

题 目 基于VTK的三维可视化平台开发

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

计算机科学与工程院（系）计算机科学与技术专业

学 号 09015322

学生姓名 贺建安

指导教师 唐慧

起止日期 2019年2月 至 2019年5月

设计地点 东南大学九龙湖校区

摘 要

传递函数是直接体绘制的核心，它决定着最终的绘制效果。传统的以用户为中心的交互式传递函数设计是一个不断试验的过程，存在一定的盲目性，且难以设计出以不同样式来绘制不同组织结构的传递函数。本文基于VTK与Qt设计了一个三维可视化平台，

在传递函数设计方式上，平台既提供了友好的用户交互式设计方式，也提供了基于体数据分析自动生成传递函数的设计方式。两种方式相互融合，使得交互复杂度与数据分析计算量都大大降低，且所有的交互设置结果与数据分析结果都可以实时地在切片图或体绘制图上得到反馈。

在可视化边界的传递函数生成过程中，本文使用非结构化数据存储阈值过滤后的体数据，采用K-Means算法，结合边界的梯度幅值的属性，生成基于灰度值与梯度幅值的二维不透明传递函数，用于绘制用户感兴趣区域的边界。

此外，通过可视化传递函数，用户可以对传递函数进行微调，调节结果实时反馈在体绘制图上。也支持多个感兴趣区域、多个感兴趣区域边界以及多个体数据集的叠加绘制。

关键词：直接体绘制，传递函数，边界可视化

Abstract

In this thesis, the rheological behavior of semi-solid ZA12 alloy was investigated using a specially designed high temperature Couette rheometer.

The evolution of shear stress with time and the hysteresis loops of semi-solid ZA12 alloy were measured and analyzed. The results show that semi-solid ZA12 alloy possesses the thixotropic property, which varies with solid fraction and shear rate. In addition, the semi-solid ZA12 alloy slurry exhibits different rheological behaviors under steady state and transient state conditions. In case of steady state, the apparent viscosity of semi-solid ZA12 alloy decreases with the increase of shear rate, showing the pseudo-plastic rheological behavior. However, under the transient state condition, it presents the dilatant rheological behavior, i.e. the apparent viscosity increases as shear rate increases.

Finally, based on the transient state experimental results and rheology theory, a dynamic rheological model of semi-solid ZA12 alloy was developed, which could be applicable to practical semi-solid processes.

KEY WORDS: semi-solid, ZA12 alloy, thixotropic behavior, rheological behavior, apparent viscosity, rheological model

目录

[摘 要 2](#_Toc8243001)

[Abstract 3](#_Toc8243002)

[第一章 绪论 1](#_Toc8243003)

[1.1 研究背景与意义 1](#_Toc8243004)

[1.2 三维可视化的研究现状与发展趋势 2](#_Toc8243005)

[1.3 论文的主要内容与组织结构 3](#_Toc8243006)

[第二章 相关知识 4](#_Toc8243007)

[2.1 光线投射算法 4](#_Toc8243008)

[2.1.1 光照模型 4](#_Toc8243009)

[2.1.2 基本原理 6](#_Toc8243010)

[2.1.3 算法改进 9](#_Toc8243011)

[2.2 传递函数定义 9](#_Toc8243012)

[参考文献： 10](#_Toc8243013)

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing)是一个于20世纪80年代被提出并迅速发展起来的一个研究领域。它指的是运用计算机图形学和图像处理技术，将科学计算过程中及计算结果的数据转化为图形或图像在屏幕上显示出来并能够进行交互处理的理论、方法和技术[1]。借助科学计算可视化，人们可以更加直观地理解计算过程中的数据变化，加以交互实现对计算过程的引导与控制，直观的图像或图形可视化也能帮助人们更好地理解数据中所蕴含的抽象信息。

科学计算可视化的核心是三维空间数据场的可视化，又称三维体数据可视化，是一种将三维体数据在二维平面上进行投影的技术，它被广泛应用于医疗、地质勘探、气象分析等领域。实现三维体数据可视化的算法可分为两类，一类是基于中间几何图元的面绘制方法，另一类是直接基于三维体数据的体绘制方法。

面绘制即是以等值面的形式来绘制三维模型，其优点是计算量较小，但无法反映整个原始数据场的全貌及细节，且该方法始终存在等值面分类的歧义性问题，因此当数据场较为复杂时，往往会生成不存在的伪表面或在现实面上产生空洞[3]。

体绘制是直接为三维体数据场中的体素分配颜色与不透明度等光学性质进行绘制，而不需要进行中间图元的转换，因此也被称为直接体绘制(Direct Volume Render, DVR)。直接体绘制不仅能够展现出表面轮廓，也能清晰地还原出立体细节，不会造成数据的丢失。因此，在例如医学图像三维重建等对可视化效果要求较高的应用领域，直接体绘制往往是首选的可视化技术。

传递函数是直接体绘制的基础，它的本质作用是将颜色与不透明度等光学性质分配给体素数据，从而使数据可视。良好的传递函数可以揭示数据中的重要结构，而不会用不重要的区域来模糊它们[6]。因此，传递函数的设计，决定着直接体绘制的最终绘制效果。然而，要找到一个能够满足用户预期绘制效果的传递函数往往是一个挑战，原因主要体现在以下四个方面。其一，传递函数的优劣无法通过量化的指标来评定，人们往往只能通过观察直接体绘制最终的绘制效果，来间接地判断传递函数的设计是否合适，存在一定的主观性；其二，传递函数的调节不受原数据集的约束或指导，这迫使用户进入一个不断实验的交互模式，在这种模式下，只有通过观察由于增量调整而导致的绘制效果的变化，才能探索传递函数域[6]；其三，传递函数的调节自由度很大，从三维体数据场中的各种标量值到各种光学性质存在多个映射函数，映射关系与绘制效果之间也没有绝对的规律可寻，传递函数的细微变化可能会导致绘制效果的巨大差异，调节具有盲目性；其四，传递函数往往是作用于整个三维体数据场，它的定义域并不包含空间位置，因此当用户从空间位置上来确定感兴趣区域时，是很难通过设计传递函数来实现区域分割的。因此，如何设计一个好的传递函数，已经被列为三维体数据可视化研究中的十大难题之一[7]。传递函数设计有着重要的研究意义与急迫的研究需求，这也是本文的研究重点。

## 1.2 三维可视化的研究现状与发展趋势

作为科学计算可视化的关键问题，三维体数据可视化一直是一个研究热点。目前较为成熟的直接体绘制算法有：光线投射算法(ray-casting)、抛雪球算法(Splatting)、错切-形变算法(Shear-warp)与3D纹理映射(3D Texture Mapping)，其中绘制图品质最高的是光线投射算法[4][5]。光线投射算法是基于物理光线模型，把每个体素看作是可以发射、反射和吸收光线的粒子，依据体素的介质特征得到它们的颜色与透明度，并沿着视线观察方向积分，最后在绘制窗口形成具有半透明效果的图像[5]。且该算法可并行计算，随着图像处理器的并行处理能力的提升，使用该算法进行三维体绘制时，用户可实时地对绘制图进行旋转、缩放等交互行为。

虽然直接体绘制算法已经在绘制效果与交互速率上满足可视化的要求，但是作为直接体绘制的基础，传递函数的设计依然是一个瓶颈，限制着体绘制的发展。传递函数的设计方法可分为四大类：手动调节法、图像中心法、数据中心法和对象中心法[8]。

(1)手动调节法是最原始也是最基础的传递函数设计方法。该方法在设计过程中，需要用户不断地去调节传递函数的参数，同时增量地观察绘制图的变化，直到绘制效果满意为止。该设计方法给予用户的自由度最大，所需的计算量也最小，但是需要耗费用户大量的时间与精力去调节，效率最为低下。但大部分提供三维可视化功能的软件中都会提供这种设计方式，以保证用户对体绘制效果的自由控制。

(2)图像中心法的关注对象是体绘制图像。该方法让用户评估一系列具有不同绘制效果的体绘制图，通过用户的评估来改变传递函数，再生成新的体绘制图让用户进行评估，直到得到用户最满意的绘制效果。The Design Gallery是这种方法的代表，它基于自动化分析与已绘制图像，为所有可能的传递函数域创建了一个直观的接口供用户选择[9]。该方法的关键是用户的评估以及根据评估修改传递函数的方式[8],其本质是以最小化信息熵的形式构建用户输入的反馈过程，可归结为优化问题[10]。

(3)数据中心法是关注的是三维体数据本身的数据特征。传递函数的定义域一般是灰度值，梯度幅值等三维体数据场中的局部数据属性，由这些局部数据计算得到的全局数据属性，如等值面、边界面和拓扑结构等，往往标识着三维体数据中某一特定的结构，因此可利用这些全局特征来指导传递函数的设计。Kindlmann等人提出的一种半自动生成传递函数的方法[11]，就是利用原数据集中的灰度值，梯度幅值以及二阶梯度幅值组成的直方体(Histogram Volume)来定位边界，从而设计出能够绘制物质边界的传递函数。

(4)对象中心法是先对三维体数据场中的体素进行分类，再对不同的类别分配不同的颜色与不透明度等光学性质。该方法的关键是分类。Tzeng等人提出一种类似于K-Means聚类的无监督机器学习算法ISODATA[12]，该算法根据空间距离对三维体数据进行分类，并提供交互方式使用户可以直接对分类结果进行修改。近年来，随着机器学习的兴起，越来越多的基于机器学习的对象中心设计方法被提出。Tzeng等人基于最简单的BP网络，通过用户选取的感兴趣区域采样点及不感兴趣区域采样点来训练网络，实现分类[13]。HC Cheng等人使用卷积神经网络从三维体数据中自动地提取高层次的分类特征，指导传递函数的生成[14]。本质上，该设计方法可以看作是数据中心法的扩展，因为都是根据体数据自身的特征来指导传递函数的设计。

综上所述，传递函数的设计方法研究一直是三维体数据可视化的一个研究热点，更智能、更友好、更高效的设计方式不断被提出。而随着三维体数据的数据量的增加，数据结构复杂度的提升，以及实时可视化的需求，传递函数设计将会有以下几个研究方向：(1)基于压缩的原数据进行传递函数设计。超高分辨率的体数据集常以压缩格式保存，基于压缩数据设计传递函数，可大大节省存储空间与绘制时间；(2)多维传递函数的设计与简化。更高维的传递函数可以表示更多的特征，从而能更精细地进行绘制，但设计的复杂度与计算量也随之提升，因此在传递函数维度的选取上需要做到最优；(3)融入用户视角。三维体绘制是根据用户视角展现一部分数据场，将视角融入传递函数的设计，可以在非交互式的三维体绘制中通过最佳视角，展现重要的数据特征。

1.3 论文的主要内容与组织结构

第二章 相关知识

三维体数据场是通过对三维连续空间进行等距采样，得到的一种由均匀规则网格组成的结构化数据，每个网格顶点为一个采样点，称为体素(Voxel)，是三维体数据场的基本元素。三维体数据场的函数值分布于每个体素中，即数据场中位于顶点处的函数值为 (如图2.1所示)。通过计算机断层扫描(CT)或磁共振成像(MRI)得到的二维图像序列组合而成的数据就属于这一类型。

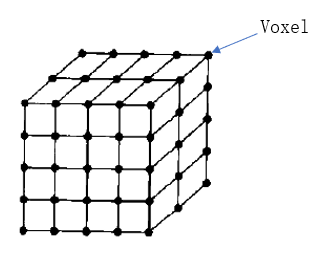


图2.1 三维体数据场示意图

直接体绘制算法(以下简称体绘制算法)以其高质量的成像品质，在三维体数据可视化领域中被广泛使用。体绘制算法的实质是将离散的三维体数据场按照一定规则，转换为二维离散信号，即每个像素点的RGB颜色值，存储到图形显示设备的帧缓冲中。本章将详细介绍光线投射体绘制算法，以及决定其绘制效果的传递函数的定义。

## 2.1 光线投射算法

如前所述，体绘制算法是将三维空间的离散数据按一定规则转化为二维离散信号，转化过程中，需要对三维体数据进行重采样，然后计算每个采样点对二维图像像素的贡献，并将将所有贡献进行合成。光线投射体绘制算法是M.Levoy等人于1988年提出，是一种基于图像空间扫描，应用光学模型进行图像合成的体绘制方法[2]。本节将首先介绍常用的几种光学模型，在此基础上介绍光线投射算法的基本原理，最后简要介绍光学投射算法的几种改进方法。

### 2.1.1 光学模型

三维体数据场中的数据原本是不具备颜色属性的，它们的颜色值通过传递函数进行映射的。体绘制中，计算每个采样点对二维图像像素的贡献时，就是在计算每个像素的光强度值I(Intensity)。在灰度图像中，I表示的就是灰度值，I=0表示黑色，I=1表示白色。在彩色图像中，红、绿、蓝三个分量都有各自的I值。

为了计算各采样点光强对二维图像像素的贡献，我们需要给出光学模型，用来描述三维体数据场是如何产生、反射、散射以及吸收光线的。

Nelson Max在“Optical models for direct volume rendering”一文中提出假设：“空间中连续分布的三维数据场中充满着小粒子，由于这些小粒子的发光、吸收、反射等功能使得光线通过三维数据场时发生了变化”。基于这一假设形成了几种不同的光学模型。

1. 光线吸收模型

假设三维空间中的小粒子可完全吸收所接收的光线，而无发射或反射光线的能力。基于这一假设就构成了一个光线吸收模型，这是最简单的一种光学模型。光线吸收模型中，光线通过三维数据场时，光强的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.1) |

式中，为光线沿投射方向的行经长度，表示入射点的初始光强，表示光线与入射点距离时的光强。是光强的衰减系数，与三维空间中的粒子密度，以及每个粒子的投影面积成正比。令

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.2) |

表示光线穿越体数据场距离后的强度衰减率，也称为透明度。体绘制中，常使用来表示不透明度：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.3) |

体绘制中，通过不透明度传递函数来指定三维体数据场中数据的不透明度。若将设为1，则表示该数据代表的物质完全不透明，穿过它的光线会被完全吸收，因此在绘制时，位于在该物质后面的物质会被遮挡而不可见。反之，若将设为0，则表示该数据代表的物质完全透明，绘制时该物质不可见。

1. 光线发射模型

在例如火焰、高温气体等物质的可视化中，可以假设三维空间中的小粒子是完全透明的，且自身可以发出光线，即小粒子只能发射光线，无法吸收光线。基于这一假设就构成了光线发射模型。光线发射模型中，光线通过三维数据场时，光强的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.4) |

式中，表示光强的增加率，与三维空间中的粒子密度，每个粒子的投影面积，以及每个粒子所发出的光强C成正比。

1. 光线吸收与发射模型

将光线吸收模型与光线发射模型组合在一起，可构成光线吸收与发射模型，即三维数据场中的小粒子既可以吸收光线，也可以发射光线，该模型可以更加真实地反映出光线在充满粒子的三维空间中的变化。光线吸收与发射模型中，光强的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.5) |

式中，表示不透明度。该式表示初始光强为的光线，通过所赋颜色值为，透明度为的物质后的光强。该模型可有效应用于通过CT或者MRI测量得到的三维医学数据的可视化中。

### 2.1.2 基本原理

光线投射体绘制算法的流程图如下图所示。

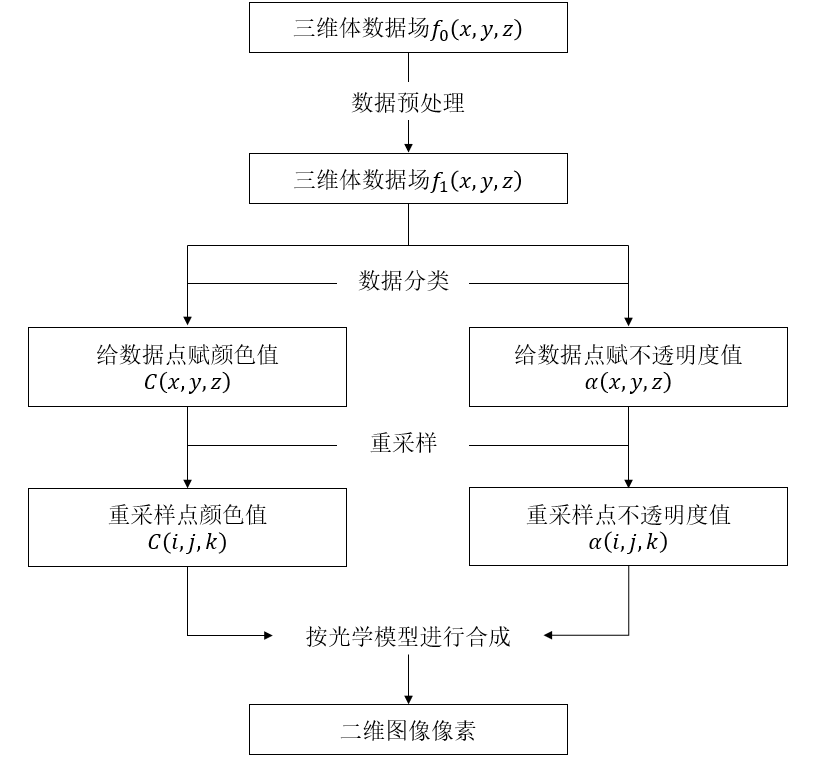


图2.2 光线投影算法流程图

数据预处理包括数据格式转换，冗余数据去除等操作。数据分类是根据三维体数据场中的数据特征，将体数据划分为若干个类，每一类赋予不同的颜色值和不透明度值，以求在可视化时表现出多种物质的不同分布，或同一物质的不同属性，具体的实现由传递函数来完成。接下来两个步骤是重采样与图像合成。

1. 重采样

使用光线投射算法进行可视化时，是从屏幕上的每一个像素点，沿着视线方向引出一条射线，这条射线穿过三维体数据场。由于三维体数据场中的原始采样点是离散且均匀地分布的在每个网格的顶点，穿越体数据场的射线不一定与原始采样点相交，因此要对三维体数据场进行重采样，以得到该射线与三维体数据场的交点。重采样时，沿着射线选择K各等距的重采样点，某个重采样点的颜色值与不透明度值可通过插值计算得到。下图是重采样的二维形式图解。

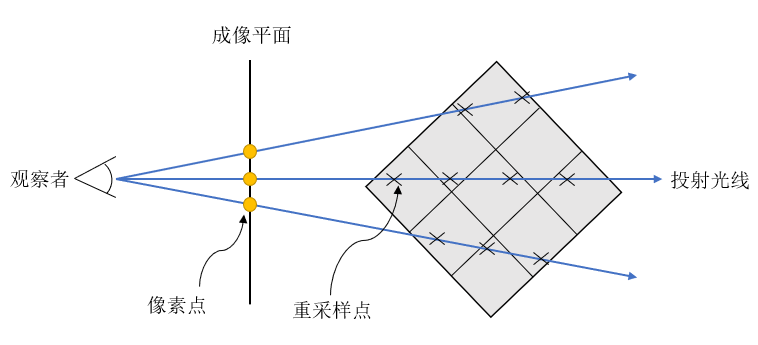


图2.3 重采样图解

三维体绘制中较为常用常用的插值方法有最近邻插值与三次线性插值。最近邻插值是直接将与重采样点最近的体数据点的颜色值及不透明度值赋给该采样点，该插值方法计算量较小，但可能造成数据值的不连续，从而在绘制图上出现锯齿；三次线性插值是首先定位到与重采样点距离最近的8个体数据点，然后根据距离对8个体数据点的值进行加权平均，得到重采样点的值。下图是使用三次线性插值进行重采样。

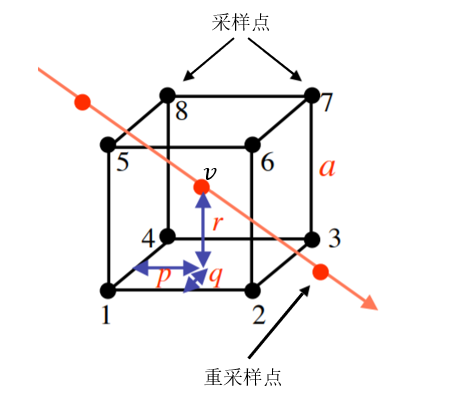


图2.4 使用三次线性插值进行重采样

对应的插值公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.6) |

式中，，，分别表示第个采样点与重采样点在，，轴上的距离，例如，。

1. 图像合成

通过插值计算得到一条射线上所有重采样点的颜色值与不透明度值之后，还需要将这些值由后向前或者由前向后进行合成，合成方法遵从光线吸收与发射模型。设第个重采样点的颜色值为，不透明度值为；进入第个重采样点的光线的颜色值为，不透明度值为；从第个重采样点出来的光线的颜色值为，不透明度值为。

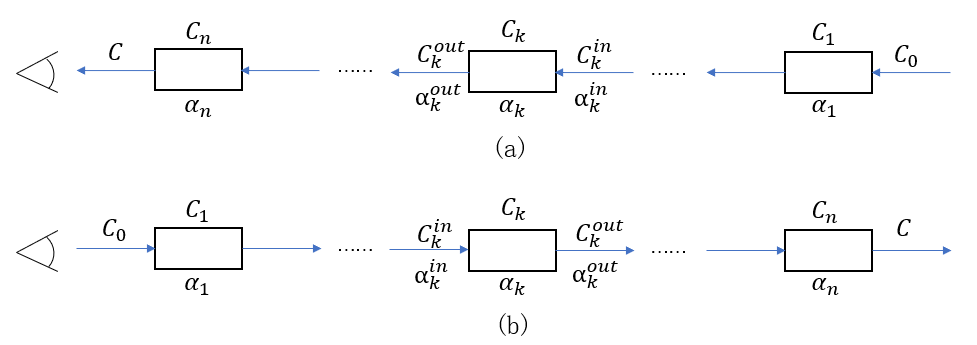


图2.5 图像合成示意图。(a)为由后向前合成，(b)为由前向后合成。

由后向前图像合成是沿着与射线相反的方向将各重采样点的颜色值与不透明度值进行合成，如2.5(a)所示。则依照式(2.5)可以得到合成公式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.7) |

设初始颜色值为，第个重采样点的透明度，将式(2.7)应用于所有重采样点后，可以得到最终合成的颜色值为为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.8) |

由前向后图像合成是沿着与射线方向将各重采样点的颜色值与不透明度值进行合成，如2.5(b)所示。合成公式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.9) |

使用式(2.9)沿射线方向逐重采样点计算最终合成的颜色值时，累积不透明度值是不断增加的，当趋近于1时，说明引出该射线的像素点已经几乎完全不透明了，则当前重采样点之后的点就不会再对该像素点的颜色值有所贡献了，因此可以不用计算了。相比于由后向前图像合成法，由前向后合成法可以省去无效的计算，速度较快，因此在体绘制算法中的应用更广。

### 2.1.3 算法改进

## 2.2 传递函数

如前所述，体绘制算法中的一个主要步骤就是根据三维体数据场中的数据属性进行分类，并为不同类别的数据分配不同的颜色与不透明度等光学属性。数据分类与光学属性分配是后续重采样以及图像合成的基础，决定着最终的绘制效果。从三维体数据场的数据属性到光学属性的映射，就是传递函数，可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.10) |

式中，表示三维体数据场的数据属性，作为传递函数的定义域；表示用于可视化的光学属性，作为传递函数的值域；表示从数据属性到光学属性的映射规则。传递函数的设计过程就是根据可视化需求，选择合适的数据属性与光学属性，并建立起它们之间的映射规则[8]。本节将详细介绍传递函数的这三个部分。

### 2.2.1 数据属性

(1)标量值

标量值是指三维体数据场中每个体素的数据值，是最简单、最常用的数据属性。标量值一般是通过仪器测量或者数值计算直接得到的数值，能够揭示数据所代表的物质的最本质特征。例如，通过读取人体CT图像序列得到的三维体数据中，标量值是图像的灰度值，而灰度值是各组织结构的CT值线性变化而来。不同的组织结构的CT值往往不同，因此，通过该三维体数据场中的标量值就可以直观地初步区分出人体的不同组织结构。只基于标量值的传递函数没有利用数据之间的特征，因此只能处理数据分布较为规整的简单三维体数据场。

(2) 梯度

通常来说，三维体数据场中，同一种物质内部的标量值很相似，而不同物质的标量值差异较大。因此，在不同物质的交界处，标量值的变化会比较剧烈。可以使用梯度来反映标量值的变化剧烈程度。对于离散的三维体数据场，最常用的梯度计算方法是中心差分法：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.8) |

### 2.2.2 光学属性

### 2.2.3 映射规则

# 参考文献：

[1] 唐泽圣.三维数据场可视化.北京：清华大学出版社，1999，1

[2] Levoy M. Display of Surfaces from Volume Data[J]. IEEE Computer Graphics & Application, 1988, 8(3):29-37.

[3] 范翠萍. 体绘制多维传递函数的设计方法研究[D].江苏科技大学,2011.

[4] Huang, Jian, Mueller, Klaus, Crawfis, Roger, Bartz, Dirk, Meissner, Michael. A Practical Evaluation of Popular Volume Rendering Algorithms[P]. Volume Visualization, 2000. VV 2000. IEEE Symposium on,2000.

[5] 张尤赛,陈福民.三维医学图像的体绘制技术综述[J].计算机工程与应用,2002(08):18-19+122.

[6]. Kniss, J., Kindlmann, G., Hansen, C.. Interactive volume rendering using multi-dimensional transfer functions and direct manipulation widgets[P]. Visualization, 2001. VIS '01. Proceedings,2001.

[7] H. Pfister , B. Lorensen, C. Bajaj. The transfer function bake-off[J]. IEEE Computer Graphics and Applications,, 2001, 21(1):16-22

[8] 周芳芳,樊晓平,杨斌.体绘制中传递函数设计的研究现状与展望[J].中国图象图形学报,2008(06):1034-1047.

[9] J. Marks et al., “Design Galleries: A General Approach to Setting Parameters for Computer Graphics and Animation,” Proc. Siggraph 97, ACM Press, New York, Aug. 1997, pp. 389-400.

[10] Li L, Peng H, Chen X, et al. Visualization of boundaries in volumetric data sets through a what material you pick is what boundary you see approach[J]. Computer methods and programs in biomedicine, 2016, 126: 76-88.

[11] Kindlmann G, Durkin J W. Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering[C]//IEEE Symposium on Volume Visualization (Cat. No. 989EX300). IEEE, 1998: 79-86.

[12] Tzeng F Y, Ma K L. A cluster-space visual interface for arbitrary dimensional classification of volume data[C]//Proceedings of the Sixth Joint Eurographics-IEEE TCVG conference on Visualization. Eurographics Association, 2004: 17-24.

[13] Tzeng F Y, Lum E B, Ma K L. A novel interface for higher-dimensional classification of volume data[C]//Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003 (VIS'03). IEEE Computer Society, 2003: 66.

[14] Cheng H C, Cardone A, Jain S, et al. Deep-learning-assisted volume visualization[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2019, 25(2): 1378-1391.

[15] Max N. Optical models for direct volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995, 1(2): 99-108.