体积渲染被广泛用于检查来自扫描仪和直接数值模拟数据集的3D标量场。体积渲染的一个关键方面是提供着色提示以帮助理解数据集中包含的结构的能力。虽然已显示出可重现自然光照条件的着色模型可以更好地传达深度信息和空间关系，但传统上它们需要大量的（预）计算。在本文中，我们提出了一种用于交互式直接体积渲染的新颖着色模型，该模型为固体和透明表面状特征提供了类似于环境光遮挡的感知提示。基于专门的相位函数，从辐射传输方程得出图像空间遮挡因子。我们的方法不依赖任何预计算，因此可以通过动态编辑阴影模型参数或（多维）传递函数来进行体积数据集的交互式探索。与环境光遮挡方法不同，将对体积的修改（例如裁剪平面或传递函数的更改）合并到生成的基于光遮挡的着色中。

1 介绍

体积渲染被广泛用于检查来自扫描仪和直接数值模拟数据集的3D标量场。体积渲染的一个关键方面是提供着色提示以帮助理解数据集中包含的结构的能力。如第2节所述，已经提出了各种阴影模型来提高体积中复杂特征的可理解性。特别是考虑到特征的相对空间排列的方法已成功应用于提高体积数据集的可视化质量[LB00]。

这种技术的一个示例是环境光遮挡，它是从球形环境光源以均匀的强度包围整个场景到达某个点的光量。 周围区域的光源使遮挡结构将柔和的阴影投射到场景的特征上，从而向观察者提供有关其相对空间布置的关键线索。

计算环境光遮挡是非常具有挑战性的，因为所需的有关体积的全局信息使任务的计算量很大，并且通常涉及预计算作为使该技术可行的方法。然而，昂贵的计算与对具有用户灵活性的交互式体绘制技术的期望相冲突。允许更改传递函数或剪切平面可以避免进行昂贵的预计算，并且有必要为每个帧重新计算着色参数。

本文提出了一种新的基于遮挡的着色方法，该方法产生与环境遮挡类似的深度提示。所提出的方法以交互方式呈现遮挡效果，从而允许用户驱动的多维传递函数的操纵，这已被证明可以改善复杂成分数据集[KKH02]中材料的分类。 用户放置的剪切平面被合并到遮挡效果的计算中。当需要同时显示多个遮挡表面时，对透明的透明表面和实心表面进行着色处理可以提供更多的见解，并且具有高特征复杂性的体积数据集会从所提出的方法中受益。

本文的结构如下：下一节包含有关工作的讨论，重点是体积照明和着色模型。第3节从辐射传输的物理原理派生了方向遮挡着色方法，并概述了集成到基于切片的3D纹理体积渲染器中的方法。在第4节中介绍和讨论结果，然后在第5节中给出结论和未来的工作。

2 相关工作

在体绘制过程中使用的着色模型在帮助用户在探索体数据集期间获得洞察力方面起着至关重要的作用。光传输的简单近似（例如发射吸收模型[Max95]）或局部照明着色模型（例如Blinn照明模型[Bli77]）为许多体绘制系统奠定了基础，这是因为它们的计算成本低且实现简单。

但是，周围特征的光线贡献提供了重要的感知线索，支持了对体积数据集中复杂特征的理解和认知。阴影已被合并到体绘制系统中，作为获取其他照明和遮挡信息的基本方法，例如 作为预先计算的阴影量[BR98]，图像空间阴影图[KKH02，DEP05，HKSB06]的变化或通过射线投射[RKH08]。

近来，尤其是对于多边形几何体，环境光遮挡方法已受到相当大的关注，因为它们提供了昂贵的预处理步骤，该方法可以在均匀的漫射照明下以比完全全局照明便宜的成本来逼真的遮挡场景。在这里，我们将只讨论用于体积渲染的环境光遮挡技术，并向读者介绍有关环境光遮挡技术的最新研究[AMFS08]。

邻近着色[Ste03]方法通过考虑周围体素的密度,确定每个体素的附近值作为预处理步骤。密度高于当前体素密度的体素被认为是遮挡的。在计算邻近值时，不会考虑当前体素和阻塞体素之间路径上的其他体素。然后，在渲染期间将附近值的体积用作着色方程的一部分。遮蔽阴影[RBV \* 08]通过在计算邻近/遮蔽值时考虑体素与其遮挡体素之间的距离来一般化“邻近着色”技术。它还允许简单而低成本的颜色渗色实现。但是，当体积分类参数（例如iso值或传递函数）发生变化时，这两种方法都需要重新计算附近/暗度值。邻近遮挡映射[DYV08]通过将深度值与周围平均深度值进行比较来计算光晕，从而计算图像空间中的邻近着色，以作为附近遮挡体素布置的度量。

Hernell等人[HLY07]通过在球形光源的照明下考虑每个体素周围区域中的体素来计算局部环境光遮挡近似值。他们向这些球投射一些方向的光线，并沿它们整合光学深度，以减弱光强度并增加发射贡献，这些贡献被存储为体积纹理。他们利用基于多分辨率块的数据结构和欠采样空间来加快照明量的计算。更改传递函数会通过向解决方案逐渐添加更多射线方向以及对基于块的数据结构的重新计算（由于它们依赖于传递函数指定的体素不透明度）而导致对环境和发射照明量的交互式增量精化。随后的出版物[HLY08]用全局着色和一阶散射效果扩展了该局部环境光遮蔽着色。他们重用局部环境光遮挡的计算结果，通过分段积分来计算全局着色效果。全局着色和一阶散射效果存储在较高分辨率的基于块的数据结构中。

Ritschel [Rit07]考虑了在由环境图表示的远距离球形照明下的体积数据集的照明。 通过对沿每个体素发出的数百条光线的透射率进行积分来计算可见性函数。空间欠采样与通过分层数据结构（称为不透明度图）的自适应遍历结合在一起，可用于加速可见性函数的计算。可见性函数和环境图的球谐分解可以在直接体积渲染过程中有效存储和评估低频间接照明值。更改传递函数需要几秒钟来重新计算可见性函数。

Desgrange等人[DE07]使用由不同滤镜大小模糊的不透明度体积的线性组合，通过周围体素的平均不透明度来近似遮挡。 他们使用总面积体积来加速平均不透明度体积的计算，在传递函数更改后需要重新计算它们。

可过滤的遮挡图[PM08]将邻域中的遮挡体素数量视为遮挡的度量。与方差阴影贴图[DL06]类似的方法用于表示有关相邻体素的统计信息，并使用它们来计算等值面渲染期间的环境光遮挡和软阴影效果。可过滤的遮挡图（双峰分布的分层表示）的计算在最近的GPU上交互运行。但是，仅当数据集表现出两个明显可分离的密度值簇（如在CT扫描中经常发现但在MRI扫描中却很少见）时，这种统计近似才有效。可以选择任意等值，但是等值越接近假定的概率分布的平均值，表示就越不准确。他们表明可以将可过滤的遮挡图与直接体积渲染结合使用，但部分透明的材质不会影响遮挡的计算。

Ropinski等人[RMSD \* 08]作为漫长的预计算步骤，独立于特定的传递函数来计算和量化相邻体素的配置。将这些预先计算的值与传递函数结合使用，可使它们以交互方式呈现环境光遮挡和颜色渗色效果。与他们的方法相反，我们支持多维传递函数和后分类。

3 定向遮挡着色

所提出的定向遮挡着色模型捕获了由环境遮挡技术的软阴影效应引起的重要感知线索，而不必评估过于昂贵的全局环境遮挡解决方案。与以前只考虑球形邻域局部遮挡的方法不同，我们考虑了点与环境光之间的所有特征。但是，如图2所示，我们没有使用整个相位上的光遮挡，而是使用了专门的相函数，即用户指定的孔径角的后向锥相函数。这在本质上与光传输角相似用于交互式渲染散射效果[KPH \* 03]或艺术家用于控制离线图像生成中环境光遮挡效果的圆锥角[Chr03]。使用蒙特卡罗射线追踪对各向同性的相函数（图4（a））进行定向遮挡（图4（b））和体积环境遮挡进行经验比较。尽管结果有所不同，但我们的专用相函数能够以类似于完全环境光遮挡的方式突出显示感兴趣的功能以进行可视化。

如第4节所述，通过更改圆锥体的孔径角，可以改变特征在不同距离处的影响，从而允许用户在可视化局部结构和全局结构之间选择一种平衡。尽管更接近光传输的物理原理，但是对遮挡的完整评估会限制这种灵活性。

3.1 辐射传输方程

通过辐射传输方程（RTE）[CPCP \* 05]来描述沿原点和方向的射线穿过参与介质的射线积分的辐射: