摘要

在本文中，我们提出了两个实时模型，用于模拟大量半透明材料的次表面散射,每帧需要不到0.5毫秒的时间来执行.这使它们成为实时生产场景的实用选择.当前最先进的实时方法通过用可分离的高斯和来逼近径向对称的不可分离扩散核来模拟次表面散射,这需要多个(最多十二个)一维卷积.在这项工作中,我们放宽了对径向对称性的要求,以单个可分离的核近似2D漫反射反射轮廓.

我们首先表明,基于矩阵分解的低秩逼近方法优于以前的方法,但是它们仍然需要多次Pass才能获得良好的结果.为了解决这个问题,我们提出了两个不同的可分离模型:第一个模型产生高质量的扩散模拟,而第二个模型则在物理精度和艺术控制之间提供了有吸引力的折衷方案.两者都允许仅使用两个1D卷积来渲染地下散射,从而减少了执行时间和内存消耗,同时提供了可与更高成本技术媲美的结果.使用我们的重要性采样和抖动策略，每个像素仅需要七个采样.我们的方法可以实现为简单的后处理步骤,而无需对现有渲染管道进行改动.

1 介绍

在电影和视频游戏行业中,对半透明材料的准确描绘是一个重要但具有挑战性的主题.渲染逼真的次表面散射(SSS)意味着模拟光在半透明介质内部的传播和散射方式,这是一个昂贵的过程.尽管离线渲染方案可以提供更长的计算时间,但诸如视频游戏之类的实时应用程序却施加了严格的时间限制,常常导致排除了次表面散射和半透明效果.这反过来又阻碍了可以实现的真实水平.

有效计算次表面散射的最常用方法之一是利用模糊高频细节和照明的事实.这意味着模拟次表面散射可以近似为计算给定半透明介质的漫反射扩散核的卷积.尽管精确的重建通常需要昂贵的二维卷积,但d′Eon等人[dLE07]表明可以用径向对称的高斯和来近似.因此,由于高斯的可分离性,可以使用一组更便宜的1D通道来计算2D卷积,从而可以实时进行高质量的皮肤渲染.此方法后来扩展到屏幕空间,根据每个像素的深度信息[JSG09]来调整内核的宽度.

但是,为了获得足够的结果,需要几个高斯模型来模拟漫反射率轮廓,这转化为每帧多重1D卷积,这仍然很昂贵.在本文中,我们进行了关键性的研究,即通过数学上的低分离因式分解,可以对各种材料进行精确的模拟扩散核,这些核通常在数学上是不可分离的(参见图2).基于此,我们提出了两个不同的可分离模型,它们仅用两个一维卷积就可以模拟次表面散射:第一个模型基于辐照度近似可加可分离的观察从而重建了高质量的扩散剖面,而第二个模型是一个艺术家友好型模型，该模型根据先前的观察结果，在物理精度和易于使用的散射轮廓的艺术编辑之间提供了一个有吸引力的折衷方案(表1).结合我们的重要性采样和抖动策略,我们的方法每个像素仅需要七个采样(见图1和13).

我们的方法可以实现为简单的后处理步骤,并且不依赖复杂的alpha混合管道或高斯细节级别[JG10]，并且可以处理动态对象而无需任何额外费用.此外,我们所有的等级1近似值在现代商品硬件上每帧的执行时间不到0.5 ms,并且固定成本可以忽略不计,因为可以使用模板缓冲快速剔除没有可见散射的场景区域.我们对地下散射的可分离近似值填补了基于物理的地下散射渲染与高度受时间限制的环境(例如游戏)之间的空白,目前已在游戏引擎和生产管道中使用.

2 之前的工作

**离线技术** 半透明材质内部散射的模拟可以追溯到辐射传递方程[Cha60],可以通过传统的路径采样技术来求解.就计算时间而言,此积分的解决方案是一个非常苛刻的过程,尤其是在解决大量跳动的情况下.减少计算时间的优化技术包括使用偶极子模型[JMLH01,JB02]和将多重散射建模为扩散过程[Sta95].Donner和Jensen[DJ05]将偶极子扩展为一个多极子模型,该模型允许对多层半透明材料(例如皮肤)进行建模.后来,同一作者介绍了将光子跟踪和扩散近似相结合的光子扩散技术[DJ07].这些工作以每张图像几秒钟的计算时间产生了令人印象深刻的结果.较新的技术通过使用更精细的扩散模型来分离单个和多个散射项,同时对扩散方程的格林函数进行量化以获得真实的所有频率结果,从而改善了扩散理论的固有误差.进一步的改进围绕更好的重要性采样[KF12]进行,而最近的一类技术依靠通过多重重要性采样注入的蒙特卡洛积分[HCJ13]解决探照灯问题.

实时技术 Borshukov和Lewis[BL03]通过使用高斯滤波器模糊2D漫射辐照纹理来近似次表面散射.虽然这项技术非常有效并且可以很好地映射到GPU,但它忽略了次表面散射的更细微的细节.后来，d'Eon等人[dLE07，dL07]扩展了这个想法,开发高质量的实时皮肤着色器.他们用高斯之和近似多极模型,并用它们模糊纹理空间中的辐照信号.由于高斯是可分离的,因此可以将昂贵的2D卷积转换为更便宜的1D卷积.该技术可实现实时帧速率,同时提供与离线模拟相当的结果.在后续工作中,基于在13个抖动采样点上计算单个2D卷积,引入了额外的优化,这考虑了直接反射和两个散射级别[HBH09];不幸的是,13个样本不足以进行2D卷积,结果很差.

尽管这些技术提供了实时帧速率,但是由于需要根据每个对象执行次表面散射模拟,因此它们在场景中的半透明对象数量上的缩放效果很差.为了克服这个问题,Jimenez等人[JSG09，JG10]提出将模拟从纹理转换为屏幕空间.在采用高斯和公式的后处理步骤中,半透明物体的漫反射变得模糊,从而将次表面散射计算限制在物体的可见部分.在屏幕空间中运行的其他技术包括Mertens等人的工作[MKB \* 05],使用BSSRDF的重要性抽样;Shah等人的方法[SKP09],他们使用溅镀方法进行积分而不是收集步骤;Mikkelsen[Mik10],他展示了如何将高斯卷积表示为交叉双边滤波器.Penner和Borshukov[PB11]假设将曲面法线预先模糊化并使用了柔和阴影,因此将由于曲率和阴影产生的地下散射的照明效果预先整合到纹理中.最近的实时技术使用扩散近似来渲染光学厚度的材料[WZT \* 08],包括使用有限元和有限差分来支持任意的非局部平面几何形状[WWH \* 10，LSR \* 13].与这些工作相比,我们的技术将模糊处理推迟到着色之后,从而保留所有几何细节.此外,它更易于实现,并且产生非常高的帧速率,适用于最具挑战性的实时场景.

3 可分离的次表面散射

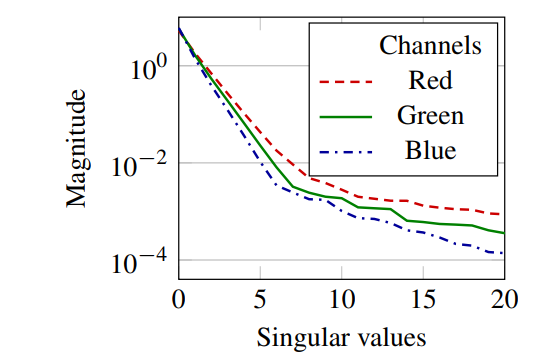
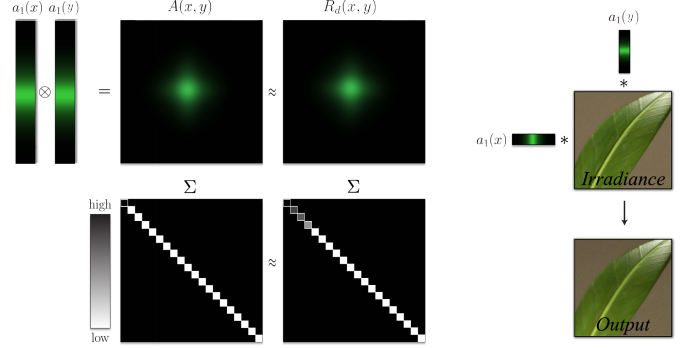
均匀的半透明材质由于表面下的光散射而产生的漫反射率被其2D漫反射轮廓特征化,该轮廓描述了在无限半空间[JMLH01]表面的原点周围垂直入射的笔形光束周围反射的光.对于均质材料,是径向对称的,并且可以通过一维扩散轮廓进行特征化,以使(注意,扩散假设的径向对称性来自假设垂直入射的入射光,通常在实际应用中不成立.对于具有方向相关扩散的SSS的描述,我们建议读者参考[DLR09,HCJ13,FHK15]).可根据以下公式计算任意表面点的辐射出射量:

其中是在点的辐照度[irradiance],和的单位均为.注意,等式具有2D卷积的形式,具有二维反射率分布:.

2D扩散轮廓的近似 对于实时应用,在等式中执行2D卷积非常昂贵.但是,如果我们可以将轮廓表示为由可分离函数之和组成的近似值,则可以通过2N 1D卷积序列来近似表示此运算,这将显示出较小的计算复杂度:

其中近似值由一维函数定义.从的径向对称性出发,可以在两个坐标方向上采用相同的函数.d’Eon等人[dLE07]观察到零均值高斯是近似的合适函数:

其中表示各个高斯的标准方差.由于高斯核的可分离性,与的卷积可以实现为2N 1D卷积.不幸的是,对于最苛刻的实时场景,这些2N卷积仍然过于昂贵.

 但是,我们实际上仅使用离散的扩散核，可以将其解释和分析为2D矩阵.这使我们可以观察到,典型扩散核的大部分能量都存储在前几个奇异值中,尤其是存储在第一个奇异值中(请参见图2).这意味着,可以通过低秩可分离近似来计算扩散分布,并且,如果选择适当的话,单个可分离内核可以再现大多数内核感知量.这种可分离内核在渲染中的应用如图3所示.

**图2**,漫反射轮廓的奇异值分解中的奇异值衰减,用于模拟皮肤中的次表面散射.只有与前几个奇异值相关的分量才对轮廓的重构有明显贡献,从而使低秩逼近成为可能.

**图3**,方法概述:基于扩散核的低秩性质(由存储内核的奇异值(灰度)S矩阵所示),我们近似得出,其中.这简化了次表面散射(右侧)的模拟,每个辐照度[irradiance]信号的求和仅需两个1D卷积.

离散可分离核的一个明显选择是仅使用奇异值分解(SVD)的第一个组件,根据Eckhart-Young定理[EY36],它相对于Frobenius范数给出了最佳的低阶近似.不幸的是,即使通过归一化内核来强制保持能量守恒,使用SVD的内核的Rank-1逼近也显示出相当大的能量损耗,并且产生的结果也不令人满意。这是由于以下事实：纯内核空间分解不考虑图像空间中内核的某些部分比其他部分更相关。基于较高等级的SVD的近似值（即N≈2-6）可以非常迅速地收敛到原始内核（图4），但是增加的计算时间使其对于实时应用而言不太有吸引力。在下面的内容中，我们表明，在某些假设下,甚至可以使用秩1近似值来高精度地重建扩散核（第4节），然后提出一个艺术家友好的可分离模型,该模型可直观地编辑半透明材质的外观（第5节）.

4 预积分可分离核

高斯和近似与基于SVD的方法对于单个加数(即N = 1)都无法获得令人满意的结果.由于真实扩散剖面的离散表示不具有可分性，因此通过单个可分离内核将它们与2D信号进行卷积无法完全重建该效果.此外,可分离的近似核通常不是径向对称的,如图5中的示例所示.但是,可以完全再现特殊信号类别上的轮廓行为:假设辐照度是可分离相加的,即 或等效地,,辐射出射量如下:

其中表示沿坐标轴预集成一维内核.由于的径向对称性,我们有,其中,根据定义,.因此,我们将扩散轮廓的预积分核定义为(请注意,我们的预积分公式与Penner和Borshukov[PB11]提出的公式根本不同:虽然它们预先积分了由于次表面散射而导致的图像空间中的梯度,但我们预积分了内核,随后将其应用于SSS.):

请注意,在存在可加的分离辐照信号(例如任意方向的直线阴影边界或大体上与轴对齐的1D函数)的情况下,会用再现精确的2D卷积(有关垂直阴影边界的示例,请参见图7).

即使对于一般的信号(即不可加分离的信号),由于大多数真实世界的信号都可以使用可相加分离以局部近似,因此这种近似对于多种材料和场景也能产生良好的结果(请参见图6和13).然而,该公式为艺术家提供了有限的控制,并且需要离散化以用于实际应用.在接下来的部分中,我们将描述一个可分离的,并对艺术家友好的模型以可以克服这两个限制.

5 艺术家友好的可分离模型

考虑到扩散核,我们的预集成核(第4节)能够重构各种材质,可以从测量数据[JMLH01,MES \* 11]或模拟中获得.但是,在生产环境中,这些配置文件可能不是最佳配置文件，因为它们可能与为不同类型的皮肤捕获或计算的资产（例如反照率图的颜色）不匹配.为了解决这个问题,我们基于物理上有意义的参数,提出了一种适用于艺术性编辑地下散射的方法.

如果使用通用函数,则添加可分离内核的通用近似值(请参见公式2)显示出很大的自由度.即使是N个高斯的总和(请参见公式3),艺术家也需要在每个波长上操纵2N个参数.此外,在存在许多其他高斯参数时更改一个高斯参数可能会导致意外结果.Jimenez等人[JJG12]提出了以可分离的近似方式对基轮廓进行临时转换,以克服这一限制.但是,此模型缺乏对扩散基本物理的直观映射.相反,受到以前工作的启发,该工作允许使用简单的低维函数对地下轮廓进行建模和编辑[KKCF13]，我们的方法基于更直观的概念，即将地下散射分为两个高斯编码的近距离和远距离散射.这些构成了我们可分离内核的基础,如下所示:

其中和分别代表近散射和远散射高斯的标准偏差,是加权因子.请注意,表示两个一维高斯的混合,这会导致可分离的(秩1)内核.这与d'Eon等人[dLE07]的2D高斯混合方法不同,其中两个高斯不会产生可分离的(秩1)核,而是秩2的解.

我们的模型利用了第3节中所述的可分离逼近的优势，它能够在不同的光照配置下匹配地面实况（第4节），同时提供了丰富的设计空间，可以直观地编辑半透明材质的外观（图 8和9（d）），包括易于集成到通常需要这种外观控制的生产管道中.我们的近似具有另一个重要特性：由于它是基于高斯的,因此是轮廓的连续参数表示.这种表示方式允许在运行时解析地计算扩散曲线，如第6节所示.此外,附录还引入了一个与实际扩散内核的额外引导偏差，以生成强调某些半透明效果的可行的秩1近似值.

6 渲染

我们对扩散曲线的近似（仅表示为一个可分离的内核）可以应用于纹理空间和屏幕空间.为了提高效率,我们使用Jimenez等人[JSG09]的屏幕空间方法,包括半透明性[JWSG10],将反照率,漫反射和镜面反射分量分离到不同的缓冲区中,仅在漫反射层中模拟次表面传输,并合成最终渲染.在下文中,我们重点介绍了渲染管线的其他改进,从而使每个样本仅16条指令的优化代码就可以实现.我们请读者阅读补充材料以获取详细信息.

抖动 如图10所示，我们的可分离近似值可能会导致在高频照明下出现一些伪像。这是因为信号的空间足迹变得小于核的带宽,从而产生了不对称的星形图案.这种情况在高质量的特写镜头中也很常见,例如详细显示皮肤毛孔.

为了减轻这个问题，我们采用了与Huang等人[HBR \* 11]类似的随机的每像素滤波轴旋转。与诸如内核抖动之类的其他替代方法相比，使用随机旋转具有两个主要优点：（i）打破可见的十字图案； （ii）由于扩散核的径向对称性，由于保持了距离，因此不必重新整合核。为避免GPU缓存抖动，我们仅将其应用于接近所评估像素的样本（在我们的实现中，它小于内核大小的10％，尽管它取决于缩放和所使用的内核；对于极端的特写镜头和内核用高斯波瓣非常不同的模型建模，则需要更高的范围，如图9所示。这可以解决小规模特征（例如皮肤毛孔）中的伪影，尽管对于更高尺度的特征（例如图10中的亮点），仍然可能存在可见伪像（但是请注意，这是病理情况，在实际情况中并不常见-world应用程序）。图9展示了将样本位置随机化的效果。注意，除了掩盖伪像之外，它还减少了由于欠采样导致的条带问题。

**内核占用空间和评估** 对于屏幕空间方法,卷积核的大小是像素投影表面面积的函数[JSG09]。 对于连续逼近（第5节），我们遵循与Mikkelsen [Mik10]类似的推导：这些允许（i）在世界空间中准确地应用内核，而不是使用即席校正因子[JSG09]，以及（ii） 离线计算每个样本的确切面积，而（iii）仍然足够快，可以满足要求苛刻的实时应用。 请参阅补充材料（E节）以获取有关实施的低级详细信息.

**重要抽样** 为了在渲染过程中使用近似值的一维函数（例如等式5中的ap）计算卷积，需要将它们离散化。 通常，这些函数显示出非常不均匀的能量分布，因此，均匀的离散化将需要高分辨率才能获得可接受的质量，这会对性能产生重大影响，或者在使用较低分辨率时会导致混叠。 为了解决这个问题，我们通过在中心附近分配大量的采样点来对一维函数进行重要性采样，在该中心可以找到大部分信号能量。

为了使执行时间和内存访问次数最小化，我们在主导通道确定的相同位置对所有通道进行采样。 在图11中，我们展示了重要性采样与地面真实采样和均匀采样相比的图像质量差异。 在自然光下拍摄的特定肖像中，使用7个具有重要采样的样本可以真实地表示皮肤表面下的散射。 此重要性采样还可用于提高先前方法的质量，例如高斯和方法[dLE07，JSG09]。