

# Multi-Material Volume Rendering with a Physically-Based Surface Reflection Model

Dezeming Family

2023年8月3日

正常字体：表示论文的基本内容解释。

**粗体**：表示需要特别注意的内容。

**红色字体**：表示容易理解错误或者混淆的内容。

**蓝色字体**：表示额外增加的一些注释。

**绿色字体**：表示额外举的一些例子。

## 目录

<b>一 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>二 RELATED WORK</b>	<b>1</b>
2 1 传输函数	1
2 2 Accurate Rendering of Isosurfaces	2
2 3 Representation of BRDFs	2
<b>三 METHODOLOGY</b>	<b>2</b>
3 1 Multi-Material Transfer Function	3
3 2 Definition of Optical Properties	3
3 3 Handling Lighting Discontinuities	3
3 4 Spatially-Varying Materials	4
3 5 Spline BRDF Representation	4
3 6 Creation of New Scattering Functions	4
参考文献	4

# abstract

现有的光-材质相互作用技术在处理高频真实世界材质数据的能力方面受到限制，并且当前对体数据的处理很难支持表面材质的正确集成。

在本文中，我们介绍了传输函数的另一种定义，该定义支持体分量之间边界处的类表面行为和内部的类体行为。我们展示了该定义可以使用高质量的真实世界材质数据进行多材质渲染。

我们还表明，这种方法为通过等值面技术进行预积分(pre-integrated)渲染提供了一种有效的替代方案。

我们引入了任意空间变化的材质，以实现扫描的体数据更好的多材质支持。

最后，我们证明了可以将任意参数集直接映射到材质表示，以更直观地创建新材质。

## 一 Introduction

虽然基于表面的交互很重要，但也有必要处理同质区域的情况，因为在同质区域中，反射等值面效果可能会有噪声（由于法线定义不好）。光在这些区域中的散射延伸到整个球体，并由相位函数定义。

与等值面提取相反，我们的方法可以快速准确地绘制曲面和均匀区域，而不需要额外的多边形存储空间。

虽然现有方法可以扩展传输函数以映射到高级渲染特性，但它们假设这些特性对于体的给定子区域是恒定的；相反，我们引入了一个传输函数，它可以为子区域及其边界分配不同的性质，我们还将其扩展到考虑空间方差。我们还讨论了高质量交互式渲染所需的优化。

我们将我们的方法实现并集成到体光线投射器中，该投射器支持其他增强的真实感的技术，如全局照明。虽然这些技术是对我们工作的更好的表现，但我们的方法其实并不需要它们。我们通过对几个真实世界的体数据集进行可视化，并通过使用真实世界的材质数据，展示了我们的方法增强的渲染能力。具体而言，我们的工作作出了以下贡献：

- 我们扩展了体渲染传输函数来区分曲面和均匀区域。
- 我们展示了通过这个扩展，我们可以使用等值面技术进行高质量渲染，例如使用多个测量的BRDF进行着色。
- 我们引入了空间变化的材质，这些材质可以定义为3D位置的函数，既可用于引入纹理，也可用于实现classification（就是传输函数的属性映射）。
- 我们介绍了一种方法，允许用户在创建新材质时使用任意一组参数，而不依赖于底层表示。

## 二 RELATED WORK

### 2.1 传输函数

在这项工作中，我们扩展了显式传递函数，允许从材质之间的边界进行映射，并映射到完整的光学描述。

我们将空间变化传输函数定义为体素的最终光学特性直接取决于其空间位置的传输函数。最简单的实现是剪裁平面，它将给定半空间中的体素设置为完全透明。另一种常见形式是分割体，其中使用附加信息将体素位置映射到特定分类。

纹理传输函数的使用是空间变化传输函数的另一个例子；Manke等人使用一种传输函数，该函数将权重提供给几个样本(exemplars)，然后将这些样本合成为3D传递函数，并用于调制最终图像颜色。

其他工作也试图将2D或3D纹理直接应用于体，如Ropinski等人。然而，在这些示例中，空间方差仅用于访问最终纹理，而不是作为对体进行分类的手段。另一个例子是局部传输函数，用户可以选择拓扑定义的体组件，为其提供单独的颜色。然而，这些组件是由体拓扑预定义的，不能拆分。

如果第三种材质出现在两种材质之间的密度区域中，并且它们之间存在连续插值，则在对两种材质的边界区域进行分类时会出现一个问题；这在边界处产生第三材质的薄片(thin sheet)。Lindholm等人提出了一种方法，在数据在区域之间有明确边界的情况下，半自动地解决了这个问题。我们的空间变化方法依赖于更多的用户交互，但即使体本身包含更平滑的过渡，也能够清洁用户指定的边界。

## 2.2 Accurate Rendering of Isosurfaces

一种方法是通过诸如marching cubes的方法提取多边形数据集；然而，当与半透明体一起使用时，这可能会导致复杂性，并且只假设数据值的线性插值。

另一种方法是通过体渲染结合使用等值面位置的分析解决方案；然而，这种解决方案需要在使用硬件纹理过滤时对额外的数据点进行采样，以及三次函数的解决方案。

Hadwiger等人使用割线法(secant method)来寻找精确的等值面位置，这可以避免额外的纹理查找。割线方法也被扩展为通过峰值发现(peak finding)精确渲染更通用的1D传递函数，作为预积分的替代方案，然而，该实现使用了与预积分成本相似的2D可查找函数，并且只考虑局部最大值；我们的方法只使用所有不连续性的1D表，这些不连续性在我们的传递函数中是明确的。

## 2.3 Representation of BRDFs

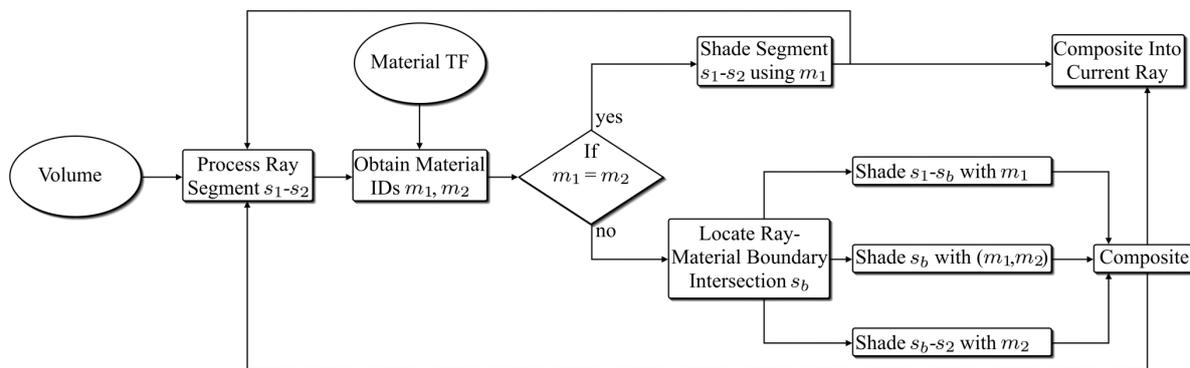
Matusik等人提出了一种基于样本的BRDF模型，该模型首先将非线性降维方法应用于一组测量实例，以产生多种可能的BRDF。然后，用户选择一组用于生成新BRDF的参数，并指定每个参数中有多少存在于每个现有BRDF中；然后使用支持向量机沿着非线性流形移动以生成新的BRDF。这种方法与以前的技术的不同之处在于，它能够在没有明确测量的情况下创建一组真实的BRDF。

用于拟合测量BRDF的一个模型是Park和Lee的B样条表示，该模型在每个维度上迭代，并将样条拟合到上一次迭代中使用的数据点或控制点。虽然这种方法能够产生良好的结果，但使用可变节点位置(variable knot locations)可能会导致在这种表示中直接创建新的BRDF的困难。

我们在自己的工作中使用了这种表示的修改版本；第3.5节详细讨论了我们的变更。我们引入的变化之一是使用滤波函数来提高精度。Bagher等人已经提出通过函数过滤BRDF。我们的滤波函数与该函数的不同之处在于，与从高强度BRDF样本中重新加权相比，它试图使BRDF更容易通过样条拟合。

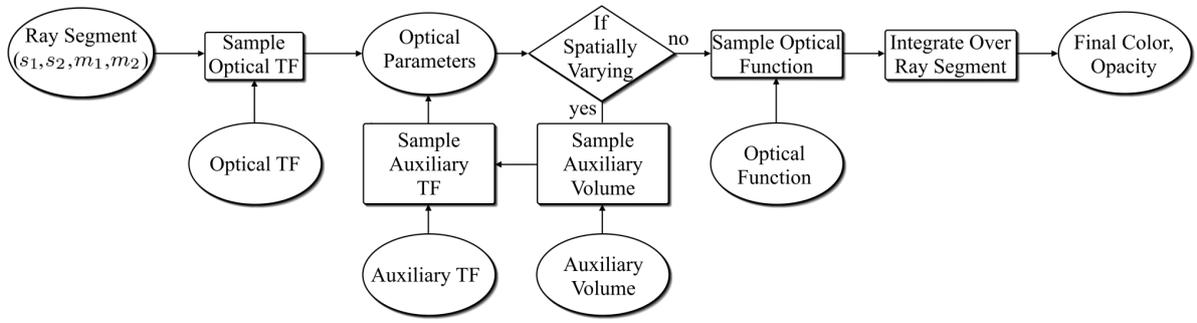
# 三 METHODOLOGY

每个光线段(Ray segment)的表示如下图：



$s_1$ ,  $s_2$ 表示光线段(Ray segment)的两个端点， $m_1$ ,  $m_2$ 表示两点的材质ID。当 $m_1$ 和 $m_2$ 不同的时候，说明线段中间有不同材质的交点，则需要分段着色然后再组合。

着色一个光线段的过程见下图，其中。矩形节点表示操作，椭圆节点表示数据，菱形节点表示条件分支：



在着色中，当前光线段的材质ID用于对光学传输函数进行采样，该函数提供用于获取段的最终颜色和不透明度的变量。这些变量可以定义空间变化的材质，在这种情况下，使用辅助体来细化光学特性的选择。

最后，在返回最终值之前，光线的长度用于处理积分过程中的不透明度校正。请注意，我们使用的术语“材质”是指制作部分体的物理材质，在方程中表示为ID。BRDF、颜色和不透明度等渲染参数被描述为光学特性。光学函数(Optical functions)可以指BRDF或相位函数。

辅助体和TF可以针对每个空间变化的材质来单独定义；通过空间变化的材质循环的每次迭代都设置一组新的光学参数，并丢弃以前的参数。

### 3 1 Multi-Material Transfer Function

首先定义符号：

$$\vec{\rho} = f(\vec{x})$$

$$T(\vec{\rho}) = \vec{L}$$

其中， $\vec{x}$ 是三维空间中的位置； $\vec{\rho}$ 是采样到的体数据值； $\vec{L}$ 是渲染的参数集； $T$ 表示传输函数。

一般来说我们都认为体素使用共同的材质集（只是材质albedo或者粗糙度参数等会变化），我们可以把材质的传输函数映射表示为：

$$T_{mat} : \vec{\rho} \rightarrow m$$

$$T_{opt} : m \rightarrow \vec{L}$$

传统的每个射线样本只观察其当前所在的材质。不幸的是这阻止了材质之间界面发生独特相互作用的可能性：某些光学效应，例如反射，通常只发生在这些边界处，这些边界也表示体的等值线。

我们重新定义了 $T_{opt}$ ：

$$T_{opt} : (m_s, m_e) \rightarrow \vec{L}$$

下标 $s$ 和 $e$ 分别是光线段的start和end。

可以用于通过将入口大小写指定为完全透明来移除曲面的“正面”部分，从而减少遮挡；用于编辑光学传输函数和相关光学特性的用户界面。

### 3 2 Definition of Optical Properties

我们用 $\vec{L}$ 来表示材质的吸收、发射和散射特性。发射特性是定义常量发射光量的简单值，而散射和吸收特性由未归一化的散射函数表示。为了合并多种类型的散射函数，我们对每组参数使用ID pair中间表示：与所使用的特定散射函数相对应的模型ID和与其参数相对应的材质ID。

### 3 3 Handling Lighting Discontinuities

虽然光线采样在无限采样率下正常工作，但当光线长度明显较大时，会出现采样不足的伪影。这些伪影表现为由光线端点处的着色引起的照明不连续，以及由光线段不正确地积分光学特性引起的条纹。虽然预积分可以用来缓解带状问题，但它不能完全处理任意照明的照明不连续性。

因为我们使用传输函数明确地对材质进行分类，所以我们有可能计算出材质界面处边界表面的正确位置；这使我们能够为这些边界实现正确、平滑的照明。然后使用表面位置来正确地沿射线积分光学特性，而无需计算或存储预积分表。

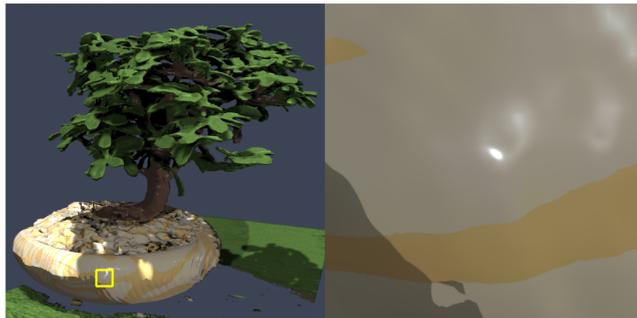
$$\vec{x} = \vec{r}_0 + \vec{dt}$$

$\vec{r}_0$ 是光线原点。

使用割线法来找到比较准确的表面位置。

### 3 4 Spatially-Varying Materials

使用辅助体来控制空间变化的材质，比如bonsai数据集上的条纹：



使用一个recursive optical 传输函数， $\vec{L}$ 对应于一系列辅助体和辅助传输函数。当在某点采样返回空间变化的材质时，就在辅助体上进行采样，以返回一组新的体参数 $\vec{p}$ ，然后又在辅助传输函数中采样得到新的光学特性 $\vec{L}$ 。

### 3 5 Spline BRDF Representation

使用样条函数来插值真实世界测量的BRDF。

### 3 6 Creation of New Scattering Functions

用户创造新的材质。生成方法包括两个阶段：在第一阶段中，用户加载将用于训练的所有散射函数以及将用于在这些函数之间插值的一组参数；参数的选择在很大程度上是任意的，只要在训练数据集中沿着该参数存在有意义的变化。然后，用户必须为每个散射函数的每个参数分配一个0 – 1值，表示该参数在给定函数中的存在。在选择这些参数后，使用普通最小二乘法（OLS）从用户选择的参数和常数映射到创建新材料时使用的那些变量。在第二阶段，用户使用滑块为其给定参数选择值，这些值乘以OLS系数以产生用于创建新材料的函数变量。因为均匀改变不透明度的能力在体积可视化中非常重要，而且在测量的BRDF中没有很好地表示，所以我们单独实现了这一特性，以确保拟合质量不会影响最终结果。对于样条曲线表示， $x_{max}$ 也是单独实现的。

## 参考文献

- [1] Igouchkine O , Zhang Y , Ma K L .Multi-Material Volume Rendering with a Physically-Based Surface Reflection Model[J].IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2017, PP(99):1-1.DOI:10.1109/TVCG.2017.2784830.