到目前为止，我们已经假定场景是在真空中由表面集合构成的，这意味着沿表面之间的射线的辐射是恒定的。但是，在现实世界中，这种假设是不准确的：雾和烟雾会衰减并散射光，并且大气中粒子的散射会使天空变成蓝色，日落变为红色。本章介绍了数学，描述了光通过参与介质时会受到怎样的影响-大量非常小的粒子分布在3D空间的整个区域。体积散射模型是基于这样的假设，即存在如此多的粒子，因此最好将散射建模为概率过程，而不是直接考虑与粒子的个体相互作用。通过模拟参与介质的效果，可以渲染出具有大气雾度，穿过云层的光束，穿过多云水的光束以及地下散射的图像，其中光从固体物体进入的位置与进入的位置不同。

本章首先介绍影响穿过参与介质的光线的辐射的基本物理过程。然后，它引入了Medium基类，该基类提供用于描述空间区域中参与的媒体的接口。介质实现返回有关其范围内的点处的散射特性的信息，包括相位函数，该函数表征光如何在空间中的点处散射。（这是BSDF的体积类似物，它描述了表面上某个点的散射。）为了确定参与介质对场景中辐射分布的影响，需要处理体积效果的Integrators；这是第15章的主题。

在高度散射的参与介质中，光可能会发生许多散射事件，而能量却没有任何明显的减少。 在积分器中寻找路径的成本通常与其长度成正比，而要跟踪具有成百上千个散射相互作用的光路变得不切实际。在这种情况下，最好将潜在散射过程的整体效果汇总到一个函数中，该函数将光进入和离开介质的点之间的散射关联起来。 因此，本章以BSSRDF基类结束，该基类是使实现这种方法成为可能的抽象。 BSSRDF实现描述了在折射表面界定的介质中的内部散射。

11.1 体积散射过程

影响参与介质环境中辐射度分布的三个主要过程:

吸收:由于光转换为另一种形式的能量（例如热量）而导致的辐射减少

发光：从发光粒子添加到环境中的辐射

散射：辐射向一个方向前进，由于与粒子的碰撞而向另一个方向散射

所有这些性质的特征可以是均质的或不均质的。给定空间范围，在空间的某些区域中，均匀属性是恒定的，而在整个空间中，不均匀属性是变化的。图11.1显示了一个简单的体积散射示例，其中，穿过参与介质的聚光灯照亮了介质中的粒子并投射了体积阴影。

11.1.1 吸收

考虑一下从火中冒出来的浓浓黑烟：烟雾将其后面的物体遮盖了，因为其颗粒吸收了从物体传播到观察者的光。烟雾越浓，吸收的光越多。图11.2显示了这种影响，它是通过精确的烟雾形成物理模拟创建的吸收空间分布。注意地面上的阴影：参与的介质还吸收了光源与地面之间的光，从而投射出阴影。

吸收率用介质的吸收截面来描述,是介质中每单位距离传播的光被吸收的概率密度.通常,吸收截面可以随位置和方向改变,尽管通常只是位置的函数.它通常也是一个光谱变化量. 的单位是距离倒数().这意味着可以取任何正值:例如,它不需要介于0和1之间.

图11.3显示了沿非常短的一段射线吸收的效果.一定数量的辐射到达点,我们希望在微分体积中吸收后找到出射辐射.沿微分射线长度的辐射变化由微分方程描述

这说明沿光束的辐射差异减小是其初始辐射的线性函数.(这是辐射度学中线性假设的另一个实例:吸收的光的比例不会根据射线的辐射度而变化,而是始终是固定的比例.)

可以求解该微分方程,以给出描述光线吸收的总比例的积分方程.如果我们假设射线从点开始沿方向在介质中传播的距离为,则原始辐射的剩余部分为

11.1.2 发光

尽管吸收会减少射线穿过介质时沿其辐射的数量,但由于将能量转换为可见光的化学,热或核过程,发光会增加射线的辐射.图11.4显示了微分体积中的发射,其中我们表示在方向上的点处,每单位距离的射线上的增加的发光辐射.图11.5显示了烟雾数据集对排放的影响.在该图中,吸收系数远低于图11.2,从而产生了非常不同的外观.

给出辐射因发射而变化的微分方程为

该方程式包含发射光不依赖于入射光的假设.在pbrt所基于的线性光学假设下,这始终是正确的.

11.1.3 外散射和衰减

参与介质中的第三种基本光相互作用是散射.射线穿过介质时，可能会与粒子碰撞并朝不同方向上散射.这对光束携带的总辐射有两个影响.由于某些光束会偏转到不同的方向,因此可以减少离开光束不同区域的辐射.此效应称为向外散射(图11.6),是本节的主题.但是,来自其他光线的辐射可能会散射到当前光线的路径中.下一个主题是这个内散射的过程.

每单位距离发生散射事件的可能性由散射系数给出.与吸收一样,由于散射而导致的沿差分长度的辐射减小由下式给出:

由于吸收和外散射而导致的总辐射降低由总和给出.吸收和散射的综合作用称为衰减或消光.为方便起见,这两个系数的总和由衰减系数表示:

与衰减系数有关的两个值在下面将是有用的.第一个是反照率,其定义为

反射率始终在0到1之间;它描述了在散射事件中散射(相对于吸收)的概率.第二个是平均自由路径,它给出了射线与粒子相互作用之前在介质中传播的平均距离.

给定衰减系数,描述整体衰减的微分方程为

可以求解以找到光束透射率,该透射率给出了在两点之间透射的辐射比例:

其中是和之间的距离,是它们之间的归一化方向矢量,表示和之间光束的透射率.注意,透射率始终在0到1之间.因此,如果从表面上的点沿给定方向发出的辐射度为,则在消光后,另一点在方向上的入射辐射度为

光束透射率的两个有用特性是,从点到其自身的透射率是1,,并且在真空,因此所有的.此外,如果衰减系数满足方向对称性或不随方向变化而仅随位置变化(通常是这种情况),则两点之间的透射率就是双向相同:

在所有介质中都适用的另一个重要属性是,透射率沿射线的点成倍增加:

对于和之间的所有点(图11.8)该等式恒成立.该属性对体积散射实现很有用,因为它可以递增地计算沿射线的多个点的透射率:可以通过将透射率乘积乘以先前的乘积来计算从原点到点的透射率 点Tr（o→p）和先前点与当前点Tr之间段的透射率（p→p）.

等式（11.1）中的定义中的负指数称为两点之间的光学厚度.用符号表示:

11.1.4 入散射

由于不同方向的散射,向外散射会减少沿射线的辐射,而由于其他方向的散射,向内散射会导致辐射增加（图11.9）.图11.10显示了烟雾数据集的散射效果.请注意,与主要的体积吸收或吸收作用相比,烟雾看起来浓得多.

假设粒子之间的距离至少是其半径长度的几倍,则在描述特定位置的散射时可以忽略粒子间的相互作用.在此假设下,相位函数描述了一个点处的散射辐射的角度分布;它是BSDF的体积模拟物.但是,BSDF的类比并不准确.例如,相位函数具有归一化约束:对于所有,条件

必须满足.该约束意味着相位函数实际上定义了在特定方向上散射的概率分布.

由散射引起的每单位距离的总额外辐射度由源项给出:

同时考虑体积发射和散射:

源项的散射内部分是每单位距离的散射概率与一个点处的附加辐射量的乘积,该乘积由入射辐射度和相位函数乘积的球形积分给出.注意,源项与散射方程（5.9）非常相似.主要区别在于没有余弦项,因为相位函数作用在辐射度上而不是微分辐照度.

11.2 相函数

正如有各种各样描述表面散射的BSDF模型一样,也已经开发了许多相位函数.这些范围从参数化模型(可用于将少量参数的函数拟合到测得的数据)到解析模型,这些模型基于派生自具有已知形状和材料(例如球形水)的粒子的散射辐射率分布飞沫.

在大多数自然存在的介质中,相位函数是两个方向和之间角度的一维函数;这些相位函数通常写为.具有这种类型的相位函数的介质称为各向同性的,因为它们对入射照明的响应在旋转下(局部)不变.除了归一化外,相位函数的一个重要特性是它们是互易的;两个方向可以互换,并且相位函数的值保持不变.注意,各向同性相函数是微弱的倒数,因为.

在由以相干结构排列的粒子组成的各向异性介质中,相位函数可以是两个方向的4D函数,它满足更复杂的互易关系.这样的例子是晶体或由相干取向的纤维制成的介质.“进一步阅读”将进一步讨论这些类型的媒体.

在术语混乱的情况下,相函数本身也可以是各向同性或各向异性的.因此,我们可能在各向同性介质中具有各向异性的相函数.各向同性的相函数描述了在所有方向上均等的散射,因此独立于两个方向中的任何一个.由于相位功能已标准化,因此只有一个这样的函数:

PhaseFunction抽象基类在pbrt中定义了相函数的接口.

P()方法返回给定方向的相位函数的值.与BSDF一样,pbrt使用以下约定:两个方向都指向远离发生散射的点.这与散射文献中通常使用的惯例不同(图11.11).

Henyey和Greenstein(1941)开发了一种广泛使用的相函数.该相位函数经过专门设计,易于适应测得的散射数据.单个参数g(称为不对称参数)控制散射光的分布:

PhaseHG()函数实现此计算.

图11.12显示了具有变化的不对称参数的Henyey-Greenstein相位函数图.此模型的g值必须在（-1，1）范围内.g的负值对应于反向散射,其中光大部分朝着入射方向向后散射,而正值对应于正向散射.g的值越大,靠近或方向（分别用于反向散射和正向散射）的散射越多.参见图11.13，比较前向和反向散射的视觉效果.

Henyey-Greenstein模型中的不对称参数具有精确的含义.它是近似的相位函数与和之间角度的余弦值的乘积的平均值.给定任意相位函数,可以将的值计算为

因此,各向同性相函数如预期的那样使.

任何数量的相位函数都可以满足该方程式;仅值不足以唯一地描述散射分布.然而,与这种潜在的精度损失相比,能够轻松地将复杂的散射分布轻松转换为简单的参数化模型的便利通常更为重要.

不能用单个不对称参数很好地描述的更复杂的相位函数通常可以用Henyey-Greenstein等相位函数的加权总和来建模,每个相位函数具有不同的参数值:

其中权重总和为1以保持标准化.pbrt中未提供这种概括，但很容易添加。

11.3 介质

11.4 BSSRDF

5.6.2节介绍了双向散射表面反射率分布函数(BSSRDF).给定一点的入射微分辐照度:,它给出了表面上另一点的出射辐射.要通过次表面散射准确渲染半透明表面,需要对两个区域(要渲染的对象表面上的点)和入射方向进行积分,评估BSSRDF并使用次表面散射方程计算反射

通过第11.1节和第11.2节介绍的体积散射过程以及将在第15.1节介绍的体积光传输方程来描述次表面光传输.BSSRDF 是对边界上给定点对和方向对之间这些散射过程的结果进行建模的概括表示.

已经开发了各种BSSRDF模型来模拟次表面反射；它们通常包括一些简化的基础散射过程，以使其易于处理.15.5节将介绍一种这样的模型.在这里,我们将从指定一个类似于BSDF的相当抽象的接口开始.与BSSRDF相关的所有代码都在文件core/bssrdf.h和core/bssrdf.cpp中.

11.4.1 可分离的BSSRDFS

上面定义的BSSRDF接口的一个问题是它的极端通用性.甚至在简单的平面或球形几何形状中,寻找次表面光传输的解决方案已经是一个相当具有挑战性的问题,而BSSRDF实现可以附加到任意且相当复杂的形状上这一事实导致了难以实践的背景.为了保留支持常规形状的功能,我们将在SeparableBSSRDF中引入一个更简单的BSSRDF表示形式.

简化的SeparableBSSRDF接口将BSSRDF转换为具有三个独立组件(一个空间和两个方向)的可分离形式:

菲涅耳项在开始时对离开材料后传输到方向的光的比例进行建模.内包含的第二个菲涅耳项解释了边界对从方向进入物体的光的方向分布的影响.轮廓项是表征光在进入材料后传播距离的空间分布.

对于高反照率的介质,散射的辐射分布通常是相当各向同性的,菲涅耳透射率是定义最终方向分布的最重要因素.但是,方向变化对于低反照率的介质可能是有意义的.在这种情况下,这种近似的准确性较低.

给定公式（11.6）中的可分离表达式,用于确定由次表面散射导致的出射照明的积分(第15.5节)简化为

我们将方向项定义为菲涅耳透射率的缩放形式(第8.2节):

选择归一化因子,以使在余弦加权半球上积分为1:

换句话说,

该积分称为菲涅耳反射率函数的第一矩.还存在涉及余弦函数的高次幂的其他矩,并且在与次表面散射有关的计算中经常出现;第阶菲涅耳矩的一般定义是

pbrt提供了两个函数FresnelMoment1（）和FresnelMoment2（）,它们基于多项式对这些函数的拟合来评估相应的矩.（我们不会在这里的书中包含它们的实现。）一个微妙的地方是,这些函数遵循的约定与上述定义略有不同-实际上,它们被称为的倒数.这是由于它们在15.5节中的主要应用,其中它们说明了由于内部边界处的反射(相对折射率为)而反射回材料中的效果光.

对空间和方向参数进行解耦可大大减小的维数,但无法解决支持通用形状实现的基本困难.我们引入第二种近似方法,该方法假定表面不仅局部为平面,而且影响点BSSRDF的是点之间的距离,而不是它们的实际位置.这将简化为仅包含两个点和的距离的函数:

与以前一样,空间项的实际实现方式不以po为参数,因为它已在BSSRDF :: po中提供.

SeparableBSSRDF :: Sr（）方法仍然是虚拟的,在实现特定一维地下散射轮廓的子类中被重写。 请注意，对距离的依赖性引入了一个隐含的假设，即散射介质相对均匀，并且不会随位置而强烈变化-任何变化都应大于平均自由程长度.

BSSRDF模型通常是函数Sr（）的模型，该函数是通过仔细分析均匀平板中的光传输得出的。 这意味着诸如SeparableBSSRDF之类的模型将在平面设置中产生良好的近似值,但随着底层几何结构偏离此假设，误差会增大.

11.4.2 表格BSSRDF

pbrt中SeparableBSSRDF接口的单个​​当前实现是TabulatedBSSRDF类.它提供对列表BSSRDF表示形式的访问，该表示形式可处理各种散射曲线，包括测量的实际BSSRDF。 TabulatedBSSRDF使用与傅里叶BSDF反射率模型（第8.6节）所用的相同类型的基于自适应样条的内插方法。在这种情况下，我们根据等式（11.9）对与距离相关的散射轮廓函数Sr进行插值.不需要FourierBSDF使用傅里叶级数捕获方向变化的第二阶段。图11.15显示了使用TabulatedBSSRDF渲染的球体。

重要的是要注意，当所有BSSRDF材料属性都固定时，径向轮廓Sr只是一维函数。更一般而言，它取决于四个附加参数：折射率η，散射各向异性g，反照率ρ和消光系数σt，从而得出完整的函数签名Sr（η，g，ρ，σt，r）不幸的是，它对于离散化而言太高了。因此，我们必须删除或修复某些参数.

考虑到唯一具有物理单位（除r之外）的参数为σt.此参数量化每单位距离的散射或吸收相互作用的速率.σt的影响很简单：它仅控制BSSRDF轮廓的空间比例.为了减小必需表的维数，我们将σt= 1固定为一个表格，然后将BSSRDF轮廓的无单位列表制成表格。当在运行时查找给定的消光系数σt和半径r时，我们找到相应的无单位光学半径roptical =σtr并按以下方式评估低维列表:

由于是极坐标中的二维密度函数，因此需要相应的比例因子来考虑变量的这种变化(另请参见第13.5.2节).

我们还固定折射率和散射各向异性参数-实际上,这意味着这些参数无法在具有使用TabulatedBSSRDF的材料的对象上进行纹理化.这些简化为我们提供了一个相当易于管理的2D函数,该函数仅在反照率和光学半径上离散.

除了光谱变化的吸收系数和散射系数和以外,TabulatedBSSRDF构造函数还采用BSSRDF构造函数的所有参数.它为当前表面位置预先计算消光系数σt=σa+σs和反照率ρ=σs/σt，避免了在给定光谱通道无消光时被零除的问题.

注意，TabulatedBSSRDF::rho成员变量给出了单个散射事件后能量的减少;这与材料的整体反照率不同,后者考虑了所有的散射阶.为了强调这种差异,我们将这些不同类型的反照率称为单散射反照率和有效反照率.

我们将有效反照率定义为轮廓在极坐标的积分:

轮廓采样代码和KdSubsurfaceMaterial都经常访问的值.我们引入了长度为BSSRDFTable :: nRho Samples的数组rhoEff,它将每个反照率样本映射到其相应的有效反照率.

的计算将在15.5节中讨论.现在,我们仅注意到它是单散射反照率的非线性且严格单调增加的函数.