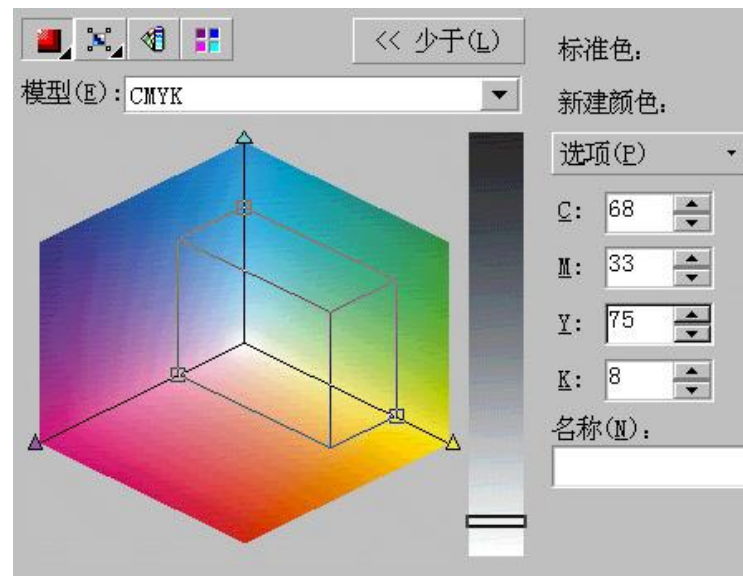
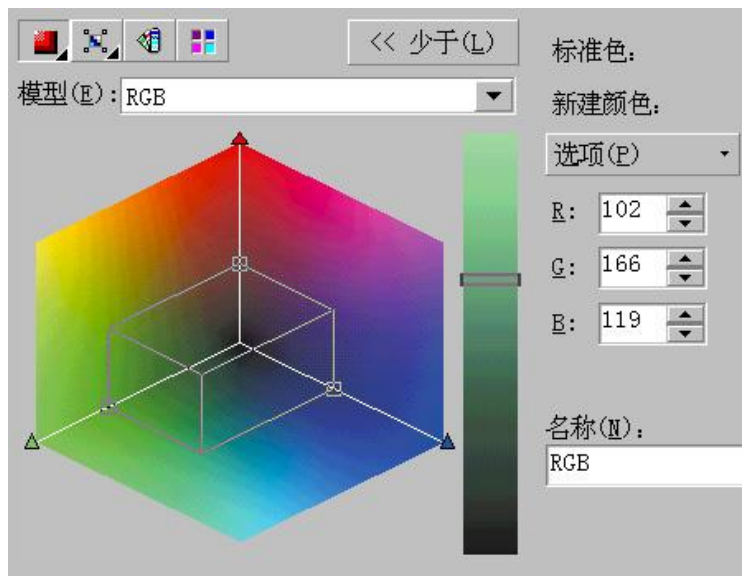
- 这两个系统中的各种层次的灰色均位于黑色至白色的对角线上,而原色的补色位于立方体上的对角顶点处。由RGB至CMY颜色空间的变换。





两个系统的关系可以由下式给出

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix}$$





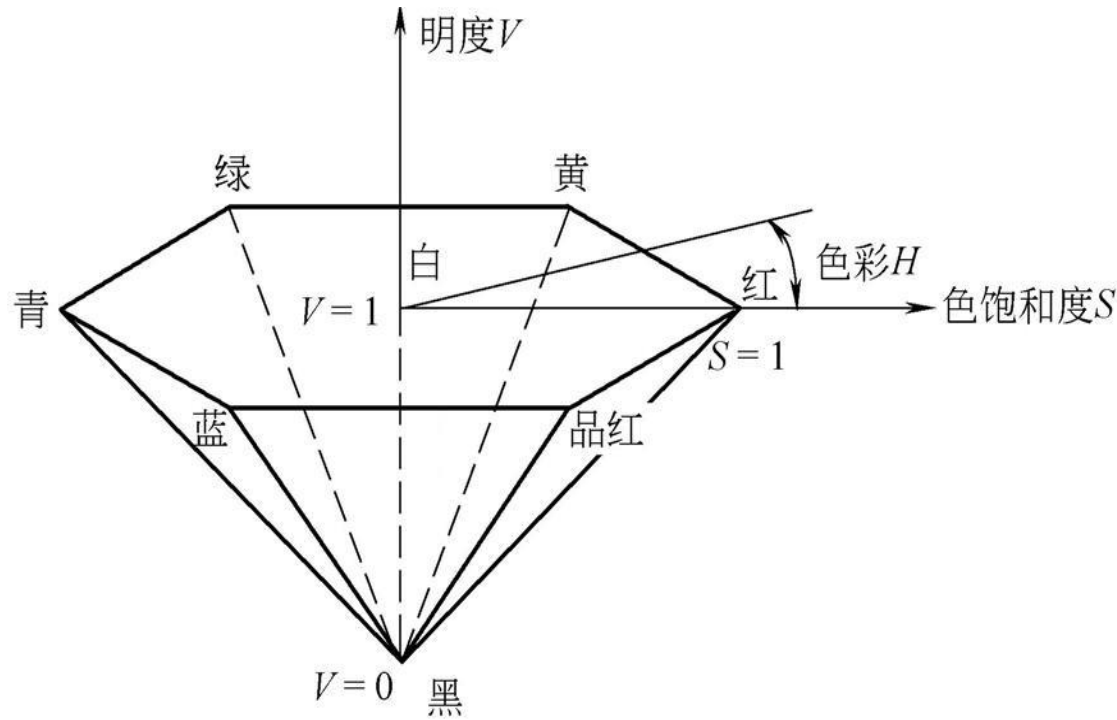
3. Ostwald颜色系统

- 画家用色泽、色深和色调表现颜色。如图8-31所示,给定一纯色颜料,画家可在其上加白色获得色泽,加上黑色获得色深,如同时调节,则获得具有不同色调的颜色。这样,可构成一个实用的主观颜色的三维表示,以克服上述颜色系统难于描述用户主观感觉的颜色这一缺点。



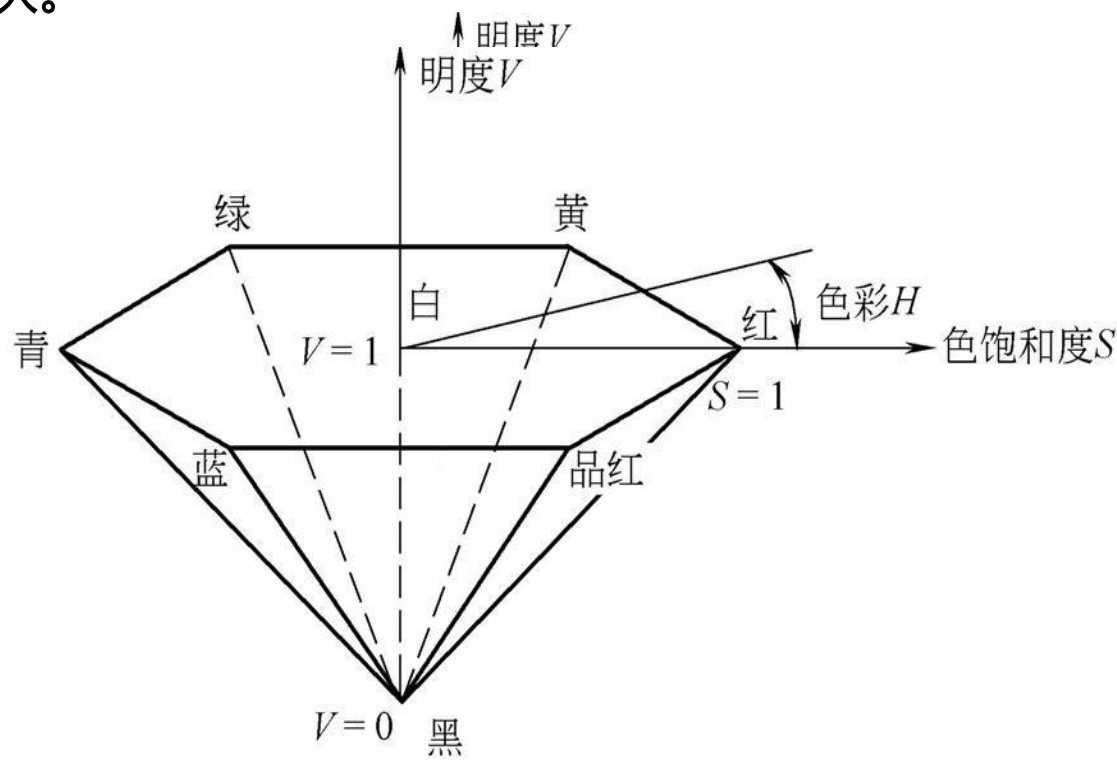
4.HSV颜色系统

- HSV(色彩、色饱和度、明度值)颜色体是史密斯于1978年提出的一个颜色模型。假如沿RGB颜色立方体(见图8-30a)的主对角线由白端向黑端看过去,它在平面上的投影将构成一个六边形,RGB三原色及相应的补色分别位于六边形的各顶点上。显然,降低各原色的色饱和度就得到一个较小的RGB颜色立方体,其在平面上的投影生成的六边形也较小。若将RGB颜色立方体和其子立方体的投影,沿着主对角线层层叠加就形成一个六棱锥体。





- 它的中心轴线表示颜色的明度 V ,对应黑色一端 $V=0$,而对应白色一端 $V=1$ 。明度 V 沿轴线由棱锥顶点的0逐渐递增到顶面时取最大值1,色饱和度 S 由棱锥上的点至中心轴线的距离决定,而色彩 H 则表示成它与红色的夹角($0^\circ \sim 360^\circ$)。在图8-32中,红色置于 0° 处。色饱和度取值范围由轴线上的0至外侧边缘上的1,只有完全饱和原色及其补色有 $S=1$,由三色构成的混合色值不能达到完全饱和。在 $S=1$ 处,由三原色构成的混合色值不能达到完全饱和。在 $S=0$ 处,色彩 H 无定义,相应的颜色为某层次的灰色。沿中心轴线,灰色由浅变深,形成不同的层次。





下面我们给出RGB模型与HSV模型之间的转换算法。

RGB-TO-HSV算法:

算法的输入是RGB模型中的颜色(r_i, g_i, b_i)值, $r_i, g_i, b_i \in [0, 1]$ 。

S_1 : [初始化] $V = \text{Max}(r_i, g_i, b_i)$,

$\text{Temp} = \text{Min}(r_i, g_i, b_i)$.

S_2 : [计算S] 如果 $V=0$, 则 $S(0$;

否则 $S((V-\text{Temp})/V$

S_3 : [计算cr, cg, cb]

$\text{cr}((V-R)/(V-\text{Temp}))$,

$\text{cg}((V-G)/(V-\text{Temp}))$,

$\text{cb}((V-B)/(V-\text{Temp}))$,

S_4 : [H]

如果 $R=V$, 则 $H \leftarrow \text{cb}-\text{cg}$ 。

(这个颜色是在yellow与magenta之间)

如果 $G=V$, 则 $H \leftarrow 2+\text{cr}-\text{cg}$ 。

(这个颜色是在cyan与yellow之间)

如果 $B=V$, 则 $H \leftarrow 4+\text{cg}-\text{cr}$ 。

(这个颜色是在magenta与cyan之间)

$H \leftarrow 60 * H$.

如果 $H < 0$, 则 $H \leftarrow H + 360$, 结束。



HSV-TO-RGB算法

输入为HSV模型中的H(0-360), S(0-1), V(0-1)。

S1: [当S=0时] 判断H是否为无定义,
如果是, 则 $(r, g, b) \leftarrow (V, V, V)$;
否则, 报告出错, 结束。

S2: [当S≠0时]

S2.1 如果H=360, 则 $H \leftarrow 0$ 。

$H \leftarrow H/60, I \leftarrow \text{int}(H), f \leftarrow H - I$ 。

$M \leftarrow V(1-S), N \leftarrow V(1-S*f), K \leftarrow V(1-S(1-f))$,

$(r, g, b) \leftarrow (V, K, M)$ 。

S2.2

如果 $I=0$, 则 $(r, g, b) \leftarrow (V, K, M)$ 。

如果 $I=1$, 则 $(r, g, b) \leftarrow (N, V, M)$ 。

如果 $I=2$, 则 $(r, g, b) \leftarrow (M, V, K)$ 。

如果 $I=3$, 则 $(r, g, b) \leftarrow (M, N, V)$ 。

如果 $I=4$, 则 $(r, g, b) \leftarrow (K, M, V)$ 。

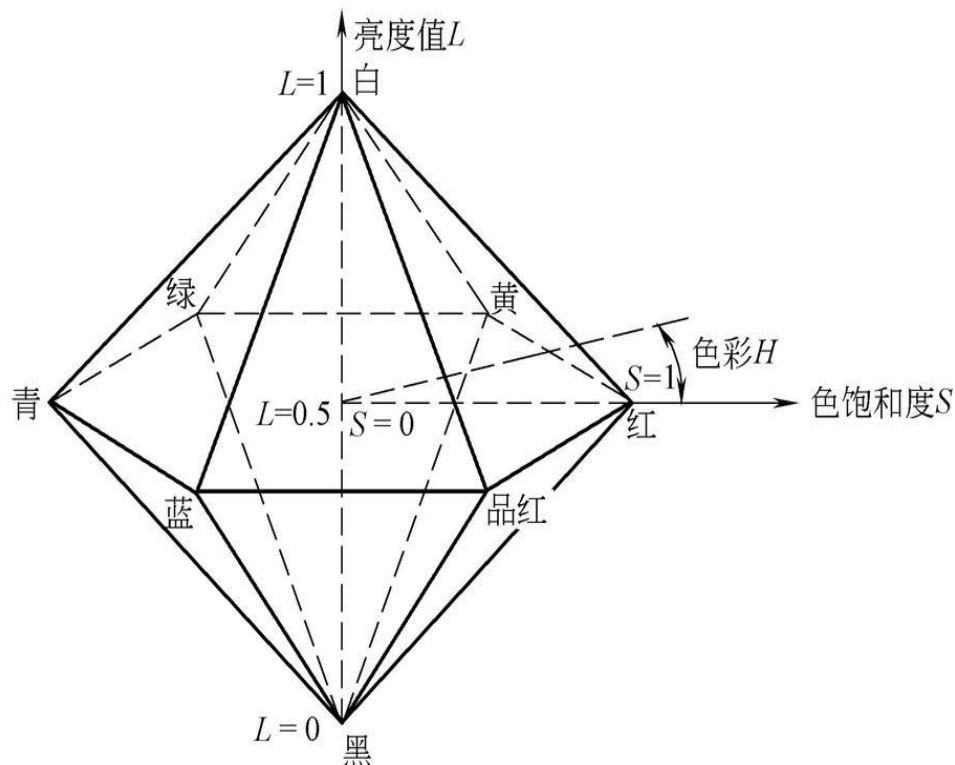
如果 $I=5$, 则 $(r, g, b) \leftarrow (V, M, N)$ 。

S2.3 输出 (r, g, b) , 结束。



5.HLS颜色系统

- HSV六棱锥模型可推广为双六棱锥HLS(色彩、亮度、色饱和度)模型。在HLS模型中,RGB颜色立方体投影在平面的两侧形成一个双六棱锥,如图8-33所示。亮度值 L 沿轴方向逐渐变化,黑色顶点处 $L=0$,而白色顶点处 $L=1$ 。如同HSV模型一样,其色饱和度由与中心轴线的径向距离决定,其完全饱和原色及其补色有 $S=1$ 。当 $S=0$ 时,色彩 H 无定义。





HLS模型主要用于描述发光体的颜色。从RGB转到HLS的算法程序代码如下：

```
RGB_TO_HLS(float r,float g,float b,float& h,float& l,float& s)
//已知 r,g,b 介于[0,1 ]之间;
//查找与 RGB 对应的 HLS 颜色值,其中 h 介于[0,360]之间;l,s 介于[0,1]之间。
//如果 s=0,则 h 无定义。
{
    m=max(r,g,b);
    n=min(r,g,b);
    l=(m+n)/2;
    if(m==n){
        s=0;
        h=undefined;
    }else{
        if(l<=0.5)
            s=(m-n)/(m+n);
        else
            s=(m-n)/(2-m-n);
        delta=m-n;
        if(r==m)
            h=(g-b)/delta;
        else if(g==m)
            h=2+(b-r)/delta;
        else if(b==m)
            h=4+(r-g)/delta;
        h*=60;
        if(h<0.0)
            h+=h+360;
    }
}
/*RGB-TO-HLS*/
```



从HLS转换到RGB的算法程序代码如下:

```
HLS_TO_RGB(float h,float l,float s,float&
r,float& g,float& b)
//已知h介于[0,360]之间或无定义
(undefined),l和s介于[0,1]之间;
//查找与HLS对应的RGB颜色值,其中
r,g,b介于[0,1 ]之间。
{
    if(1<-0.5)
        m2=1*(1+s);
    else
        m2= 1+s-1*s;
    m1=2*1-m2;
    if(s==0)
        if(h==undefined)
            t=g=b=1;
        else
            printf("error");
    else{
        r=value(m1,m2,h+120);
        g=value(m1,m2,h);
        b=value(m1,m2,h-220);
    }
}/*HLS_TO_RGB*/
```

```
float value(float n1,float n2,float hue)
{
    float v;
    if(hue>360)
        hue=hue-360;
    if(hue<0)
        hue=hue+360;
    if(hue<60)
        v=n1+(n2-n1)*hue/60;
    else if(hue<180)
        v=n2;
    else if(hue<240)
        v=n1+(n2-n1)*(240-hue)/60;
    else
        v=n1;
    return(v);
}/*value*/
```