9.9 次表面散射BRDF模型

在上一节中,我们讨论了表面或镜面反射.在本节中，我们将讨论问题的另一面，即表面下折射的光会发生什么。 正如我们在9.1.4节中讨论的那样，这种光经历了散射和吸收的某种结合，并且一部分光被重新发射出原始表面。 在这里，我**们将重点介绍不透明电介质中局部次表面散射或漫反射表面响应的BRDF模型**。 金属是无关紧要的，因为它们没有任何明显的地下光相互作用.第14章将介绍**透明或呈现整体地下散射的介电材料**.

我们将以漫反射颜色的属性以及该颜色在实际材料中可能具有的值的部分开始对漫射模型的讨论.在以下小节中,我们解释了表面粗糙度对漫反射着色的影响,以及为给定材料选择是使用光滑表面还是粗糙表面着色模型的标准.最后两个小节专门介绍光滑表面和粗糙表面模型本身.

9.9.1 次表面反照率

不透明电介质的次表面反照率是逃逸到表面的光的能量与进入材料内部的光的能量之比.的值介于0(吸收所有光)和1(不吸收光)之间,并且可能取决于波长,因此被建模为用于渲染的RGB矢量.为了创作,通常被称为表面的漫反射颜色，正入射菲涅尔反射率通常被称为镜面反射颜色.次表面反照率与第14.1节中讨论的散射反照率密切相关.

由于电介质会透射大多数入射光,而不是在表面反射,因此,次表面反照率通常更亮，因此在视觉上比镜面反射色更重要.由于它是由与镜面反射颜色不同的物理过程产生的-内部吸收而不是表面的菲涅耳反射率-通常具有与不同的光谱分布(因此是RGB颜色).例如,有色塑料是由透明,透明的基材组成,其内部嵌入了颜料颗粒.镜面反射的光将不着色,而漫反射的光将被颜料颗粒吸收而变色.例如,一个红色的塑料球有一个白色的高光.

可以认为次表面反照率是吸收和散射之间的“竞争”的结果-在光有机会从物体散射回来之前,光会被吸收吗？这就是为什么液体上的泡沫比液体本身明亮得多的原因.发泡过程不会改变液体的吸收率,但是添加大量的气液界面会大大增加散射量.这导致大多数入射光在被吸收之前就被散射了,从而导致了较高的次表面反照率和明亮的外观.新鲜雪是反照率高的物质的另一个例子.雪颗粒和空气之间的界面中存在相当大的散射,但吸收很少,导致整个可见光谱范围内的地下反照率等于或大于0.8。白色涂料略少,约为0.7。日常生活中遇到的许多物质，例如混凝土，石材和土壤，平均含量在0.15至0.4之间。煤是次表面反照率极低（接近0.0）的一种材料.

许多材料在潮湿时变暗的过程与液体泡沫示例相反。如果材料是多孔的，则水会渗透到以前充满空气的空间中。介电材料的折射率比水离空气更近。相对折射率的这种减小减小了材料内部的散射，并且光在逃逸材料之前传播了更长的距离（平均）。这种变化导致更多的光被吸收，地下反照率变暗[**821**]。

这是一个常见的误解(即使反映在备受赞誉的材料编写指南中[1163]),对于真实的材料,的值绝不应低于约0.015–0.03(8位非线性sRGB编码为30–50)的下限.创作。 但是，该下限基于包括表面（镜面反射）和次表面（漫反射）反射率的颜色测量，因此过高。 实际材料可以具有较低的值。例如，“OSHA黑色”油漆标准[524]的联邦规范的Y值为0.35（满分100）。 给定测量条件和表面光泽度，此Y对应于大约0.0035的值（在8位非线性sRGB编码中为11）。

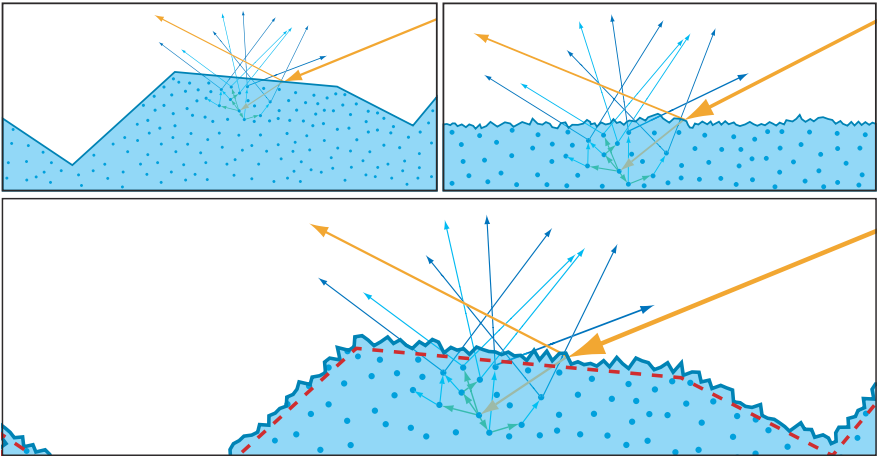
从实际表面获取的光点值或纹理时，重要的是要分离出镜面反射率.可以通过谨慎使用受控照明和偏振滤镜来完成此提取[251,952].为了获得准确的颜色,还应该执行校准[1153].

并非每个RGB三元组都代表的合理值（甚至在物理上可能）.反射光谱比发射光谱功率分布更受限制：对于任何波长,它们都永远不能超过1的值,且它们通常非常平滑.这些限制定义了色彩空间中的体积,其中包含的所有合理RGB值。 即使相对较小的sRGB色域也包含超出此体积的颜色，因此在设置的值时必须注意避免指定不自然的饱和和明亮的颜色.除了降低逼真度外，在预先计算全局照明时,此类颜色还会导致过高的二次反射（第11.5.1节）.Meng等人[**1199**]的2015年论文是该主题的很好参考.

9.9.2 次表面散射的大小和粗糙度

一些用于局部次表面散射的BRDF模型考虑了表面粗糙度(通常是通过使用具有微面漫反射BRDF 的微面理论),而有些则没有.尽管这是一个普遍的误解，但使用哪种类型的模型的决定因素并不只是表面的粗糙度如何.正确的决定因素与表面不规则性的相对大小和次表面散射距离有关.

参见图9.40.如果微观几何形状的不规则度大于次表面散射距离(图的左上角),则次表面散射将表现出与微观几何形状相关的效应,例如回射（331页图9.29）.对于此类表面,应使用粗糙表面漫射模型.如上所述,此类模型通常基于微面理论,将次表面散射视为每个微面的局部,因此仅影响微BRDF .



**图9.40** 具有相似NDF的三个表面，但微观几何尺度与次表面散射距离之间的关系不同。 在左上方，次表面散射距离小于表面不规则度。 在右上角，散射距离大于表面不规则性。 下图显示了具有多个尺度粗糙度的微表面。 红色虚线表示仅包含大于次表面散射距离的微观结构的有效表面.

如果散射距离都大于不规则性（图9.40的右上角），则应将表面视为平坦的,以模拟次表面散射,并且不会发生诸如回射的影响.次表面散射不是微面局部的,因此无法通过微面理论进行建模.在这种情况下,应使用光滑表面的满反射模型.

在中间表面粗糙度大于或小于散射距离的中间情况下，应使用粗糙表面漫射模型，但有效表面仅包含大于散射距离的不规则性.漫反射和镜面反射率都可以使用微面理论进行建模,但粗糙度值不同.镜面反射项将使用基于实际表面粗糙度的值,而漫反射项将使用基于有效表面粗糙度的值较低的值.

观察范围也与之相关,因为它决定了“微观几何”的定义.例如,月亮通常被认为是应该使用粗糙表面漫射模型的情况，因为它表现出明显的逆向反射.当我们从地球上看月球时,观察范围是如此之大,以至于五英尺的巨石也是“微几何形状”.因此,我们观察到粗糙的表面漫射效应（例如回射）就不足为奇了.

9.9.3 光滑表面次表面模型

在这里，我们将讨论光滑表面次表面模型.这些适用于对表面不规则度小于次表面散射距离的材料进行建模.此类材料的表面粗糙度不会直接影响漫反射着色.如果将漫反射项和镜面项耦合在一起(本节中的某些模型就是这种情况),则表面粗糙度可能会间接影响漫反射着色.

如第9.3节所述，实时渲染应用程序通常使用Lambertian项对局部次表面散射进行建模.在这种情况下,BRDF漫反射项等于除以:

Lambertian模型无法说明表面反射的光不可用于地下散射的事实.为了改进此模型,应该在表面(镜面)和次表面(漫反射)项之间进行能量折衷.菲涅耳效应表明,这种表面-地下能量的权衡随着入射光角的变化而变化.随着掠射角的掠过程度的增加,漫反射率随着镜面反射率的增加而降低.解决这种平衡的一种基本方法是将漫反射项乘以镜面反射项的菲涅耳部分减一[].如果镜面项是平面镜的镜面项,则得到的漫射项是

如果镜面反射项是微面BRDF项，则得到的漫射项是

公式9.62和9.63导致出射光的均匀分布,因为BRDF值不依赖于出射方向v.这种行为是有道理的,因为光在重新发出之前通常会经历多次散射事件,因此其出射方向将被随机化.但是,有两个原因怀疑出射光不能完全均匀地分布.首先,由于公式9.62中的漫射BRDF项随入射方向而变化,因此亥姆霍兹互易性意味着它也必须随出射方向而变化.其次,光线在出射时必须经过折射,这会在出射光线上施加一些方向性的偏爱.

Shirley等人提出了平坦表面的耦合扩散项,解决了菲涅耳效应和表面-地下反射率的权衡问题，同时支持了节能和亥姆霍兹互易性[1627].该推导假定将Schlick近似[1568]（方程9.16）用于菲涅耳反射率:

公式9.64仅适用于镜面反射率为理想菲涅尔镜的表面.Ashikhmin和Shirley[**77**]提出了可用于计算互惠的，节能的扩散项以与任何镜面项耦合的通用版本,而Kelemen和Szirmay-Kalos [**878**]进一步完善了该版本:

在此,是镜面反射项的定向反照率(第9.3节)，是其在半球上的余弦加权平均值.可以使用公式9.8或9.9预先计算值并将其存储在查找表中.平均值的计算方式与我们之前遇到的相似平均值:(公式9.57)相同.

公式9.65中的形式与公式9.56有一些明显的相似之处,这并不奇怪,因为Imageworks多次镜面反射项是从Kelemen-Szirmay-Kalos耦合扩散项导出的.但是,有一个重要的区别.在这里,我们使用代替,是包括菲涅耳的完整镜面BRDF项的定向反照率,并且如果使用了多次反射镜面项,也将使用.由于该差异不仅取决于粗糙度和仰角,而且还取决于菲涅耳反射率，因此该差异增加了的查找表的维度.

在Imageworks的Kelemen-Szirmay-Kalos耦合扩散项的实现中,他们使用三维查找表,其中折射率为第三轴[**947**].他们发现,在积分中包含多次反射项使比更平滑,因此16×16×16的表格就足够了.结果如图9.41所示.

如果BRDF使用Schlick菲涅耳近似,并且不包含多次反射镜面项,则的值可以从积分中分解出来.这样做使我们可以为使用二维表,在每个条目中存储两个数量,而不是由Karis [**861**]讨论的三维表.另外，Lazarov [**999**]提出了一个适合的解析函数,类似地将从积分中分解出来以简化拟合函数.Karis和Lazarov都将镜面定向反照率用于与基于图像的照明有关的不同目的。有关该技术的更多详细信息，请参见第10.5.2节.如果这两种技术都在同一应用程序中实现,则可以对两者使用相同的表查找,从而提高了效率.

通过考虑表面(镜面)和次表面(扩散)项之间的节能影响来开发这些模型.其他模型是根据物理原理开发的。 这些模型中的许多模型都依赖于Subrahmanyan Chandrasekhar（1910–1995）的工作，他为半无限的各向同性散射体积开发了BRDF模型。 正如Kulla和Conty [**947**]所证明的，如果平均自由程足够短，则该BRDF模型是任意形状的散射体积的完美匹配。 Chandrasekhar BRDF可以在他的书中找到[**253**]，尽管在Dupuy等人[397]的论文的等式30和31中可以找到使用熟悉的表示法的更易于访问的形式.

由于Chandrasekhar BRDF不包含折射,因此只能用于对折射率匹配的表面建模.这些表面的折射率在两侧都是相同的,如第304页的图9.11所示。要对非折射率匹配的表面建模，必须修改BRDF以解决光线进入和离开表面的折射问题.这种修改是Hanrahan和Krueger[**662**]和Wolff [**1898**]的工作重点.

9.9.4 粗糙表面的次表面模型

作为迪士尼原则上的着色模型的一部分,Burley[214]包含一个漫射BRDF项,旨在包括粗糙度影响和匹配测量材料:

其中

是镜面粗糙度.在各向异性的情况下,使用和之间的中间值.该方程式通常被称为迪士尼漫反射模型.

次表面项受Hanrahan-Krueger BRDF [**662**]的启发,旨在廉价替代远距离物体上的整体表面项散射.漫反射模型根据用户控制的参数在和粗糙扩散项之间混合.

迪士尼漫射模型已用于电影[214]和游戏[960]（尽管没有地下术语）。完整的迪士尼漫反射BRDF还包括光泽项，该项主要用于对织物进行建模,但也有助于补偿由于缺少多次反射镜面反射项而导致的能量损失.迪士尼光泽术语将在第9.10节中讨论。数年后，Burley提出[**215**]一种旨在与整体地下散射渲染技术集成的更新模型。

由于迪士尼漫反射模型使用与镜面BRDF项相同的粗糙度，因此可能难以建模某些材料。参见图9.40。但是，使用单独的漫反射粗糙度值将是不重要的修改.

大多数其他粗糙表面漫反射BRDF都是使用微面理论开发的，其中NDF D，micro-BRDF 和遮蔽阴影函数具有各种不同的选择.这些模型中最著名的是Oren和Nayar[**1337**]提出的.Oren-Nayar BRDF使用Lambertian微型BRDF，球形高斯NDF和Torrance-Sparrow“ V型腔”遮罩阴影功能. BRDF的完整形式模拟一次弹跳. Oren和Nayar在他们的论文中还包括一个简化的“定性”模型.多年来,已经提出了对Oren-Nayar模型的一些改进,包括优化[**573**],进行调整以使“定性”模型更类似于完整模型而不增加成本[**504**],以及将微型BRDF更改为更精确的平滑表面漫反射模型[**574,1899**]。

Oren-Nayar模型假设一个微表面的法线分布和遮蔽阴影函数与当前的镜面反射模型中所使用的大不相同.使用各向同性的GGX NDF和高度相关的Smith遮蔽阴影函数,导出了两个漫射微面模型.Gotanda [**574**]提出的第一个模型是使用公式9.64中的镜面耦合漫反射项作为微BRDF数值积分一般微面方程(方程9.26)的结果.然后将解析函数拟合到数值积分数据中.Gotanda的BRDF没有考虑小平面之间的相互反射,并且拟合函数相对复杂.

Hammon [**657**]使用与Gotanda相同的NDF,遮蔽阴影函数和微型BRDF,数值模拟了BRDF，包括相互反射.他表明,相互反射对于这种微刻面配置很重要,对于较粗糙的表面,其反射率高达总反射率的一半.但是,第二次反弹包含几乎所有丢失的能量,因此Hammon使用两次反弹模拟中的数据.同样,可能是因为增加了相互反射可以使数据平滑,所以Hammon能够将一个非常简单的函数拟合到模拟结果中:

其中

并且是GGX镜面粗糙度.为了清楚起见,此处的用语与Hammon的演示文稿中的用语略有不同.注意,是公式9.64中的耦合扩散BRDF,没有因子,因为在公式9.68中将其相乘.Hammon讨论了用“混合” BRDF代替其他光滑表面漫射BRDF来平滑处理,以提高性能或改善与旧模型下创作的资产的兼容性.

总体而言,哈蒙的漫射BRDF计算便宜,并且基于合理的理论原理,尽管他没有显示与测量数据的比较.需要注意的是,表面不规则度大于散射距离的假设是BRDF推导的基础,这可能会限制可以精确建模的材料类型.参见图9.40.公式9.61中所示的简单Lambertian术语仍由许多实时渲染应用程序实现.除了Lambertian项的计算成本低外,间接照明和烘焙照明比其他漫射模型更容易使用,并且它与更复杂的模型之间的视觉差异通常很细微[251,861].尽管如此,对真实主义的不断追求正在推动使用更精确的模型的增加.

9.10 布料BRDF模型

布料倾向于具有不同于其他类型材料的微观几何形状。 根据织物类型的不同，它可能具有高度重复的机织微观结构，从表面垂直突出的圆柱（线）或两者兼有。 因此，布料表面具有典型的外观，通常需要特殊的阴影模型，例如各向异性的镜面高光，粗糙散射[**919**]（由通过突出的半透明纤维进行的光散射引起的明亮边缘效果），甚至随着视图方向的颜色变化（ 是由穿过织物的不同颜色的线引起的）。

除了BRDF，大多数织物都有高频空间变化，这也是创造令人信服的布料外观的关键[**825**]。 参见图9.42。

布料BRDF模型分为三大类：通过观察创建的经验模型，基于微面理论的模型和微圆柱模型。 我们将介绍每个类别中的一些著名示例。

9.10.1 经验布料模型

在“神秘海域2 [**631**]”游戏中，布料表面使用以下漫反射BRDF项:

其中和分别是用户控制的边缘照明项的缩放比例因子,使前向(内部)表面变亮的项和Lambertian项.同样,和控制边缘和内部项的衰减.此行为是非物理的,因为存在多种与视图相关的效果,但没有一个依赖于光的方向.

相比之下，《神秘海域4》[**825**]中的布料使用镜面模型或微圆柱模型作为镜面反射项,具体取决于布料类型(如以下两节中所述),而“包裹照明”则根据实物表面次表面散射近似漫反射项:

在这里,我们使用第1.2节中介绍的表示0和1之间的限制.项表示此模型会影响照明以及BRDF.箭头右侧的项代替了左侧项.用户指定的参数是一种散射颜色,值(范围为[0,1])控制环绕照明的宽度.

对于布料建模,迪士尼使用其漫反射BRDF项[214](第9.9.4节),并在模型粗糙散射上添加了光泽项:

其中是用户参数,可调节sheen项的强度.光泽度是白色和ρss的亮度标准化值之间的混合(由另一个用户参数控制).换句话说,将ρss除以其亮度可以隔离其色相和饱和度.

9.10.2 微面布料模型

Ashikhmin等人[78]提出了使用反高斯NDF建模天鹅绒的方法。在随后的工作中对该NDF进行了稍许修改[81]，该工作还提出了微面BRDF的一种变体形式，用于一般的材料建模，没有遮罩阴影项和分母.

《教团:1886》使用的布料BRDF [**1266**]将修饰的微面BRDF与Ashikhmin和Premoˇze后来的报告[**81**]的天鹅绒NDF的一般形式与公式9.63的漫反射项结合在一起。天鹅绒NDF的一般形式是

其中,控制反转高斯的宽度,而控制其振幅.完整的布料BRDF是

此BRDF的一种变体在游戏Uncharted 4 [**825**]中用于粗糙的织物,例如羊毛和棉.

Imageworks []对光泽项使用了不同的反向NDF,可以将其添加到任何BRDF中:

尽管此NDF的Smith遮罩阴影功能没有封闭形式的解决方案,但是Imageworks能够使用解析函数来近似数值解决方案。 Estevez和Kulla [**442**]讨论了荫罩期和BRDF其余部分之间的遮蔽阴影功能和节能问题.有关使用Imageworks光泽度术语渲染的一些示例，请参见图9.43.

到目前为止，我们看到的每种布料模型都限于特定类型的布料.下一节讨论的模型将尝试以更通用的方式对布料进行建模.

9.10.3 微面圆筒布料模型

用于布料的微圆柱模型与用于头发的微圆柱模型非常相似，因此在14.7.2节中对头发模型的讨论可以提供更多的背景信息。这些模型背后的思想是假定表面被一维线覆盖。Kajiya和Kay为这种情况开发了一个简单的BRDF模型[**847**]，Banks [**98**]为其奠定了坚实的理论基础。也称为Kajiya-Kay BRDF或Banks BRDF。该概念基于以下观察：由一维线组成的表面在任何给定位置都具有无限数量的法线，该法线由垂直于该位置的切向量t的法线平面定义。尽管从此框架开发了许多更新的微缸模型，但由于其简单性，原始的Kajiya-Kay模型仍然可以使用。例如，在游戏神秘海域4 [**825**]中，Kajiya-Kay BRDF被用作镜面项，如丝绸和天鹅绒等光泽织物。

Dreamworks [**348,1937**]使用相对简单且艺术家可控制的微圆柱模型制作织物。可以使用纹理来改变粗糙度，颜色和线的方向，这些方向可以指向曲面之外，以用于建模天鹅绒和类似织物。 可以为经纱和纬纱设置不同的参数，以对复杂的变色织物（如生丝）建模。该模型被归一化为节能的。

Sadeghi等人[**1526**]基于对织物样品以及单个线的测量结果，提出了一种微圆柱模型。 该模型还考虑了线程间的线程间屏蔽和阴影。

在某些情况下，实际的头发BSDF模型（第14.7节）用于布料。 RenderMan的PxrSurface材质[**732**]具有“模糊”瓣，该瓣使用了Marschner等人[**1128**]的头发模型中的R项（第14.7节）。 Wu和Yuksel [**1924,1926**]在实时布料渲染系统中实现的模型之一是迪士尼为动画电影使用的头发模型[1525]衍生的.