

第九章 真实感图形学

真实感图形学是计算机图形学中的一个重要组成部分，在日常工作、学习和生活中已经有了非常广泛的应用。它的基本要求就是在计算机中生成三维场景的真实感图形图像。对于场景中的物体，要得到它的真实感图像，就要对它进行透视投影，并作隐藏面的消隐，然后计算可见面的光照明暗效果，得到场景的真实感图像显示。在本章中，首先介绍颜色视觉几个不同的光照明模型。然后用 Visual C++来实现通过建立“真实感图形学”程序，

包括颜色模型类、光照模型类、材质类、基于颜色缓冲区和深度缓冲区的直线基元和三角形基元类、基于 z-buffer 算法的场景深度消隐类、消隐绘制几何球体类等。

9.1 颜色模型

原理上讲任何一种颜色都可以用红、绿、蓝三原色按照不同比例混合来得到。光照明模型中，就是分别计算 R、G、B 三个分量的光强值，得到某个像素点上颜色值，即所谓 RGB 颜色模型。

9.1.1 CIE 色度图

根据 CIE (国际照明委员会) 选取的标准红、绿、蓝三种光的波长, 分别为: 红光, R, $\lambda_1 = 700nm$; 绿光, G, $\lambda_2 = 546nm$; 蓝光, B, $\lambda_3 = 435.8nm$ 。这样光颜色的匹配可以用式子表示为: $c = rR + gG + bB$ 被称为 CIE-RGB 系统。其中权值 r 、 g 、 b 为颜色匹配中所需要的 R、G、B 三色光的相对量, 也就是三刺激的值。用等能标准三原色来匹配任意颜色的光谱三刺激值时, 部分三刺激值是负数, 表明不可能靠混合红、绿、蓝三种光来匹配对应的光, 而只能在给定的光上叠加负值对应的原色, 来匹配另两种原色的混合, 但实际上并不存在负的光强。CIE-XYZ 系统利用三种假想的标准原色 X (红)、Y

（绿）、Z（蓝），得到的颜色匹配函数的三刺激值都是正值。该系统的光颜色匹配函数定义为如下的一个式子：

$$c = xX + yY + zZ$$

用 R、G、B 三原色（CIE-XYZ 标准原色）的单位向量定义一个三维颜色空间，在这三维空间中，一个颜色刺激（C）就可以表示为一个以原点为起点的向量，该三维向量空间称为（R、G、B）三刺激空间，该空间落在第一象限，该空间中的向量的方向由三刺激的值确定，因而向量的方向代表颜色。为了在二维空间中表示颜色，我们在三个坐标轴上对称的取一个截面，

该截面通过 (R)、(G)、(B) 三个坐标轴上的单位向量，因而可知截面的方程为 $(R) + (G) + (B) = 1$ 。该截面与三个坐标平面的交线构成一个等边三角形，它被称为色度图。把色度图投影到 XY 平面上，所得到的马蹄形区域称为 CIE 色度图（图 9-1-1），马蹄形区域的边界和内部代表了所有可见光的色度值，色度图的边界弯曲部分代表了光谱在某种纯度为百分之百的色光。图中央的一点 C 表示标准白光，色度图还可用于定义各种图形设备的颜色域，这里不再详细介绍了。虽然色度图和三刺激值精确描述颜色的标准，但是较复杂，在计算机图形学中，通常使用一些基于三维颜色空间的通俗易懂的颜色系统来描述。

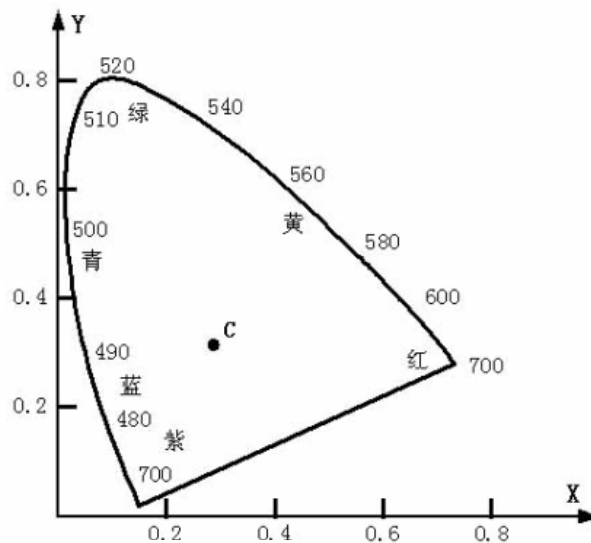


图 9-1 CIE 色度图

9.1.2 常用的颜色模型

颜色模型就是指三维颜色空间中包含某个颜色域的所有颜色的一个可见光子集。RGB 颜色模型是三维直角坐标颜色系统的一个单位正方体。真实感图形学中的主要的颜色模型也是 RGB 模型，除了 RGB 颜色模型，还有常见的 CMY，HSV 等颜色模型。

彩色阴极射线管等彩色光栅图形显示设备中多使用 RGB 颜色模型。如图 9-1-2 所示，红、绿、蓝原色为加性原色，即不同原色混合在一起可以产生复合色。RGB 颜色模型所覆盖的颜色域取决于显示设备荧光点的颜色特性，是与硬件相关的。

以红、绿、蓝的补色青 (Cyan)、品红 (Magenta)、黄 (Yellow) 为原色构成的 CMY 颜色模型, 常用于从白光中滤去某种颜色, 又被称为减性原色系统, 如图 9-1-3 所示。CMY 颜色模型对应的直角坐标系的子空间与 RGB 颜色模型所对应的子空间几乎完全相同。差别仅仅在于前者的原点为白, 而後者的原点为黑。前者是定义在白色中减去某种颜色来定义一种颜色, 而后者是通过从黑色中加入颜色来定义一种颜色。RGB 和 CMY 颜色模型都是面向硬件的。此外还有应于画家的配色的方法的 HSV (Hue, Saturation, Value) 颜色模型, 是面向用户。画家用改变色浓和色深的方法来从某种纯色获得不

同色调的颜色。其做法是：在一种纯色中加入白色以改变色浓，加入黑色以改变色深，同时加入不同比例的白色，黑色即可得到不同色调的颜色。

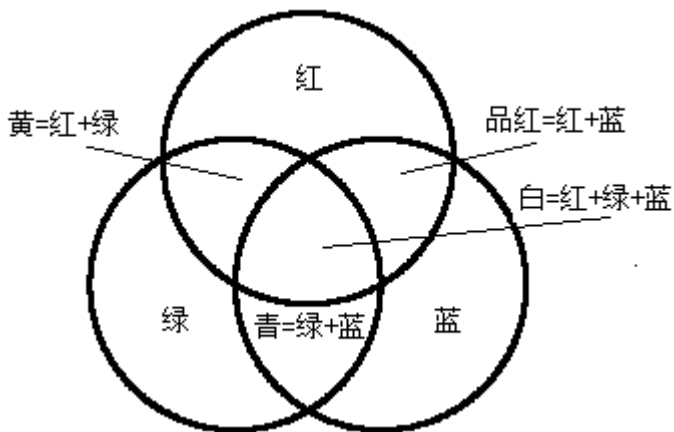


图 9-2 CMY 原色的加色效果

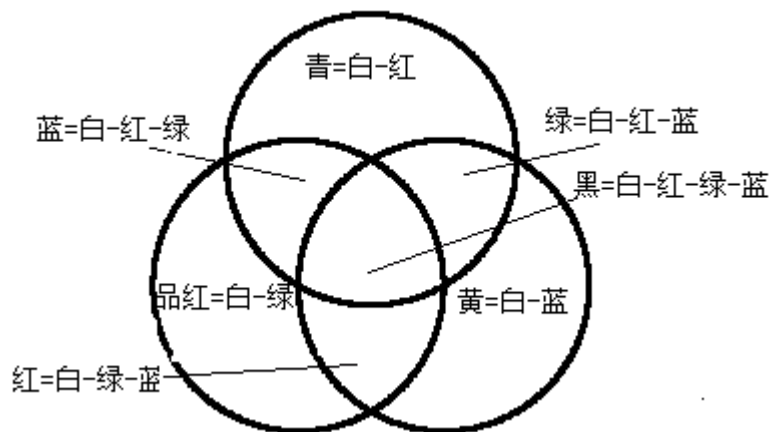


图 9-3 CMY 原色的减色效果

在本章建立的“真实感图形学”程序中的颜色模型 CFloatColor 类是在上述 RGB 颜色模型基础上，添加 Alpha 分量来实现的确定物体上顶点、

边、小面的颜色。当两种颜色进行混合时，Alpha 因子决定融合操作中两种颜色成分的比例，程序中处理颜色运算多采用浮点小数形式。

9.2 简单光照明模型

光照射到物体表面时，光线可能被吸收、反射和透射。被物体吸收的部分转化为热。反射、透射的光进入人的视觉系统，使我们能看见物体。为模拟这一现象，建立一些数学模型来替代复杂的物理模型，光照明模型是在已知物体物理形态和光源性质的条件下，计算场景的光照明效果的数学模型。

9. 2. 1 Phong 光照明模型

Phong 模型是一个模拟物体表面对光的反射作用的经验模型, 光源被假定为点光源, 反射作用被细分为镜面反射(Specular Reflection)和漫反射(Diffuse Reflection)。简单光照明模型只考虑物体对直接光照的反射作用, 而物体间的光反射作用, 只用环境光(Ambient Light)来表示。下面介绍 Phong 简单光照明模型光反射作用中各个组成部分。

1. 理想漫反射

自一个方向的光, 经漫反射使光均匀向各方向传播。漫反射是由表面的粗糙不平引起的, 与视点无关, 漫反射光的空间分布是均匀的。记入射光强

为 I_p ，物体表面上点 P 的法向为 N ，从点 P 指向光源的向量为 L ，两者间的夹角为 θ ，当 L 、 N 为单位向量时，则漫反射光强为：

$$I_d = I_p K_d * (L \cdot N)$$

其中， K_d 是与物体有关的漫反射系数， $0 < K_d < 1$ 。在有多光源的情况下，表示为：

$$I_d = K_d \sum_i I_{p,i} * (L_i \cdot N)$$

漫反射光的颜色由入射光的颜色和物体表面的颜色决定，在 RGB 颜色模型下，漫反射系数 K_d 的三个分量 K_{dr} , K_{dg} , K_{db} 分别代表 RGB 三原色的漫反射系

数，反映物体的颜色的，通过调整它们，可以设定物体的颜色。入射光强 I 也可分为三个分量 I_r, I_g, I_b ，通过这些分量的值来调整光源的颜色。

2. 镜面反射光

对于理想镜面，反射光集中在一个方向，并遵守反射定律。对一般的光滑表面，反射光集中在一个范围内，且由反射定律决定的反射方向光强最大。因此，对于同一点来说，从不同位置所观察到的镜面反射光强是不同的。将 V 和 R 都格式化为单位向量，镜面反射光强可表示为：

$$I_s = I_p \cdot K_s (R \cdot V)^n,$$

K_s 是与物体有关的镜面反射系数, α 为视线方向 V 与反射方向 R 的夹角, n 为反射指数, 反映了物体表面的光泽程度, 一般为 $1 \sim 2000$, n 越大物体表面越光滑。 R 可由 $R = N \cdot 2 \cos \theta - L = 2N(N \cdot L) - L$ 计算镜面反射光, 在反射方向附近形成得很亮的光斑, 称为高光现象。

对多个光源的情形, 镜面反射光强可表示为:

$$I_s = K_s \cdot \sum_{i=1}^m [I_{p,i} \cdot (R_i \cdot V)^n]$$

镜面反射光产生的高光区域只反映光源的颜色, 如在红光的照射下, 一个物体的高光域是红光, 镜面反射系数 K_s 是一个与物体的颜色无关的参

数，在简单光照明模型中，只能通过设置物体的漫反射系数来控制物体的颜色。

3. 环境光

环境光是指光源间接对物体的影响，是在物体和环境之间多次反射，最终达到平衡时的一种光。我们近似地认为同一环境下的环境光，其光强分布是均匀的，它在任何一个方向上的分布都相同。例如，透过厚厚云层的阳光就可以称为环境光。在简单光照明模型中，我们用一个常数来模拟环境光，

用式子表示为: $I_e = I_a \cdot K_a$ 。其中: I_a 为环境光的光强, K_a 为物体对环境光的反射系数。

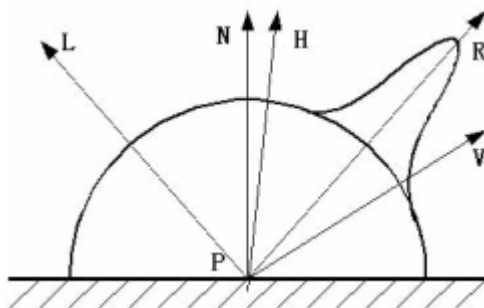


图 9-4 Phong 模型中的几何量

4. Phong 光照明模型

Phong 光照明模型: $I = I_a K_a + I_p K_d (L \cdot N) + I_p K_s (R \cdot V)^n$ 8

其中物体表面上一点 P 反射到视点的光强 I 为环境光的反射光强 I_e 、理想漫反射光强 I_d 、和镜面反射光 I_s 的总和

Phong 光照明模型是真实感图形学中提出的第一个有影响的光照明模型, 生成图像的真实度已经达到可以接受的程度; 但是在实际的应用中, 由于它是一个经验模型, 还具有以下的一些问题: 用 Phong 模型显示出的物体如塑料, 没有质感; 环境光是常量, 没有考虑物体之间相互的反射光; 镜面反射的颜色是光源的颜色, 与物体的材料无关; 镜面反射的计算在入射角很

大时会产生失真等。在后面的一些光照明模型中，对上述的这些问题都作了一定的改进。在 Phong 光照明模型中，由于光源和视点都被假定为无穷远，最后的光强计算公式就变为物体表面法向量的函数，当今流行的显示系统是用多边形表示的物体，每一个多边形法向一致，因而多边形内部的象素的颜色都是相同的，而且在不同法向的多边形邻接处，不仅有光强突变，而且还会产生马赫带效应，即人类视觉系统夸大具有不同常量光强的两个相邻区域之间的光强不连续性。为了保证多边形之间的光滑过渡，使连续的多边形呈现匀称的光强，下面介绍增量式光照明模型。

8. 2. 2 增量式光照明模型

增量式光照明模型是在每一个多边形的顶点处计算出合适的光照明强度或参数,然后在各个多边形内部进行均匀插值,得到多边形的光滑颜色分布。它包含两个主要的算法:双线性光强插值和双线性法向插值,又被分别称为 Gouraud 明暗处理和 Phong 明暗处理。

1. Gouraud 明暗处理

Gouraud 明暗处理是先计算物体表面多边形各顶点的光强,然后用双线性插值,求出多边形内部区域中各点的光强。基本算法描述如下:

(1) 计算多边形顶点的平均法向,

(2) 用 Phong 光照明模型计算顶点的平均光强,

(3) 插值计算离散边上的各点光强

(4) 插值计算多边形内域中各点的光强。

2. Phong 明暗处理

Gouraud 明暗模型具有计算速度快, 相邻多边形之间的颜色突变问题也得到解决, 产生的图像颜色过渡均匀, 图形显得非常光滑的优点, 但是, 由于采用光强插值, 它的镜面反射效果不太理想, 而且相邻多边形的边界处的马赫带效应不能完全消除。Phong 提出的双线性法向插值以时间为代价, 可

以部分解决上述的弊病。双线性法向插值将镜面反射引进到明暗处理中，解决了高光问题。与双线性光强插值相比，该方法有如下特点：

- a. 保留双线性插值，对多边形边上的点和内域各点，采用增量法。
- b. 对顶点的法向量进行插值，而顶点的法向量，用相邻的多边形的法向量作平均。
- c. 由插值得到的法向，计算每个象素的光亮度
- d. 假定光源与视点均在无穷远处，光强只是法向量的函数。

双线性光强插值可以有效的显示漫反射曲面，它的计算量小；而双线性法向插值与双线性光强插值相比，可以产生正确的高光区域，但它的计算量要大的多。当然，这两个插值算法的增量式光照明模型本身也都存在着一些缺陷，具体表现为：用这类模型得到的物体边缘轮廓是折线段而非光滑曲线；由于透视的原因，使等间距扫描线产生不均匀的效果；插值结果决定于插值方向，不同的插值方向会得到不同的插值结果等。

在后面“真实感图形学”程序中，应用着色方法即为区域填充的计算模型，包括平面明暗着色模型和光滑明暗着色模型。平面明暗着色处理就是用一种单一颜色填充一多边形，多边形的颜色一般由第一个顶点的颜色来决

定。对于一条直线，也将被着色为第一个顶点的颜色，平面明暗着色处理方法会产生不真实的效果，但这种方法非常适合快速成像和速度重于图片精度的场合。光滑明暗着色处理不再以单一颜色填充多边形，其填充颜色颜色与各顶点的颜色有关，多边形内的颜色是由顶点的颜色（或计算机所需要的其它属性）经过线性插值计算获得的，而每一个顶点的颜色保持不变。这样越靠近顶点，颜色就越是突出。这种方法将多边形的内部填上平滑的渐变色，因而有更强烈的外观。

9.3 局部光照明模型

在真实感图形学中，局部光照明模型为仅处理光源直接照射物体表面的光照明模型。简单光照明模型，可以计算经点光源照明的物体表面的光强，实际上就是一种局部关照明模型，认为镜面反射项与物体表面的材质无关。可以处理物体之间光照的相互作用的模型称为整体光照明模型。下面介绍后面的整体光照明模型计算局部光强时被经常使用的一个更复杂更普遍的局部光照明模型。

9.3.1 局部光照明模型

考虑电磁波对满反射和镜面反射的影响局部光照明模型表示为：

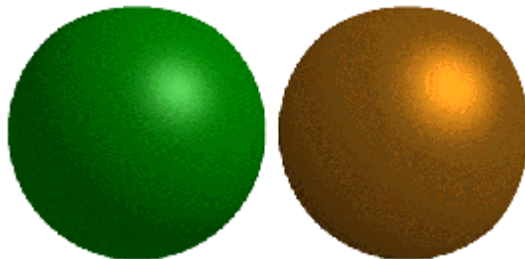
$$I_r = I_a K_a + I_i (N \cdot L) d\omega (K_d R_d + K_s R_s)$$

式中, I_r 为直接光照下物体表面表现出来的反射光强; $I_a K_a$ 的定义与简单光照明模型相同, 表示环境光的影响; 式子中的最后一项是考虑了物体表面性质的反射光强度量。

与上一节介绍的简单光照模型的比较, 本节讨论的局部光反射模型有如下的一些优点:

(1) 局部光照明模型是基于入射光能量导出的光辐射模型, 而简单光反射模型基于经验, 显然前者更具有理论基础。

(2) 局部光照明模型的反射项以实际物体表面的微平面理论为基础, 反映表面的粗糙度对反射光强的影响。



(3) 局部光照明模型的高光由 Fresnel 定律, 根据材料的物理性质决定颜色, 而简单光照模型只以高光颜色与材料无关。

(4) 简单光照模型在入射角接近 90° 时会产生失真现象, 而在局部光照明模型中可以很好的改进这一点。

9-5 图左边的球用 Phong 光照明模型显示, 右边的球用局部光照明模型显示两者在高光域有明显的区别

(5) 用简单光照模型生成的物体图像，看上去象塑料，显示不出磨亮的金属光泽，而在局部光照明模型中，反射光强的计算考虑了物体材质的影响，就可以模拟金属的光泽。

9. 4 光透射模型

对于透明或半透明的物体，透射光是在光线与物体表面相交时，产生折射，经折射后的光线将穿过物体而在物体的另一个面射出现象。视点在折射光线的方向上时，就可以看到透射光。本节中将介绍一些典型的光透射模型。

9. 4. 1 透明效果的简单模型

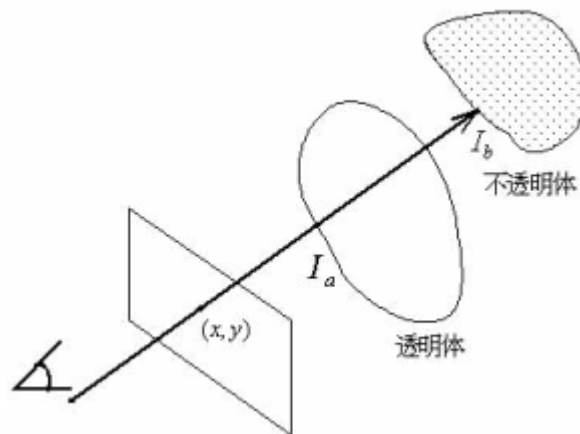
透过透明物体材料可看到其后面的物体。但是由于光的折射，光透过透明物体后通常会改变光的传播方向，要在真实感图形学中模拟折射，需要较大的计算量，在 Whitted 和 Hall 提出光透射模型之前，为了能够看到一个透明物体后面的东西，就有一些透明效果模拟的简单方法。

在这类方法中主要的是颜色调和法，该方法不考虑透明体对光的折射以及透明物体本身的厚度，光通过物体表面是不会改变方向的，故可以模拟平面玻璃，前面介绍的隐藏面消除算法都可以用于实现模拟这种情况。

设 t 是物体的透明度， $t=0$ 表示物体是不透明体； $t=1$ 表示物体是完全透体。可以看到物体后面的背景和其他物体，这些物体的前后位置可以通过隐藏面消除算法计算出来。实际上，我们最终所看到的颜色，是物体表面的颜色和透过物体的背景颜色的叠加。如图 8-4-1 所示，设过象素点 (x,y) 的视线与物体相交处的颜色(或光强)为 I_a ，视线穿过物体与另一物体相交处的颜色(或光强)为 I_b ，则象素点 (x,y) 的颜色(或光强)可由如下颜色调和公式计算

$$I = tI_b + (1-t)I_a$$

其中, I_a 和 I_b 可由简单光照明模型计算。由于未考虑透射光的折射, 以及透明物体的厚度, 颜色调和法只能模拟玻璃的透明或半透明效果。而在我们后面介绍的两个光透射模型中, 都从光的折射角度来计算透射光强, 可以很好的模拟光的透射。



9-6 颜色调和模拟透明效果

9. 4. 2 Whitted 光透射模型

在简单光照明模型的基础上，加上透射光一项，再加上反射光一项，

Whitted 整体光照模型为：

$$I = I_a K_a + I_p K_d (L \cdot N) + I_p K_s (H \cdot N)^n + I_t K_t' + I_s K_s'$$

这里， I_s 为镜面反射方向的入射光强度； K_s' 为镜面反射系数，为 0~1 之间的一个常数；其大小同样取决于物体的材料。

4. 4. 3 Hall 光透射模型

Hall 光透射模型是在 Whitted 光透射模型的基础上推广而来的，它能够模拟透射高光的效果，同时还可以处理理想的漫透射。

用 Lambert 余弦定律描述点 P 处的漫透射光的光强为:

$$I_{dt} = I_p \cdot K_{dt} \cdot (-N \cdot L)$$

其中 I_p 为入射光的强度, 即点光源的强度, K_{dt} 为物体的漫透射系数, 在 0 与 1 之间。L 为光源方向, N 为面法向。

Hall 用下面的式子模拟透射高光现象:

$$I_t = I_p \cdot K_t \cdot (T \cdot V)^n$$

其中, I_t 为透射光在视线方向的强度, I_p 为点光源的强度; K_t 为物体的透明系数, n 为反映物体表面光泽的常数。

为减少计算量, 可以和简单光照明模型一样, 作如下假设:

- (1) 假定光源在无穷远处, 光线方向 L 为常量;
- (2) 视点在无穷远处, 视线方向 V 为常量;
- (3) 用 $(H_t \cdot N)$ 代替 $(T \cdot V)$, 这里 H_t 可以视为一个虚拟的理想透射面的法向, 使视线恰好为光线的折射方向。

在使用 Hall 光透射模型时，注意如下的几点：

(1) 只有视点与光源在透明物体的两侧时，才能透过透明体看到透射高光。

(2) 光线射入和射出透明体，均会产生折射，我们通常不考虑第一次折射。

(3) 折射的临界角现象，当光线从高密度介质射向低密度介质，而且入射角大于临界角时，不再发生折射，而产生内部反射，这时的临界角为：

$$\theta_c = \arcsin \frac{\eta_2}{\eta_1} = \arcsin \eta$$

9. 4. 4 简单光反射透射模型

综合简单光照明模型, Whitted 光透射模型和 Hall 光透射模型, 可得简单光反射透射模型:

$$\begin{aligned} I = I_a K_a + \sum_i I_{pi} [K_{di} (L_i \cdot N) + K_{si} (H_{si} \cdot N)^{\eta_i}] \\ + \sum_j I_{pj} [K_{dt} (-N \cdot L_j) + K_{st} (N \cdot H_{tj})^{\eta_t}] + I_t K_t + I_s K_s \end{aligned}$$

上面的式子可以作为本章前面几节的一个很好的总结。

9. 5 纹理及纹理映射

用前面几节介绍的方法生成的物体图像, 由于其表面过于光滑和单调, 看起来反而不真实, 这是因为在现实世界中的物体, 其表面通常有它的表面细节, 即各种纹理, 如刨光的木材表面上有木纹, 建筑物墙壁上有装饰图案, 机器外壳表面有文字说明它的名称、型号等。它们是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, 例如桔子皮表面的皱纹。可以用纹理映射的方法给计算机生成的图像加上纹理。在本节中, 我们将介绍纹理的类型、纹理的定义方法以及纹理映射的一些原理。

9. 5. 1 纹理的概述

现实世界中的物体，其表面往往有各种表面细节。从根本上说，纹理是物体表面的细小结构，它可以是光滑表面的花纹、图案，是颜色纹理，这时的纹理一般都是二维图像纹理，还有三维纹理，纹理还可以是粗糙的表面(如桔子表面的皱纹)，它们被称为几何纹理，是基于物体表面的微观几何形状的表面纹理，一种最常用的几何纹理就是对物体表面的法向进行微小的扰动来表现物体表面的细节。纹理映射是把我们得到的纹理映射到三维物体的表面的技术。对于纹理映射，我们需要考虑以下三个问题：

(1) 考察简单光照明模型, 我们需要了解, 当物体上的什么属性被改变, 就可产生纹理的效果。我们先给出简单光照明模型的式子:

$$I = I_a K_a + K_d I_d (N \cdot L) + K_s I_s (N \cdot H)^n$$

通过改变的物体属性, 如漫反射系数、物体表面的法向量来改变物体的颜色, 得到纹理的效果。

(2) 在真实感图形学中, 我们可以用如下的两种方法来定义纹理:

图像纹理: 将二维纹理图案映射到三维物体表面, 绘制物体表面上一点时, 采用相应的纹理图案中相应点的颜色值。

函数纹理：用数学函数定义简单的二维纹理图案，如方格地毯。或用数学函数定义随机高度场，生成表面粗糙纹理即几何纹理。

(3) 在定义了纹理以后，我们还要处理如何对纹理进行映射的问题。对于二维图像纹理，就是如何建立纹理与三维物体之间的对应关系；而对于几何纹理，就是如何扰动法向量。

纹理一般定义在单位正方形区域($0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$)之上，称为纹理空间，理论上，定义在此空间上的任何函数可以作为纹理函数，而在实际上，往往采用一些特殊的函数，来模拟生活中常见的纹理。对于纹理空间的定义方法有许多种，下面是常用的几种：

- (1) 用参数曲面的参数域作为纹理空间 (二维)
- (2) 用辅助平面、圆柱、球定义纹理空间(二维)
- (3) 用三维直角坐标作为纹理空间(三维)

9. 6 整体光照明模型

前面介绍的简单光照明模型和局部光照明模型, 虽然可以产生物体的真实感图像, 但它们都只是处理光源直接照射物体表面的光强计算, 不能很好的模拟光的折射、反射等, 也不能用来表示物体间的相互光照明影响; 而基于简单光照明模型的光透射模型, 虽然可以模拟光的折射, 但是这种折射的

计算范围很小，不能很好的模拟多个透明体之间的复杂光照明现象。对于上述的这些问题，就必须要有有一个更精确的光照明模型，即整体光照明模型，它是相对于局部光照明模型而言的。在现有的整体光照明模型中，主要有光线跟踪和辐射度两种方法。

9.6.1 光线跟踪算法

光线跟踪算法是真实感图形学中的主要算法之一，该算法具有原理简单、实现方便和能够生成各种逼真的视觉效果等突出的优点。

1. 光线跟踪的基本原理

由光源发出的光到达物体表面后，产生反射和折射，简单光照明模型和光透射模型模拟了这两种现象。在简单光照明模型中，反射被分为理想漫反射和镜面反射光，在简单光透射模型把透射光分为理想漫透射光和规则透射光。由光源发出的光称为直接光，物体对直接光的反射或折射称为直接反射和直接折射，相对的，把物体表面间对光的反射和折射称为间接光，间接反射，间接折射。这些是光线在物体之间的传播方式，是光线跟踪算法的基础。

最基本的光线跟踪算法是跟踪镜面反射和折射。从光源发出的光遇到物体的表面，发生反射和折射，光就改变方向，沿着反射方向和折射方向继续

前进，直到遇到新的物体。但是光源发出光线，经反射与折射，只有很少部分可以进入人的眼睛。因此实际光线跟踪算法的跟踪方向与光传播的方向是相反的，而是视线跟踪。

在光线跟踪算法中，有如下的四种光线：视线是由视点与象素(x, y)发出的射线；阴影测试线是物体表面上点与光源的连线；以及反射光线与折射光线。

当光线 V 与物体表面交与点 P 时，光在点 P 对光线 V 方向的贡献分为三部分，把这三部分光强相加，就是该条光线 V 在 P 点处的总的光强：

(1) 由光源产生的直接的光线照射光强, 是交点处的局部光强, 可以

$$I = I_a K_a + \sum_i I_{p,i} [K_{ds} (L_i \cdot N) + K_s (H_{s,i} \cdot N)^{\alpha}] \\ + \sum_j I_{p,j} [K_{dt} (-N \cdot L_j) + K_t (N \cdot H_{t,j})^{\alpha}]$$

由下式计算:

(2) 反射方向上由其他物体引起的间接光照光强, 由 $I_s K'_s$ 计算, I_s 通过对反射光线的递归跟踪得到;

(3) 折射方向上由其他物体引起的间接光照光强, 由 $I_t K'_t$ 计算, I_t 通过对折射光线的递归跟踪得到。

场景中, 一个点光源 L , 两个透明的球体 $O1$ 与 $O2$, 一个不透明的物体 $O3$ 。从视点出发经过视屏一个像素点的视线 E 传播到达球体 $O1$, 与其交点为 $P1$ 。从 $P1$ 向光源 L 作一条阴影测试线 $S1$, 其间没有遮挡的物体, 那么用局部光照明模型计算光源对 $P1$ 在其视线 E 的方向上的光强, 作为该点的局部光强。同时跟踪该点处反射光线 $R1$ 和折射光线 $T1$, 它们也对 $P1$ 点的光强有贡献。在反射光线 $R1$ 方向上, 没有再与其他物体相交, 设该方向的光强为零, 并结束这光线方向的跟踪。然后跟踪 $T1$ 方向折射光线, 计算该光线的光强贡献。折射光线 $T1$ 在物体 $O1$ 内部传播, 与 $O1$ 相交于点 $P2$, 由于

该点在物体内部，假设它的局部光强为零，同时，产生了反射光线 R2 和折射光线 T2，在反射光线 R2 方向，继续递归跟踪计算它的光强，这里不再继续跟踪计算。继续对折射光线 T2 进行跟踪。T2 与物体 O3 交于点 P3，作 P3 与光源 L 的阴影测试线 S3，没有物体遮挡，计算该处的局部光强，由于该物体是非透明的，可以继续跟踪反射光线 R3 方向的光强，结合局部光强，来得到 P3 处的光强。反射光线 R3 的跟踪与前面的过程类似，算法可以递归的进行下去。重复上面的过程，直到光线满足跟踪终止条件。这样可以得到视屏上的一个像素点的光强，也就是它相应的颜色值。

通过上面光线跟踪算法的基本过程的例子，可以看出，光线跟踪算法实际上是光照明物理过程的近似逆过程，这一过程可以跟踪物体间的镜面反射光线和规则透射，模拟了理想表面的光的传播。

虽然在理想情况下，光线可以在物体之间进行无限的反射和折射，但是在实际的算法进行过程中，我们不可能进行无穷的光线跟踪，因而需要给出一些跟踪的终止条件。在算法应用的意义上，可以有以下几种终止条件：

(1) 该光线未碰到任何物体。

(2) 该光线碰到了背景。

(3) 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(小于某个设定值)。

(4) 光线反射或折射次数即跟踪深度大于一定值。

光线跟踪的方向与光传播的方向相反, 从视点出发, 对于视屏上的每一个象素点, 从视点作一条到该象素点的射线, 调用该算法函数就可以确定这个象素点的颜色。

9.6.2 辐射度方法

辐射度方法是继光线跟踪算法后，真实感图形绘制技术的一个重要进展。尽管光线跟踪算法成功地模拟了景物表面间的镜面反射、规则透射及阴影等整体光照效果，但由于光线跟踪算法的采样特性，和局部光照模型的不完善性，该方法难于模拟景物表面之间的多重漫反射效果，因而不能反映色彩渗透现象。

1984 年，美国 Cornell 大学和日本广岛大学的学者分别将热辐射工程中的辐射度方法引入到计算机图形学中，用辐射度方法成功地模拟了理想漫反射表面间的多重漫反射效果。经过十多年的发展，辐射度方法模拟的场景越来越复杂，图形效果越来越真实。与前几章介绍的光照模型与绘制方法有所

不同，辐射度方法基于物理学的能量平衡原理，采用数值求解技术来近似每一个景物表面的辐射度分布。由于场景中，景物表面的辐射度分布与视点选取无关，辐射度方法是一个视点独立(View independent)的算法,使之可广泛应用于虚拟环境的漫游(walkthrough)系统中。本章的压题彩图就是由辐射度方法绘制出来的。这里限于篇幅和教学的深度，不再详细介绍该方法，有兴趣的读者可以查阅相关的文献。

在我们的“真实感图形学”程序中，我们利用经纬区域划分算法绘制球体，并进行消隐；建立基于颜色缓冲区和深度缓冲区的直线基元和三角形基元，颜色缓冲区的引入将丰富三维物体的绘制，实现物体与物体之间的融合

效果、全局场景抗锯齿、景深模拟等效果。利用 `z_buffer` 的消隐算法实现场景的消隐处理。

9.7 真实感图形学编程案例

一、程序设计功能说明

利用上述基本原理编制的“真实感图形学”应用程序，包括消隐绘制几何球体类、颜色模型类、光照模型类、材质类、基于颜色缓冲区和深度缓冲区的直线基元和三角形基元类、基于 `z-buffer` 算法的场景深度消隐类等。绘制如图 9-8 所示，泛光灯和聚光灯照射下左边为光照线框球体、中间为光照刻球体、最右边为光滑光照球体，。

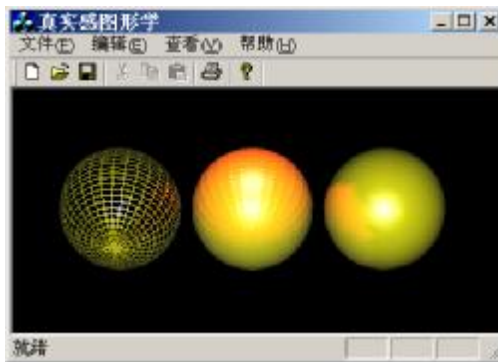


图 9-8

二、程序设计步骤

1. 创建单文档应用程序框架
2. 添加消息处理函数

利用 ClassWizard（建立类向导）为应用程序添加相关的消息处理函数，

ClassName 和 object IDs 栏中选择都选择 CMyView, Messages 栏中选择 WM_CREATE 添加消息映射函数, 接受默认消息处理函数命名。

3. 添加基类

在工程中单击【文件】|【新建】, 在弹出的新建对话框中, 分别选择 C/C++ Header File 和 C++ Source File, 在【文件】名称输入栏中输入依次输入各基类名称 “Bline、Brender、Btriangle、ColorBuffer、Edge、Facet、FloatColor、Lighting、LightObj、Material、Matrix3d、Object3d、Sphere、SubObject3d、TypedStack、Vector3d、Vertex3d、ViewFinder、Zbuffer” 以及 Grphcs、Img 头文件; 在工作区中系统自动创建的相应的空文件中, 分别添

加以下此基类的头文件（.h 文件）和应用文件(.cpp 文件）。

4. 添加相应代码

//CBlind（直线）类

// BLine.h: interface for the CBlind class. //CBlind（直线）类头文件

[程序代码见纸书](#)

}

代码说明:

1. 由于篇幅所限，以上代码只是整个程序中的一部分，详细请参照光盘
“真实感图形学”

2. 只要给定两个端点和对应颜色, 可绘制一条直线。基于颜色深度缓冲器和深度缓冲器的直线基元不再将绘制直线的工作直接与设备描述表和内存位图相链接, 而是通过颜色缓冲区来记录扫描转换后的像素颜色。上面的 `CBline` 类和 `Ctriangle` 类为基于光栅系统的直线和三角形基元。在扫描转换三角形时, 需要单独处理边界和内点。用 `Bresenham` 算法来扫描转换边界, 并采用使用算法获取扫描点的颜色和深度。对三角形内点, 则通过边界点的颜色和深度利用增量法来进行计算, 这里双线插值法同时应用于颜色和深度的计算。

2. 程序中基于颜色缓冲区和深度缓冲区建立的 `CPRender` 消隐工具, 具

有以下特征：场景经过光栅化所获得的任何基片都要进行处理，我们来自与规格化坐标系中的 z 值的场景中的深度信息对图形的绘制和显示起决定性作用。利用 `z_buffer` 算法，场景通过边和三角形的形式经过扫描转换的结果就是最后的图形信息。

3. 三维物体是多种多样的，任何一个三维图形设计系统都需要立方体、球体、圆锥、圆环面等这些最基本的三维形体。

4. 几何拓扑绘制球体，这里采用经纬度的地理划分法将一个球体划分为若干个小区域，这些区域常称为经纬区域，一般两极区域用三角形小面来逼近，其它区域用四边形小面来逼近，地理划分法一般是从北向南递增，北极

点的纬度为 0 度，南极点纬度为 180 度，将球细化来描述求得几何拓扑。

定义顶点：北极点的序号为 0，然后从 Y 轴正向开始，按逆时针防线计算序号递增的顶点，最后的顶点为南极点。

定义边：从北极、Y 轴正方向开始，逆时针方向逐个定义每条经边。

定义小面：从北极、Y 轴正方向开始，逆时针方向逐个定义每条纬度带上的小面，小面顶点排列顺序一小面的发现指向球的外部为基准。以此方法得到球的几何模型，中心位于世界坐标原点。

9.8 课 后 练 习

1. 解释真实感图形学中模拟现实世界场景的基本过程。
2. 在颜色视觉中是如何唯一确定某颜色的三原色混合比例的?
3. 介绍常用的颜色模型。
4. 编写用 Phong 光照明模型生成的小球真实感图形的程序。
5. 介绍增量式光照明模型的基本思想。
- 6 编写用双线性光强插值(Phong)与双线性法向插值(Ground)方法显示一个圆柱体的真实感图形的程序, 并对显示的结果进行比较。

7. 解释局部光照明模型对物体光照现象模拟的合理性与普遍性。