# GPU Gems

## Chapter 14. Advanced Techniques for Realistic Real-Time Skin Rendering

## 14.1 The Appearance of Skin

皮肤的渲染一直是一个难题，主要因为有以下两个原因：1、皮肤上拥有许多不易察觉的视觉特征；2、人的观感对皮肤整体，特别是脸部极其的敏感。这些数量庞大的细节使得人类的皮肤渲染至今仍然是一个障碍。一个真实的皮肤模型必须包括皱纹、毛孔、雀斑、毛囊、伤疤等特征。幸运的是，现代的3D扫描技术使得我们能够捕捉人脸的高层次细节。但是，简单的（天真的）渲染会呈现一个不真实、僵硬、看起来很干燥的视觉效果。就如（a）图。出现这个的原因主要是因为次表面散射（subsurface scattering）。次表面散射是指光线穿过皮肤表面，进入皮肤下层进行散射并且部分被吸收，最后从另外某个地方射出的过程。皮肤实际上是稍微有些透明的，这个微妙的但是重要的效果使得皮肤能呈现一个柔和的视觉效果，并且使得渲染效果更为真实，就像（b）图所示。



*比较两张皮肤的渲染效果图：*

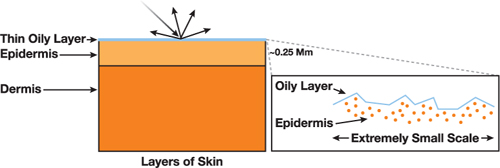
*对于大多数材质来说，光线的反射通常会分成两个部分，并且这两个部分互相独立：*

1. *表面反射，通常用一个简单的镜面（specular）反射计算；*
2. *次表面散射，通常用一个简单的漫反射（diffuse）计算。*

*但是，两个部分都需要更加高等的模型来生成真实的皮肤图像。如果没有精确的镜面反射和次表面散射，即使使用高细节的漫反射、镜面反射和法线贴图也不能使皮肤看起来真实。*

#### 14.1.1 Skin Surface Reflectance

小部分的光线射到皮肤表面会直接进行反射（大约为6%）。这是因为在皮肤表面比较粗糙并且附有油脂，所以产生了菲涅尔反射。菲涅尔反射是指在真实世界中，除了金属之外，其它物质均有不同程度的“菲涅尔效应”。视线垂直于表面时，反射较弱，而当视线非垂直表面时，夹角越小，反射越明显。如果你看向一个圆球，那圆球中心的反射较弱，靠近边缘较强。不过这种过度关系被折射率影响。因此我们可以用一个镜面反射函数来对其进行建模。我们可以用一个多层皮肤模型来描述它：

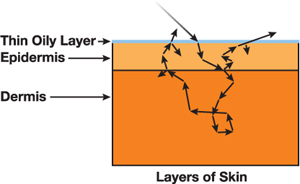


光线直接从油层和外表皮反射离开皮肤表面，不进入皮肤，自然也不会有散射。这反射不是完全的镜面反射，因为皮肤是一个精密刻度的粗糙表面，造成了一个单一入射角会反射为一个范围的出射角的现象。我们可以通过粗糙度（roughness）加之镜面的双向反射分布函数（bidirectional reflectance distribution function，BRDF）来描述。

#### 14.1.2 Skin Subsurface Reflectance

所有那些不会直接在皮肤表面反射的光线都会进入次表面层。光在次表面层的散射和吸收给予了皮肤颜色和柔和的视觉效果。光进入这些次表面层时，皮肤因为吸收了部分光而获得了颜色，但是更多的是进行散射，然后从以进入点为中心的一个3D邻域返回射出。有时候光会穿过整个皮肤区域，就像耳朵。一个真实的皮肤模型必须模拟这个散射的过程；之前的（a）图出现的僵硬、干燥的样子就是因为无视了散射的过程，光只能从入射光线接触表面的位置出射。

进一步复杂化这个过程，多层级皮肤事实上是以不同的方式吸收和散射光的，就如下图所示：



图形学家门通过一个多达5层的高细节模型来描述皮肤中的散射结果，真实的皮肤甚至更加复杂。医学上认为皮肤外表面包含5个不同的层，在这种复杂的条件下来模型光在皮肤里的散射可能是过度的，但是在真实渲染中至少需要2层来负责实现镜面反射。

## 14.3 Specular Surface Reflectance

Phong镜面反射模型在实时计算机图形学中几乎是普遍存在的，但是，使用一个更加精确的基于物理表面反射模型可以提升成像的质量，且仅仅只需要一点额外的着色器指令。Phong模型不能捕捉到在掠射角时的镜面反射光，而且它也没有遵循真实的物理规律（出射光的能量可能大于其收到的能量）。下图展现了Phong模型和PBR的比较：



#### 14.3.1 Implementing a Physically Based Specular Reflectance Model for Skin

#### Rendering with a BRDF

大多数specular BRDF模型直接用解析函数来计算片元着色器，用这些解析函数来描述光的反射。这些模型往往是由几项组成，如菲涅尔（Fresnel）、几何衰减项（Geometric attenuation term）、各种参数。

这些BRDF解析函数通常有一个常量rho\_s来表示强度。其他常见的输入有表面的法向量N，视线方向向量V，光线方向向量L，物体的折射率eta，粗糙度参数m。因此，总的镜面反射光公式：

specularLight += lightColor[i] \* lightShadow[i] \* rho\_s \*

specBRDF( N, V, L[i], eta, m) \* saturate( dot( N, L[i] ) );

因为BRDF的定义，除了计算BRDF本身外，还需要计算点乘（N，L[i]）项。同时，还会给每个光源增加一个距离衰减项去根据与光源的距离降低入射光的强度。这个代码同时适用于可以计算L向量和阴影的点光源、平行光源和聚光灯。粗糙表面的镜面反射是由环境贴图光源或区域光反射造成的，这种反射非常复杂，计算起来非常昂贵，我们没有把它们纳入我们的皮肤渲染系统。

#### Fresnel Reflectance for Rendering Skin

所有基于物理的specular BRDF模型包含一个Fresnel项，通常不会进行详细的解释。这应该是一个非偏振的介电质菲涅尔反射函数，其F0参数为0.028。这来自于比尔定律，且假设皮肤的折射率为1.4。