

1 光照与着色

1.1 材质与着色

我们已经学习了如何在计算机中储存和表示三维物体。然而，现实中的物体除几何属性外，还存在**材质 (Material)** 属性。材质决定了物体表面对光的反射和吸收特性，从而影响我们最终看到的物体的颜色，纹理等视觉信息。在计算机图形学中，为几何体的表面加上材质的过程称为**着色 (Shading)**。

定义 1.1 材质与着色

材质 (Material) 是物体表面的光学属性，决定物体如何与光相互作用，也即决定物体呈现的视觉效果。
着色 (Shading) 是绘制几何体表面的颜色使得它的视觉效果符合设定材质的过程。

1.2 光照

1.2.1 光源

按照光源发出光线的不同，光源可以分为以下几类。

- (1) **点光源 (Point Light Source)**: 点光源在空间中可以看作一个无大小的点，从该点向各个方向均匀发射光线。点光源的光强度 I 只与距离有关，并且正比于 $1/r^2$ ，而与方向无关。
- (2) **平行光源 (Directional Light Source)**: 平行光源发出的光线在空间中是平行的。平行光源的光强度 I 与距离无关，但与接受平面与光线方向的夹角 θ 有关，即 $I_{\text{eff}} = I \cos \theta$ 。
- (3) **环境光 (Ambient Light Source)**: 环境光源表示来自环境中各个方向的漫反射光线的总和，可以认为在空间中均匀分布，因此其光强度 I 与距离和方向均无关。

1.2.2 反射

与研究光照类似，我们先考虑简单情况下的反射规律。

漫反射 当物体表面粗糙不平时，入射到表面的光线会被反射到各个方向，称为**漫反射 (Diffuse Reflection)**。

定义 1.2 漫反射与朗博体

漫反射 (Diffuse Reflection) 是指入射光线被物体表面反射到各个方向的现象。
朗博体 (Lambertian Surface) 是表面只有完全随机的漫反射的物体。

对于朗博体的漫反射而言，我们有如下简单的公式以计算其反射的光强：

$$L_d = k_a I_a + k_d \left(I_d + \frac{I_p}{r^2} \right) \max(\cos \theta, 0)$$

其中 L_d 表示漫反射后的光强 (下标 d 意为 diffuse, 表示漫反射), k_a 和 k_d 分别是物体对环境光的反射率和物体表面的漫反射率. 简单而言¹, k_a 和 k_d 越小, 物体表面吸收的光越多, 反射光强 L_d 也越小, 物体就越暗; 反之物体就越亮. I_a, I_d 和 I_p 分别表示环境光, 平行光和点光源强度, r 表示点光源到物体的距离.

上述式子中的角度 θ 表示物体指向光源的单位向量 \mathbf{l} 和物体表面的单位法向量 \mathbf{n} 的夹角, 因此式子中的 $\cos \theta$ 可以替换为 $\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}$. 注意, 当 $\theta > \pi/2$ 时, 光线入射到物体的背面, 此时物体并不接受光照, 因此我们取 $\max(\cos \theta, 0)$ 以舍弃此种情形.

镜面反射 当物体表面光滑时, 入射到表面的光线会按照一定的规律被反射, 称为**镜面反射 (Specular Reflection)**.

定义 1.3 镜面反射 镜面反射 (Specular Reflection) 是指入射光线按照反射定律被反射的现象.

一般而言, 由于物体表面并不能完全光滑, 镜面反射并不总是完全符合反射定律, 而是分布于镜面反射光线 \mathbf{r} 附近. 如果物体表面指向观察者的方向为 \mathbf{v} , 那么应当有 \mathbf{v} 与 \mathbf{r} 的夹角越小, 反射光强越大. 这样, 我们可以写出镜面反射的光强计算公式:

$$L_s = k_s \left(I_d + \frac{I_p}{r^2} \right) \max(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}, 0)^\alpha$$

其中 L_s 表示镜面反射后的光强 (下标 s 意为 specular, 表示镜面反射), k_s 是物体表面的镜面反射率. α 是镜面反射指数, α 越大, 视线远离镜面反射方向时光强衰减地越快, 高光区域越集中, 反之则越分散. 理想镜面反射光线 \mathbf{r} 可由

$$\mathbf{r} = 2(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} - \mathbf{l}$$

给出.

除去这种办法之外, 人们提出了一种巧妙的计算方法: 定义半程向量

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{l} + \mathbf{v}}{\|\mathbf{l} + \mathbf{v}\|}$$

表示光源方向 \mathbf{l} 与观察方向 \mathbf{v} 的角平分线方向. 观察方向 \mathbf{v} 越接近 \mathbf{r} , 半程向量 \mathbf{h} 就越接近法线 \mathbf{n} , 因此可以将上式改写为

$$L_s = k_s \left(I_d + \frac{I_p}{r^2} \right) \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}, 0)^\beta$$

其中 β 也是镜面反射指数.

¹ 物体表面的颜色也会影响对各种波长的光的反射率, 不过也可以逐颜色分量地应用上述公式, 因此通常使用的 k 包含 RGB 三个分量. 此时, 如果光源的 RGB 分量表示为向量 \mathbf{I} , 反射率表示为向量 \mathbf{k} , 那么最终的反射光颜色可以表示为

$$\mathbf{I} \circ \mathbf{k}$$

其中 \circ 表示向量逐分量相乘. 因此, 上述公式在各个颜色分量不同时可以写成

$$\mathbf{L}_d = \mathbf{k}_a \circ \mathbf{I}_a + \mathbf{k}_d \circ \left(\mathbf{I}_d + \frac{\mathbf{I}_p}{r^2} \right) \max(\cos \theta, 0)$$

在下面的镜面反射的公式中也类似.

Phong 光照模型和 Blinn-Phong 光照模型 把前述的漫反射和镜面反射结合起来, 我们就得到了常用的光照模型.

定义 1.4 Phong 光照模型 Phong 光照模型 (Phong Reflection Model) 结合了漫反射和镜面反射, 其光强计算公式为:

$$L = k_a I_a + k_d \left(I_d + \frac{I_p}{r^2} \right) \max(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}, 0) + k_s \left(I_d + \frac{I_p}{r^2} \right) \max(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}, 0)^\alpha$$

定义 1.5 Blinn-Phong 光照模型 Blinn-Phong 光照模型 (Blinn-Phong Reflection Model) 是 Phong 光照模型的变种, 其光强计算公式为:

$$L = k_a I_a + k_d \left(I_d + \frac{I_p}{r^2} \right) \max(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}, 0) + k_s \left(I_d + \frac{I_p}{r^2} \right) \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}, 0)^\beta$$

可以看出, 两者的区别仅在于镜面反射部分. Blinn-Phong 模型使用了半程向量 \mathbf{h} , 这在高光表现的效果上更平滑自然, 因而更多地被使用.

1.3 渲染的光栅化

与二维图形一样, 我们可以通过**光栅化**将虚拟的几何与材质转化为像素. 这主要包含两个问题: 确定像素对应的三维位置 (也即正确处理遮挡关系), 以及确定该像素的颜色.

1.3.1 深度缓存

画家算法 为了确定物体的前后关系, 最初想到的办法是给每个形状/物体一个额外的深度属性 z , 然后对所有形状的深度排序, 按照 z 从大到小 (即从远到近) 的顺序进行绘制. 这和画家的绘画方法类似.

定义 1.6 画家算法 上述过程称作画家算法 (Painter's Algorithm).

然而, 真实世界中物体各处的深度值可能并不相同, 因此可能出现复杂的遮挡关系, 使得画家算法难以实现.

深度缓存 为了解决这个问题, 我们不妨转换思路, 由记录每个物体的深度转为记录每个像素的深度值, 所有像素的深度值构成**深度缓存 (Depth Buffer)**. 每个图形各处的深度值也不是固定的. 在绘制时, 我们对每个像素独立检测, 如果发现等待绘制的图形上的深度小于当前像素的深度, 则覆盖当前像素的颜色和深度值, 否则表示图形在此处被遮挡, 不更新像素.

定义 1.7 上述过程称作**深度缓存 (Depth Buffer)** 算法。

深度缓存技术可以处理更复杂的情况, 并且只需要维护所有像素的缓存, 是一种更高效的办法。

然而, 深度缓存技术对于半透明物体的处理并不理想, 因为半透明物体叠加后的颜色仍密切取决于此处各物体的前后关系. 因此, 通常在这些地方仍然需要使用画家算法。

1.3.2 着色模型

我们现在考虑第二个问题: 确定像素的颜色. 这可以用各种着色模型来实现. 下面给出几种常见的着色模型。

平面着色 最简单而直接的办法就是使用网格的每个面的法向量进行光照计算, 并为整个面赋予同样的颜色。

定义 1.8 平面着色 上述过程称作**平面着色 (Flat Shading)**。

在平面着色中, 每个面只有一个法向, 因而只有一个颜色, 于是我们能在渲染结果里看到很多独立而不连续的面片, 但是我们还是可以直观看到整个形状上明暗的过渡以及高光. 如果要得到比较平滑的结果, 就需要更精细的网格. 为了解决这一问题, 人们提出了许多其它的着色模型。

Gouraud 着色 与平面着色不同, 我们可以根据每个顶点的法向量进行光照计算, 并为顶点赋予颜色. 然后在渲染时, 通过重心插值等插值方法得出三角形面片内部各点的颜色。

定义 1.9 Gouraud 着色 上述过程称作 **Gouraud 着色 (Gouraud Shading)**。

Gouraud 着色在曲面的大部分区域里都可以得到光滑的颜色过渡, 但是在高光区域我们能明显看到三角形插值的痕迹. 这是因为在高光区域附近, 颜色变化随着法向量变化比较明显, 并且这不是线性关系 (例如, 如果高光中心在三角形面片的中心, 而顶点处颜色较暗, 显然不能通过插值表现出中心更亮的颜色)。

Phong 着色² 为了克服 Gouraud 着色在高光区域的不足, 我们可以直接在三角形面片的**每个像素**处计算法向量, 并根据该法向量计算颜色。

定义 1.10 Phong 着色 上述过程称作 **Phong 着色 (Phong Shading)**。

1.4 风格化渲染

应用于不同场景的渲染并不一定追求真实感, 有时希望突出/隐去一些细节或展现特定的艺术风格. 这类渲染称为**风格化渲染 (Stylized Rendering)** 或**非真实感渲染 (Non-photorealistic Rendering, NPR)**。

²注意与前面的 Blinn-Phong 反射模型加以区分. 两者分别是反射模型和着色模型, 并没有直接联系。

简单而言, 风格化渲染中比较重要的两个特征分别是**线**和**风格化的着色模型**. 我们现在分别介绍这两种特征相关的处理方法.

1.4.1 轮廓线提取

物体的轮廓线对描述物体的信息非常重要. 在风格化渲染中通常会对轮廓线进行特殊处理.

定理 1.11 轮廓线的提取方法 I 物体的边缘位置的发现 \mathbf{n} 应当与视线方向 \mathbf{v} 近似地垂直, 因此我们可以判断物体上所有满足 $|\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}| < \varepsilon$ 的点, 这些点就可以视作物体的轮廓线.

上述办法依赖于 ε 的设定, 并且得到的边缘并不一定粗细均匀. 由此, 我们还有另一种办法.

定理 1.12 轮廓线的提取办法 II 我们绘制两遍几何体. 第一遍只绘制背面, 并且绘制的颜色为轮廓线的颜色, 同时将几何体向外扩展一些; 第二遍再在背面上绘制正面的几何体, 如此, 没有被遮挡的部分就是轮廓线. 这种办法又被称作**程序化几何法**.

使用上述办法时, 需要注意向外扩展的实现办法, 也就是将顶点沿它的法向移动一定距离, 并且这段距离在屏幕上最终呈现的长度是固定的, 因此这需要考虑投影变换带来的影响; 此外, 绘制正面的几何体时, 需要使用深度缓存, 否则可能丢失部分轮廓线.

1.4.2 风格化着色模型示例——Gooch 着色

除去用光影表现物体的形状, 我们还可以使用颜色的冷暖变化来表现物体的形状. 一种常见的风格化着色模型是 **Gooch 着色 (Gooch Shading)**.

定义 1.13 Gooch 着色 取定冷色 k_c 和暖色 k_w , 物体上各点的颜色通过插值得到:

$$k = \left(\frac{1 + \mathbf{l} \cdot \mathbf{n}}{2} \right) k_c + \left(\frac{1 - \mathbf{l} \cdot \mathbf{n}}{2} \right) k_w$$

其中 \mathbf{l} 是物体上的点指向光源的方向, \mathbf{n} 是该点表面发现的方向.