

体绘制中传递函数设计的研究现状与展望

周芳芳¹⁾ 樊晓平¹⁾ 杨斌²⁾

¹⁾(中南大学信息科学与工程学院,长沙 410075) ²⁾(清华大学智能技术与系统国家重点实验室,北京 100084)

摘要 在体绘制中,传递函数将3维数据场的采样点映射成光学参数,直接决定了绘制的效果,成为体绘制研究的关键。然而传递函数的设计存在盲目性、用户界面不直观、参数调节复杂等问题,针对这些问题,提出了许多解决方法。首先介绍传递函数的定义,总结各种设计传递函数的定义域、值域、映射规则的方法,然后从不同的角度对传递函数的设计方法作全面的概述,重点介绍图像中心法、数据中心法和对象中心法,既分析了这些方法的特点,又比较了它们之间的内在联系,并探讨了新的设计思路,展望了该领域未来的研究方向。

关键词 体绘制 传递函数 可视化 分类函数 用户界面设计

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)06-1034-14

Prospects and Current Studies on Designing Transfer Function in Volume Rendering

ZHOU Fang-fang¹⁾, FAN Xiao-ping¹⁾, YANG Bin²⁾

¹⁾(Research Center for Automation Engineering Central South University, Changsha 410075)

²⁾(Department of Computer Science and Technology Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Volume rendering has proven to be an effective and flexible visualization method for large three-dimensional data sets from scientific or medical applications perspective. Transfer functions are particularly important to the quality of volume-rendered images because their role is essentially to make the data visible by assigning optical properties like color and opacity to the original values of the data set being visualized. Good transfer functions reveal the important structures in the data without obscuring them with unimportant regions. Unfortunately, specifying a good transfer function can be a difficult and tedious task due to the lack of intuitive interface and guiding information. Recent research has focused on automatic and semiautomatic techniques for creating transfer functions. A comprehensive survey of the up-to-date design approaches and strategies for transfer function is presented. After introducing the mathematical definition of the transfer function, different data and optical properties that can be used in the domain of transfer function are discussed. The proposed approaches of designing transfer functions can be classified into three categories; image-centric, data-centric and object-centric methods according to the extent of automation and interaction. Their characteristics and relationship also are analyzed and reviewed in detail. Along existing methods, some potential directions for future research are predicted finally.

Keywords volume rendering, transfer function, visualization, classification, user interface design

1 引言

体绘制是一种重要的体数据可视化算法,它不

需要生成中间几何图元,直接将3维数据场投影成半透明的2维图像,因此,可以在1幅图像中观察整个数据场,了解各种信息的综合分布情况^[1]。该算法广泛地应用在科学计算、工程计算、医学扫描等数

据的可视化中。体绘制算法的关键是传递函数的设计,因为传递函数将3维数据场的数据值转换为光学成像参数,决定了投影图像的质量^[2]。然而,传递函数的设计存在两个主要问题^[3,4]:缺乏直观的用户界面,用户通过传递函数定义数据场中感兴趣的对象往往需要大量的尝试,反复调节可视化参数,花费大量的时间和精力;缺乏数据场的指导信息,使传递函数的设计存在盲目性,有时即使已经设计出好的传递函数,得到了最好的绘制结果,可能也不知道。因此,设计好的传递函数已被列为可视化研究的十大难题之一^[5]。

当前传递函数研究的目标是开发直观的用户界面,使传递函数的参数的调节更加方便,提高设计的效率;提供有意义的指导信息辅助用户设计好的传递函数,降低设计的盲目性;自动设计出适合各种不同数据场的传递函数,使得传递函数的设计趋向自动化和智能化^[6]。

本文从多个角度综述了传递函数设计的方法。首先介绍了传递函数的数学定义,归纳总结了传递函数的定义域、值域、映射规则的设计方法,然后概述了传递函数的各种设计方法,重点介绍了图像中心法、数据中心法和对象中心法,比较了这几种设计方法的优缺点,分析了它们之间的相互关系,最后讨论了未来传递函数设计和研究的方向。

2 传递函数的数学定义

在体绘制中,传递函数将3维数据场的数据值转换为光学成像参数,建立了采样点与光学特征的映射关系,决定了体绘制的成像质量。数学上,传递函数可以定义为3维数据场的数据属性到光学属性的映射^[7]:

$$\tau: D_1 \times D_2 \times \cdots \times D_n \rightarrow O_1 \times O_2 \times \cdots \times O_m \quad (1)$$

式中, D_n ($n=1, 2, \dots, n$)是传递函数的定义域,表示3维数据场的数据属性。数据属性是3维数据场自身的数值特征,它可以是采样点的数据值,如CT图像的灰度值,也可以是局部采样点数值计算的结果,如梯度幅值、二阶方向导数、曲率等; O_m ($m=1, 2, \dots, m$)是传递函数的值域,表示进行可视化的光学属性,如颜色(RGB)、不透明度(alpha)、阴影参数Phong、反射率、折射率等^[8]。 τ 表示数据属性转换为光学属性的映射规

则。通过传递函数的定义可知,3维数据场中具有某种数据属性的采样点将以某种形式显示在2维图像中。设计传递函数就是根据可视化的需求,选择和设计合适的数据属性和光学属性,并建立它们之间的映射关系。

2.1 传递函数的数据属性

由式(1)可知,传递函数的定义域是数据属性,它表示3维数据场自身的性质。数据属性可以分为局部数据属性和全局数据属性。局部数据属性可以是数据场中每一个采样点所具有的属性,也可以是采样点与邻居采样点共同计算得到的数据值。全局数据属性是通过局部数据属性计算得来的。

2.1.1 标量值

采样点的标量值是最简单、最常用的数据属性,它是3维空间中多种不同物质的测量结果,如CT扫描数据,或者是计算机数值计算的结果,如科学计算的数据。每个采样点标量值的大小取决于数据的来源,具有一定的含意,可以用来区分不同的物质。例如,在人体的CT扫描图像中,对应于骨骼、肌肉和皮肤等不同密度的物质有不同的CT值,在CT图像中表现为具有不同的灰度值,因此,可以根据灰度值来定义颜色传递函数,利用色彩来表示不同的物质。但是对于复杂的3维数据场,同一种物质往往具有不同的标量值,而具有同一标量值的采样点有可能属于不同的物质。因此,用标量值设计传递函数仅仅只能处理简单的3维数据场,对于复杂的数据场需要设计更加复杂的定义域。

当采样点之间的间距太大时,为了提高绘制的质量,需要对采样点进行插值。通过插值计算得到的标量值仍可以作为数据属性设计传递函数。不同的插值算法得到的绘制效果也将不同,常用的插值算法有线性插值、3次插值、B样条插值等。

2.1.2 梯度

梯度幅值(gradient magnitude)是另一种常用的数据属性。体绘制时,通常假设同一种物质具有相似的标量值,不同的物质具有不同的标量值,因此,在物质的边界处标量值将发生显著的改变,标量值改变的剧烈程度可以用梯度幅值来度量。3维连续空间中,梯度幅值的计算公式为

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

式中, $\|\nabla f\|$ 表示“向量取模”, Levoy 提出将梯度幅值作为传递函数的定义域, 控制不透明度, 梯度值越大, 表示越重要的物质边界, 赋予越高不透明度^[9]。利用梯度幅值实现了物质边界的可视化, 在空间上更好地表示了物质之间的相互关系。

3 维数据场是由离散的采样点组成, 因此采样点的梯度幅值是通过采样点与邻近的采样点计算获得的。常用的梯度计算的方法有中心差分法^[10], 线性分离法^[11], 4 维线性回归法^[12]。其中, 中心差分方法是最简单最常用的梯度计算方法。计算公式如下:

$$\nabla f(x_i, y_i, z_i) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{12}f(x_{i-2}, y_i, z_i) + \frac{2}{3}f(x_{i-1}, y_i, z_i) - \frac{2}{3}f(x_{i+1}, y_i, z_i) + \frac{1}{12}f(x_{i+2}, y_i, z_i) \\ -\frac{1}{12}f(x_i, y_{i-2}, z_i) + \frac{2}{3}f(x_i, y_{i-1}, z_i) - \frac{2}{3}f(x_i, y_{i+1}, z_i) + \frac{1}{12}f(x_i, y_{i+2}, z_i) \\ -\frac{1}{12}f(x_i, y_i, z_{i-2}) + \frac{2}{3}f(x_i, y_i, z_{i-1}) - \frac{2}{3}f(x_i, y_i, z_{i+1}) + \frac{1}{12}f(x_i, y_i, z_{i+2}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了提高计算的准确性, Neumann 提出了用 4 维线性回归的方法计算梯度。

除了梯度幅值, 梯度方向也可以作为定义域设计传递函数。Lum 根据梯度的方向向量调节光学参数, 改变边界面的阴影效果, 增强边界面的绘制质量, 并在投影图像中显示出边界面的厚度信息^[13]。

2.1.3 高阶导数

高阶导数作为传递函数的定义域可以更准确的提取数据场中的特征, 最常用的高阶导数是梯度方向的二阶导数。在无噪声干扰的理想情况下, 边界

$$D_{\nabla f}^2 f = \frac{1}{\|\nabla f\|^2} (\nabla f)^T \cdot \mathbf{H}_f \cdot \nabla f = \frac{1}{\|\nabla f\|^2} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{H}_f 为海森矩阵, 该方法计算准确, 但是计算量大。第 3 种是拉普拉斯的近似计算,

$$D_{\nabla f}^2 f \approx \nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (7)$$

该方法计算最简便、速度快, 但是对噪声敏感。一般根据精度和性能需求来选择计算公式。例如, Vladimir 等人采用拉普拉斯的近似计算方法提取物质的等值面设计传递函数^[16]。

二阶方向导数除了可以用来提取物质的边界面, 还可以用来表示数据场中的形状特征。Yoshinabu 等

$$\nabla f(x_i, y_i, z_i) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}f(x_{i-1}, y_i, z_i) - \frac{1}{2}f(x_{i+1}, y_i, z_i) \\ \frac{1}{2}f(x_i, y_{i-1}, z_i) - \frac{1}{2}f(x_i, y_{i+1}, z_i) \\ \frac{1}{2}f(x_i, y_i, z_{i-1}) - \frac{1}{2}f(x_i, y_i, z_{i+1}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Moller 提出了用线性分离的方法计算梯度, 该方法用优化的分段多项式插值来保证计算的准确性和连续性。当用二阶的误差函数约束时, 计算公式和中心差分法相同, 三阶误差函数约束的计算公式为

面的梯度幅值为最大值, 而梯度方向的二阶导数为 0, Kniss 证明梯度方向的二阶导数能更准确的判断物质之间的边界^[14]。图像处理中的拉普拉斯算子就是通过计算二阶导数的零点来检测边界。

梯度方向的二阶导数的计算有 3 种方法^[15]: 第 1 种是用梯度幅值的梯度来计算,

$$D_{\nabla f}^2 f = \frac{1}{\|\nabla f\|} \nabla(\|\nabla f\|) \cdot \nabla f \quad (5)$$

在梯度幅值已知的情况下, 该计算方法较好。第 2 种是基于海森矩阵的计算,

人利用二阶方向导数中的海森矩阵的 3 个特征值对数据场中的局部结构进行识别^[17]。海森矩阵的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 它们满足 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 。3 个特征值分别对应特征向量 e_1, e_2, e_3 。根据特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的数值关系, 可以对薄片结构 ($\lambda_3 \ll \lambda_2 \approx \lambda_1 \approx 0$)、线型结构 ($\lambda_3 \approx \lambda_2 \ll \lambda_1 \approx 0$) 和块状结构 ($\lambda_3 \approx \lambda_2 \approx \lambda_1 \ll 0$) 进行识别, 这些结构分别对应了医学图像中的皮层、血管和肿瘤。因此, 根据海森矩阵的特征值设计传递函数可以实现对具有某些结构特征的物质可视化。Jiri Hladuvka 等人提出利用二阶方向导数的最小值

来提取数据场中物质的边界面和狭窄的实体结构,与用梯度幅值最大值方法提取边界面的算法相比,该方法提取效率和准确度都更高^[18]。理论上,通过二阶方向导数计算得到的特征值^[19]以及其他的高阶导数都可以作为3维数据场的数据属性来设计传递函数。

2.1.4 曲率

曲率是曲面的一种重要特征,近年也被用来设计传递函数。利用曲率设计传递函数主要是为了区分和辨别物质的形状^[20]。曲率的定义是沿曲面微小运动时,法向量改变的情况。由微分几何可知,对于规则曲面上的一点 P ,曲率的主方向表示曲面在 P 点处的最大弯曲和最小弯曲。相应的弯曲程度用实数 k_1 和 k_2 表示,称作曲率幅值,其中 k_1 比 k_2 有更高的绝对值。曲率最初是用来分析光滑曲面,近年来,被应用到体绘制中^[21]。

Jirí Hladuvka 等人提出将曲率幅值 k_1 和 k_2 作为传递函数的定义域,将采样点曲率幅值映射为颜色、不透明度等光学参数^[22]:

$$\tau: k_1 \times k_2 \rightarrow R \times G \times B \times \alpha \quad (8)$$

该传递函数可以帮助用户隐藏或突出具有某种形状结构的物质,例如,根据曲率幅值 k_1 和 k_2 的符号可以辨别平面($k_1 = k_2$)和抛物柱面($k_1 > k_2 = 0$ 或 $0 = k_1 > k_2$);根据梯度幅值乘积的符号,则可以用来区分抛物面($k_1 \times k_2 > 0$)和双曲抛物面($k_1 \times k_2 < 0$)。因此,基于曲率的传递函数可以观测到实体对象内部结构的变化。除了上面4种类型的曲面,利用曲率幅值 k_1 和 k_2 的大小还可以对同一种形状的物质进行细分。根据曲率幅值创建的是2维的传递函数,因为曲率幅值满足约束 $2 > |k_1| > k_2$,因此,定义域不是整个2维平面。

虽然根据基于曲率的传递函数能够根据形状来对感兴趣的对象进行可视化,但是目前还没有既高效又准确的计算3维数据场曲率的算法。由于离散数据场的噪声和各向异性的扩散等问题使得曲率幅值的计算难度远大于曲率的方向和符号计算。

计算曲面的曲率幅值一般有两种方法:一种是利用微分几何的微分不变理论直接计算或者是用信号处理的方法设计滤波器,先计算采样点的导数,然后再根据曲率计算公式得到曲率幅值。该计算方法的准确性依赖于二阶导数的计算,容易受噪声影响,因此,计算之前需要对数据场进行平滑处理。Kindlmann 提出基于卷积的方法计算方向导数^[23]:

$$f[t] * w(x) = f(x), f[t] * w'(x) = f'(x) \quad (9)$$

式中, $f[t]$ 为 $f(x)$ 的离散点,“*”代表卷积核函数 $w(x)$ 选择的是对称的分段多项式滤波器,因为多项式滤波器计算简单,计算的准确性和连续性容易控制,可提高基于曲率设计传递函数的效率。另外,高斯滤波器也是一种常用的核函数^[24]。另一种是通过面片的局部拟合来计算曲面的曲率幅值,McIvor 证明了非线性的二次面片拟合的计算结果比其他拟合方法的计算效果好^[22]。

而 Jirí Hladuvka 既没有计算数据场的二阶导数也没有拟合曲面,而是对每一个采样点,通过梯度方向的正交平面来计算曲率幅值 k_1 和 k_2 。因为该计算方法将曲面曲率的计算简化为平面曲线的曲率计算,所有的步骤都是2维的,因此,实现起来更加简单。然而,根据平面曲线计算曲率的方法并不通用的,例如,该论文的密切圆计算方法仅适合计算柱状结构的物质,当曲面的主方向和输入的数据场的轴线没有对齐时,容易产生走样。另外,该方法计算时间长,很难实现实时的可视化。通常,曲率的计算可以作为预处理,将计算的结果保存起来。除了曲率幅值、高斯曲率^[25]、平均曲率^[26]、曲率方向^[27]等都可以作为定义域设计传递函数。

2.1.5 空间属性

在2.1.1中分析了仅用标量值设计的传递函数存在二义性,即同一的标量值可能对应于多种物质,而同一种物质也可能包含不同的标量值,Roettger 提出在传递函数中加入空间信息来消除二义性。空间信息是非常重要的数据属性,因为同一种物质一般在空间上是相互连通的,如果在传递函数的定义域中加入采样点的坐标值,就能更好的提取数据场的结构特征。

在传递函数中加入空间信息的最直接的方法就是在定义域中增加采样点的坐标值 x, y, z 3个自变量。Tzeng 将采样点的坐标值 x, y, z 作为自变量,利用神经网络设计了高维传递函数,更好的提取感兴趣的物质和区域^[28]。然而,高维的传递函数计算量大,参数调节复杂。因此,Roettger 提出利用空间信息对采样点进行聚类,并为每一个类赋予一种颜色^[29]。在标量值和梯度幅值组成的2维统计直方图中,3维空间信息用RGB颜色值表示,不需要在传递函数中直接加入 x, y, z 3个变量,简化了传递函数的设计。但是该算法并没有识别出单个的特征,而是利用空间化的传递函数自动的尽可能多的

分离出各种特征。

2.1.6 邻居属性

空间属性可以表示物质的结构特征,那么邻居属性则可以提供物质的纹理信息。邻居属性是指采样点的邻居的标量值,该属性提供了采样点与周围采样点的数值关系。在 3 维数据场中,邻居属性可以是 6 维,也可以是 26 维。

Huang 利用部分,区域增长算法生成 2 维的传递函数,发掘感兴趣物质的特征,然后用全局的区域增长算法来系统地构造感兴趣区域的边界面^[30]。3 维数据场中的区域增长算法根据初始的种子点和周围 26 个邻居的标量值,按照一定的规则进行合并,将符合规则的采样点合并为同一种物质。3 维的区域增长算法利用邻居属性更快更准确的定位数据场中感兴趣的物质。Tzeng 将 6 维的邻居属性作为神经网络的输入,设计高维的传递函数。神经网络适合设计高维的传递函数,标量值、梯度幅值、空间属

性、邻居属性可同时作为输入,如图 1(a)所示。Tzeng 比较了当神经网络采用不同的输入时,对产生的误差进行比较^[31],如图 1(b)所示。在隐含节点非常多的大型神经网络中,当仅仅用标量 s 和梯度信息 g 作为输入时,直到训练的最后均方差仍然非常的高,这表示再多的训练也不会太大的改善神经网络。当加入邻居信息 n 时,神经网络学习的效果得到了改善,但是误差仍然较高。当将标量 s 、梯度幅值 g 、邻居 n 、位置 P 都作为输入时,神经网络的误差最小。“ g, n, p ”曲线和“ n, p ”曲线说明了在输入中去除标量和梯度幅值时,神经网络的误差和误差最小的情况相当。这是因为在隐含节点非常多的大型神经网络中,采样点梯度幅值、标量值等信息可以通过邻居和位置学习获得,使得它们不那么重要了。当隐含层的尺寸很小时,标量和梯度信息比邻居和位置信息重要,因为网络不能学习复杂的关系,因此用标量值和梯度幅值分类的效果更好。

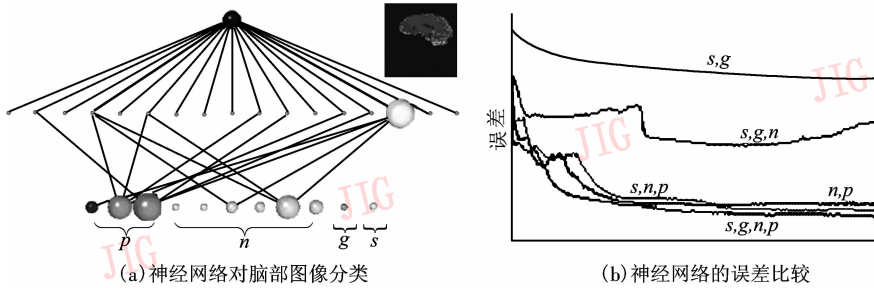


图 1 神经网络对脑部图像分类及误差比较

Fig. 1 Classification of brain image using neural network and comparison of errors

上面介绍的 6 种数据属性,设计传递函数时,可以使用某一种数据属性作为定义域,也可以选择其中几种属性的组合作为定义域。选择哪些属性作为定义域,需要综合考虑可视化的需求,数据场的复杂程度,系统运行的效率等。

2.2 值域

传递函数的值域是光学属性,最常用的光学属性是颜色 (RGB) 和不透明度 (α)。通常用颜色来区分数据场中的不同物质,用不透明度控制物质的可见程度,对感兴趣的物质设置高不透明度,对不感兴趣的物质设置低不透明度,因此,可在投影图像中突出感兴趣的结构与现象,减少或完全隐藏不感兴趣的结构。

通常颜色采用的是 RGB 模型,即将采样点的标量值通过传递函数映射为 RGB 3 维向量,因此,数据场中物质就和颜色联系起来。实际情况下,物质

的颜色是由光源和人眼决定的。为了提高绘制的真实感,Noordmans 提出了用光谱模型来代替传统的 RGB 模型^[32]。利用光谱模型可以根据光线的改变研究光线与采样点之间的交互关系。当数据场中只包含 2,3 种物质时,光谱模型可以提高体绘制的效率。光谱模型扩展了传统 RGB 模型,增强了视觉上的灵活性,提高了体绘制的质量。Bergner 扩展了光谱模型的传递函数,利用不同颜色的光线来增强或隐藏某种材料的物质,并用后期照明技术增强绘制的真实感,该方法为研究数据场的材质提供了新的方法^[33]。同时还为基于光谱模型的传递函数开发了直观、方便的用户界面,提高光谱模型的体绘制的实用性^[34]。

除了颜色和不透明度两种最常用的光学属性外,其他的光学属性,如折射率、阴影参数、辐射度等也可以作为传递函数的值域。例如:Lum 采用光学

属性中的阴影参数 (Phong 模型) 作为传递函数的值域^[13]。该传递函数不是通过不透明度来控制感兴趣物质的可见性,而是利用边界的阴影效果来调节物质的可见性,这些参数不仅能够在投影图像中更好地显示物质的边界面,而且还可以绘制出物质的厚度。类似地,Bruckner 通过特征驱动的方法观察数据场内部情况,并利用光照参数 K 和 \hat{K} 作为传递函数的值域,在显示物质内部结构的同时保留了物质的环境信息^[35]。当参数 K 的增加时,物质内部结构就显示得越多,当 \hat{K} 增加时,内部结构信息与环境信息的对比度将增强。因此,通过调节参数 K 和 \hat{K} 可为数据场提供清晰的剖面视图。将光照参数作为传递函数的值域,除了提供数据场的解剖面图,还可以提供物质的镜像图,并将某一种物质的镜像图像从数据场中分割出来,对它进行放大、缩小、移动、旋转等操作,辅助用户更全面地认识数据场中的对象^[36]。

2.3 映射规则的设计

传递函数的映射规则设计的是如何将 3 维数据场的数据属性映射为光学属性,它决定了投影图像的成像特点。梯形函数是一种常用的映射函数^[37]。假设将标量值作为传递函数的定义域,感兴趣物质的标量值范围用数据中心 c 和宽度 w 两个变量表示,不透明度作为值域,取值范围在 0 到 1 之间,如图 2(a) 所示,中心值 c 附近的标量值通过梯形函数映射为高不透明度,宽度 w 以外的标量值的不透明度为 0,而斜坡表示的是线性的增加或降低不透明度值,斜坡的宽度为 \hat{w} ,可以由用户自定义。梯形结构的映射函数的公式如下:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq c - \frac{w}{2} \\ \frac{t - c - \frac{w}{2}}{\hat{w}} & c - \frac{w}{2} < t \leq c - \frac{w}{2} + \hat{w} \\ 1 & c - \frac{w}{2} + \hat{w} < t < c + \frac{w}{2} - \hat{w} \\ 1 - \frac{t - c - \frac{w}{2} + \hat{w}}{\hat{w}} & c + \frac{w}{2} - \hat{w} < t \leq c + \frac{w}{2} \\ 0 & c + \frac{w}{2} < t \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

另外两种常用的映射函数是三角形映射函数和矩形映射函数,它们是梯形映射函数的特殊情况。当斜坡宽度 $s = w/2$ 时,映射函数的形状为三角形,它可以提取的信息用狭窄的区域表示,如图 2(b)

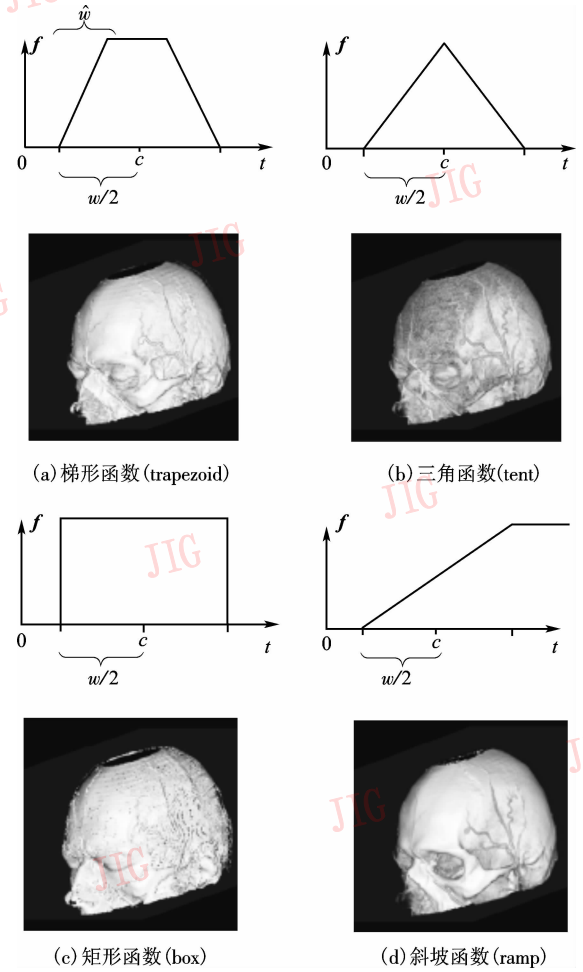


图 2 传递函数的映射规则
Fig. 2 The rule of transfer function

所示;当斜坡的宽度 $s = 0$ 时,形状是矩形,如图 2(c) 所示,应该尽量避免采用这种形状的映射函数,因为成像时,跳变的区域容易产生走样。

斜坡函数也是一种常用的映射函数,它常被称作窗口函数,当数据值小于窗口的最小值时,赋予最低的不透明度,当数据值大于窗口的最大值时,不透明度为 1,窗口内部则是以 c 为中心,宽度 w 为斜坡线性变化。从图 2 可以看到,当定义域和值域的取值范围都相同时,采用不同的映射函数可以得到不同的绘制效果。

当绘制数据场中灰度值相同的大片区域时,投影图像对传递函数参数的调节非常敏感,微小的调节使投影图像的绘制效果变化显著。Potts 等人提出了 Log 型传递函数使颜色区域的分布更加合理,提高体绘制的效果^[38]。对于多变量的数据场,随着变量的增加传递函数自变量数目呈指数倍增加,增加了传递函数设计的困难。Kniss 等人提出了高斯

型传递函数,因为高斯函数的形式简单,参数有限,非常适合应用到多变量的数据场^[39]。除了上面介绍的映射函数,其他的形状函数,以及这些函数的组合都可以作为传递函数的映射规则。

3 传递函数的设计方法

目前主要有 4 类设计传递函数的方法:手动调节法、图像中心法、数据中心法和对象中心法。

3.1 手动调节法

手动调节法是通过不断的调节传递函数的参数得到不同的绘制结果,达到对 3 维数据场的研究。该方法的优点是用户有完全的主动权,可以根据自己的需求随意的调节传递函数,直到达到满意的效果。Kitware 公司开发了软件 VolView 提供了手动调节传递函数的用户交互界面,实现了实时观察体绘制的结果。该系统分别用数据场的灰度直方图和梯度幅值直方图来设计颜色和不透明度值,传递函数的映射关系可以是阶梯函数和斜坡函数。例如,传递函数的定义域为梯度幅值,值域为不透明度,映射规则为斜坡函数,可以实现大于梯度阈值的采样点的可视化,突出物质的边界面。

然而手动调节法往往需要大量的尝试和对绘制结果的观察,才能找寻出理想的传递函数。当自变量的维数超过 2 时,参数很难调节和控制。对于未知的 3 维数据场常常需要花费大量的时间和精力去反复的研究,大大降低了设计传递函数的效率。

3.2 图像中心法

为了提高传递函数设计的效率,Pfister 等人提出了图像中心法。图像中心法通过对投影图像进行评估,自动的调节传递函数的参数直到得到满意的绘制效果。利用图像中心法来设计传递函数关键是对图像进行评估以及如何有效的调节可视化参数。

He Taosong 通过设计适应度函数对投影图像进行评估,采用随机搜索和遗传算法对可视化参数进行优化,可设计出最优的传递函数^[40]。但该方法的难点是适应度函数的设计,计算效率仍有待提高。三菱电子研究中心和美国 Ohio 大学根据 Taosong 提出的算法开发了 Design Galleries 系统^[41]。该系统提供所有可行的绘制效果,自动的产生和组织各种不同视觉效果图像,得到传递函数的所有可行解。系统根据传递函数的输入参数,尽可能多的得到的输出,绘制出所有的投影图像,每个图像代表不同的

传递函数设置。因为需要绘制成千上万的图像,因此,必须采用 volumePro 硬件加速。该方法的难点是选择能产生不同输出的输入向量以及如何合理的组织输出的结果来辅助选择传递函数。König 采用了和文献[41]提出的类似的策略,根据采样点的数据值的取值范围穷举出各种可能的绘制结果,并用缩略图的形式将各种绘制的结果排列成组,为医生提供更加直观的体绘制系统。该系统还用 VolumePro 硬件加速,加快了绘制的效率。该方法比文献[41]具有更好的扩展性,可以对各种输入参数分别进行研究^[37]。

通过对人的感知能力的研究,在可视化中提高人机交互界面的应用受到愈来愈多的重视^[42],Jankun Kelly 等人提出了一个以表格形式表示的界面,该界面以一个 2 维的窗口对应一个多维的可视化参数空间来让用户研究可视化的过程^[43]。Tory 则提出了一个基于并行坐标的界面来表示可视化参数空间^[44],让用户比较不同的参数。这些界面虽然功能强大,但由于操作过程复杂,用户未经训练,不容易掌握获得感兴趣图像的技巧。

3.3 数据中心法

图像中心法通过对投影图像评估来调节参数,然而可视化研究不仅仅是为了获得好的渲染图像,更重要的是分析和研究数据场自身的特点,因此,Bajaj 等人提出了数据中心法,通过分析数据场自身的特征来设计传递函数。在 2.1 节中,介绍了传递函数的定义域,它们一般都是 3 维数据场的局部数据属性,而这一部分介绍的是利用全局数据属性来设计传递函数。全局数据属性是从整体的角度来表示数据场的特征,如等高线、边界面、拓扑结构等,它们通常由局部属性计算获得,是局部属性更高层次上的抽象。

3.3.1 基于统计信息的设计方法

在众多数据特征中,控制 3 维数据场的等高线(iso-contour)的高度参数(等高线值 iso-value)是一种较简单的特征值。由于等高线只能显示数据场的部分信息,因此,为了了解整个数据场的信息,可以调整等高线值来显示多条等高线信息。Bajaj 等人提出了“等高线谱”的概念^[45]。“等高线谱”定义了数据场中等高线的特征值的度量标准。等高线的特征值包括:等高线的周长、等高线的面积以及沿等高线的梯度积分等,它们均可由定义在等高线值上的一元 B 样条函数计算获得。Bajaj 等人还提供了用

户界面辅助用户选择等高线值,例如,当用户选择了某一等高线值(iso-value)时,系统立刻为用户计算出此时等高线的特征值。该系统还可以显示所有等高线的特征值的变化趋势,并可以根据特征值的某种属性来选择较好的等高线值来设计传递函数。根据“等高线谱”设计传递函数的优点是不论数据场的维数是多少,都可以在 1 幅 2 维图像中了解整个数据场的整体情况。Bong-Soo Sohn 将“等高线谱”扩展为“等高线树”,应用到随时间变化的 3 维数据场的可视化研究中。通过观察“等高线树”的特征值的变化来研究数据场随时间变化的规律,并根据“等高线树”的特征值设计传递函数^[46]。

物质的边界面和等值面是最常用全局数据属性。Kindlmann 通过分析 3 维数据场的统计信息来确定物质的边界区域。该方法首先假设边界模型为高斯模糊的阶梯函数,然后计算由数据值 $f(x)$ 、梯度幅值 $f'(x)$ 、梯度方向的二阶导数 $f''(x)$ 组成的 3 维直方图,如图 3(a)所示。边界面在由标量和梯度幅值组成的 2 维直方图中表现为弧形结构,如图 3(b)所示,然而在复杂情况下弧形结构互相重叠

阻碍了边界的判断,如图 3(c)所示,而在标量值与二阶导数组成的 2 维直方图中穿过零点,可以更好的判断边界面,如图 3(d)所示^[14]。为了提高物质边界面提取的准确度,Kniss 等人根据 Kindlmann 的 3 维直方图理论,设计了多维传递函数^[4],开发了 1 组操纵杆来的调节可视化参数。在用户界面中,既可以在传递函数的定义域内调节操纵杆改变传递函数的参数得到绘制的结果,也可以在 3 维数据场中操纵感兴趣的区域,得到相应的传递函数^[47]。该系统利用硬件加速,可以得到实时的绘制效果。Tenginakai 等人则提出了统计型边界模型^[48],通过计算采样点的各阶中心矩及其它们的相互关系来确定物质的边界面。该边界模型比高斯边界型模型更通用,中心矩的计算比导数计算更简单,对噪声的鲁棒性也更强。Vladimir Pekar 提出了利用拉普拉斯加权灰度直方图来提取 3 维数据场中的等值面,该加权直方图比 Kindlmann 的 3 维直方图的计算简单^[16]。Sereda 提出用 LH 直方图来提取物质的边界面^[49],解决了在噪声大、模糊情况下边界面准确提取的问题。

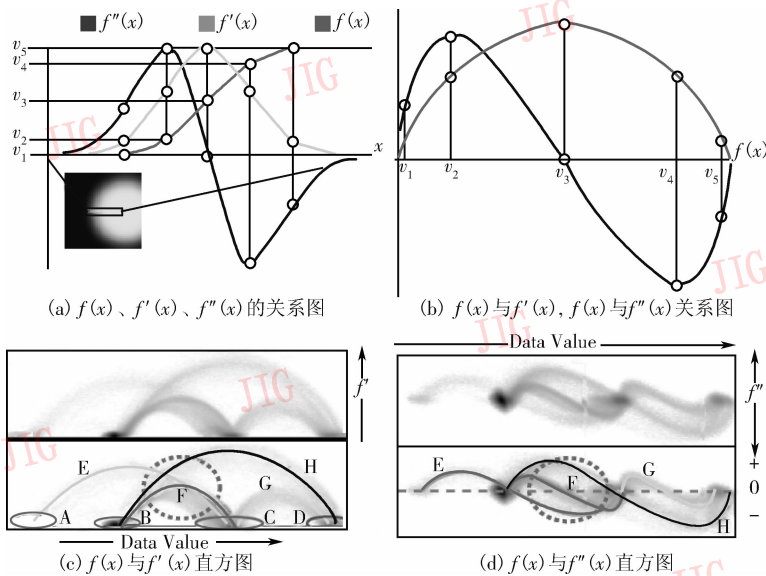


图 3 $f(x)$ 、 $f'(x)$ 、 $f''(x)$ 之间的关系
 Fig. 3 Relation among $f(x)$, $f'(x)$ and $f''(x)$

为了更好的提取物质边界设计传递函数,研究者提出在传递函数的定义域中加入空间信息。Huang 提出利用 3 维的区域增长算法^[50]来辅助用户快速、准确的提取物质的边界面设计传递函数^[30]。Lürig 和 Ertl 提出基于形态学的多尺度分析方法来计算体绘制的光学属性^[51]。该方法融入了

空间信息,提高了特征提取的准确度。多尺度的分析类似于小波分析,克服了线性滤波器容易变形的缺点。Shiaofen Fang 将 2 维的图像处理操作,如灰度直方图、平滑处理、边界检测算子等扩展到 3 维数据场^[52],并利用斜坡函数来设计不透明度函数。为了提高等值面的准确性,又提出对 3 维数据场的灰

度直方图进行多尺度的平滑来提取多尺度的等值面^[53]。

3.3.2 基于结构信息的设计方法

除了物质的边界面,3 维数据场的拓扑结构也是一种重要的全局数据属性。Fujishiro 等人提出了通过分析数据场的拓扑结构来设计颜色和不透明度传递函数,其中拓扑结构的分析结果用 hyper Reeb 图来表示^[54,55]。Reeb 图是一种描述 3 维曲面拓扑结构的方法,它从连通区域的角度来计算曲面的拓扑结构。在 3 维数据场中,具有相同标量值并且连通的区域用一个节点表示,将节点相互连通后就得到了数据场的 Reeb 图。根据不同的标量阈值,可以从 3 维数据场中提取出相应的等值面,等值面的拓扑结构用 Reeb 图表示。通过分析一系列等值面的 Reeb 图,可以得到拓扑结构发生显著变化的关键等值面,并用 hyper Reeb 图表示分析结果,最后根据 hyper Reeb 图来设计传递函数。该方法虽然可以取得不错的绘制效果,但是计算量大,很难做到实时性。为了降低了计算量,Fujishiro 等人又提出直接提取 3 维数据场中的关键点,构造出数据场的骨架树,为重要的区域设计传递函数^[56]。骨架树是描述数据场的关键点和连结关系的抽象图,反应了等值面在数据场中的分裂或合并的进化过程,强调有意义的等值面。该方法可以检测出所有的关键点,保证了数学的完备性。Aaron E. Lefohn 等人利用水平集(level set)算法提取复杂数据场中的拓扑结构^[57]。水平集算法是从界面传播等研究领域发展起来的,它是处理封闭运动界面随时间演化过程中几何拓扑变化的有效计算工具。水平集算法通过最小化基于主曲率的能量函数,迭代的对隐曲面进行变形。根据水平集算法提取的拓扑结构设计传递函数,能够实现和数据场的等值面的准确绘制。

曲率也是数据场的一种重要的全局数据属性。Jiri Hladuvka 和 Kindlmann 提出了利用曲率设计传递函数,实现了通过光学属性来区分物质的形状^[22,23]。Kindlmann 利用基于曲率的传递函数来控制投影图像中轮廓线的粗细,更好的显示对象的前后遮挡关系^[23]。他还利用曲率来增强等值面上的脊线和谷线的绘制效果。如果把灰度图像当做高度场,液体一般从高处流向低处,流线曲率是液体沿曲面流过的路径的曲率。在 3 维空间中,流线曲率 K_f 表示当等值面值微小改变时,等值面方向改变的程度。流线曲率可以表示等值面之间的变化,当 $K_f =$

0 表示邻近的等值面互相平行。Kindlmann 用该曲率实现了对等值面的不确定性信息的可视化,第 1 次将流线曲率应用到体绘制中。

传递函数将 3 维数据场转换为光学参数后,根据体绘制算法得到的投影的图像是一般半透明的,当数据场中的对象复杂时,很难仔细观察对象的细节。为了更好的显示内部重要结构的细节,Ebert 和 Rheingans 改进了传统的体绘制的流程,将各种非真实感的视觉信息融入到体绘制的流程,并将改进的算法命名为 volume illustration^[58]。该算法增强了边界面、轮廓线等感兴趣特征的绘制效果,提高了感兴趣对象的结构、形状、方向、深度等视觉效果,扩展了 3 维数据场的绘制能力,因此能更好的辅助用户研究和理解数据场。例如,为了增强数据场的边界效果,设计了基于梯度幅值的传递函数:

$$O_g = O_v(k_{gc} + k_{gs}(\|\nabla f\|)^{k_{ge}}) \quad (11)$$

式中, O_v 是初始的不透明度, O_g 是改进后的不透明度, $\|\nabla f\|$ 是梯度幅值。系数 k_{gc} , k_{gs} 控制梯度幅值对不透明度的影响情况。当 $k_{gc} = 1$, $k_{gs} = 0$ 时,没有梯度增强效果,而 $k_{gs} = 0$ 时,仅显示梯度幅值大的边界区域。指数 k_{ge} 可以调节梯度幅值的指数用来调节不透明度函数曲线的变化的程度。为了能在投影图像中更好地辨别物质之间的位置关系,需要在传递函数中融入深度信息。Ebert 提出在颜色传递函数中融入距离信息,将传递函数公式设计为

$$C_d = (1 - k_{ds}d_v^{k_{de}})C_v + k_{ds}d_v^{k_{de}}C_b \quad (12)$$

式中, k_{ds} 控制颜色合成的程度, k_{de} 控制颜色合成的比例, d_v 是穿过数据场的距离, C_b 是背景的颜色,控制投影图像的阴影。然而 volume illustration 算法计算量大,很难做到实时绘制。Svakhine 利用可编程图形处理器的强大功能^[59],进一步改进了传递函数的计算公式,在保证绘制效果的同时大大加速了 illustration 的速度。Csebfalvi 利用非真实感绘制方法,以视线相关的方式绘制数据场中各种物质的轮廓,在传递函数中加入视线的方向,实现了快速了解 3 维数据场中的对象的目的^[60]。

3.4 对象中心法

3 维数据场可视化的目的是为了研究数据场中所包含的对象及其对象间的相互关系。数据中心法设计的传递函数提取的是满足某些数据特征的对象,然而满足同一特征的对象有时不只一种,某一对象也可能包含多种特征。为了更好的对数据场进行研究,近年出现了以对象为中心的传递函数设计方

法,该方法将传递函数的设计分解为:先对数据场进行分类,然后再对分类的结果指定光学参数。

3.4.1 基于聚类的设计方法

Tzeng 等人提出用 ISODATA (自组织迭代数据分析技术) 算法对数据场进行分类^[61]。ISODATA 是一种无监督的机器学习算法,类似于 K 均值聚类,采样点的任何数据属性都可作为算法的输入。ISODATA 根据输入数据空间的距离对数据场进行分类,输出一组具有类似特征的采样点簇和簇均值。为了降低计算量,可先从数据场中任意地选取一组采样点进行预分类得到簇均值,然后再对整个数据场分类。被选择的采样点必须包含整个数据场的直方图的典型分布,采样点数目由数据场的大小确定,根据经验,1% 的采样点就足够进行预分类了。Tzeng 还设计了直观、方便的用户界面使用户可以在簇空间中为分类的结果指定颜色和不透明度等光学属性,因此 ISODATA 聚类算法将传递函数的定义域拓展到了簇空间,强大的用户界面还允许用户对分类的结果进行修改和调节。然而 ISODATA 算法对聚类参数敏感,降低了算法的实用性。Sereda 提出分层聚类的思想,将多种聚类规则相互融合提高了算法的灵活性,并在 LH 直方图的 2 维空间中对边界面分层聚类,最后根据多层次的边界信息设计传递函数^[62]。

3.4.2 基于机器学习的设计方法

虽然高维的传递函数能更好的提取数据场的特征,但是多维的自变量增加了设计的难度。Tzeng 提出采用神经网络等智能算法来设计高维的传递函数。人工神经网络通过训练得到知识,然后利用获得的知识来解决相似的问题,它既可以学习线性关系也可以学习非线性关系,功能非常强大。Tzeng 为该算法开发了功能强大的用户交互界面,首先由用户在数据场的部分切片上用不同的颜色分别绘制感兴趣和不感兴趣的采样点,然后根据绘制的采样点训练神经网络得到分类函数^[28]。训练是一个迭代的过程,用户可以交互观测当前网络分类的结果,并可以根据反馈信息修改采样点,加入新的训练数据,使网络最后可以得到期望的分类结果。训练好的分类函数可以正确地整个数据场分类,系统根据分类结果设计传递函数。神经网络的输入可以是采样点的任意数据属性。所有的步骤都可用硬件加速,实现交互可视化。Tzeng 采用的是最简单的 BP 神经网络,Zhang Jia-wan 则采用回归神经网络

(GRNN) 来设计传递函数^[63],GRNN 结合了径向基函数网络和概率网络的特点,将曲率幅值(k_1, k_2),以及二阶方向导数矩阵的特征值作为神经网络的输入,通过对输出的绘制效果进行评估来调节可视化参数,提供更好的分类结果和绘制效果。

除了神经网络,支持向量机(SVM)也被用来对数据场进行分类^[64]。SVM 是一类较新的分类方法,该方法不仅将数据分成不同的类别,而且还保证类别之间的距离最大。当给定的类在源数据空间中不能线性分离时,SVM 可以将数据从低维数据空间中映射到高维特征空间中,然后在高维空间中用“最优分离超平面”对数据进行线性分离。将数据映射到高维的特征空间是通过核函数完成的。目前常用的核函数有线性函数、多项式函数、径向基函数和 sigmoid 函数等,其中径向基函数应用最广泛,因为该核函数需要的超平面少,计算复杂度低,运行时间短。

神经网络和支持向量机都是智能算法,而且都是为了设计高维的传递函数对数据场进行分类。神经网络通过最小化经验误差,降低训练集中错误分类的概率,而支持向量机则用最小化结构化风险作为设计标准,保证对未知数据的错误分类的概率最小,更好地近似了所需要的分类函数。大部分情况下,神经网络在训练过程中不断的改善,得到越来越好的分类结果,但是很难确定最好的分类结果,在更新的过程中,可能会陷入局部最优。SVM 则是对整个训练数据集进行训练,当训练完成时,可以得到最优的分类结果,保证分类误差的全局最小。通过对同一数据场进行分类比较,达到同样的绘制效果时,SVM 需要的采样点数目更少,训练的时间也较短。另外,其他的智能算法,如贝叶斯网络,隐马尔可夫模型等也可以用来设计高维传递函数。

3.4.3 基于概率的设计方法

除了利用智能算法来设计高维的传递函数外,Kniss 等人提出了用概率方法的设计传递函数,定量的分析数据场^[65]。边界处的采样点常常会属于多个类,而系统一般将采样点分给一个类,这将导致物质的边界不完整。概率的分类方法则可以定量的分析出采样点属于某一类的概率,提高了分类的准确性。尤其在医学领域中,如果不能准确的对肿瘤或病变器官进行度量和绘制,可能会导致医生误诊。Grigoryan 利用点绘制来表示不确定性的物质^[66]。Tzeng 为了解决模糊分类的问题,将一个采样点分

给多个类,并在绘制时,用较低的不透明度表示不确定性高的采样点^[61]。

高维的传递函数大大的增加特征提取的计算量。如果将没有必要的特征值作为输入,反而会影响分类的结果,因此,需要设计算法自动的排除没有必要的输入。例如,利用神经网络设计高维传递函数时,用户通常将神经网络作为一个黑盒子,不关心神经网络的学习过程。Kwan-Liu Ma 利用信息可视化技术来打开黑盒子,解释了输入数据与输出数据之间的相互依赖性,从而确定了如何有效的选择传递函数的定义域^[31]。Takanashi 等人利用主成份分析或独立成份分析的方法来降低定义域中不必要的维度^[67,68]。Kniss 则提出基于图的维数化简方法^[65]。

基于对象设计传递函数的第 2 步是对分类的物质指定光学参数。Hauser 提出对不同的种类的物质设计不同的传递函数,并根据感兴趣物质的特点采用不同的绘制方法,如体绘制、面绘制、非真实感绘制、MIP (maxium intensity projection),无阴影绘制、有阴影绘制的等,同时,显示多种物质的内部结构,更好地表现了物质本身的特点以及物质之间的相互关系^[69]。Hadwiger 则利用图形硬件卡对该算法进行加速,实时的得到绘制效果^[70]。为了绘制数据场的剖面图,Viola 提出了一种与视线相关的 focus + context 可视化方法,根据感兴趣的程度对物质指定重要性,然后根据重要性来确定物质的可见性的优先级。如果从某一视线观察数据场,优先级的低的物质遮挡了优先级高的物质,那么绘制时优先级低物质的可见性比优先级高的物质可见性低。绘制的可见性可以通过调节不透明度或者绘制方法的稀疏程度来实现,最稀疏的绘制方法就是点绘制和线框模型,最稠密的绘制方法是面绘制^[71,72]。

第 3 部分概括介绍了各种设计传递函数的方法,并比较了这些方法的优缺点。虽然这些方法设计标准不同,但是可以相互结合,例如,Kniss 结合了图像中心法和数据中心法提出在对偶域中交互的设计传递函数。另外,这些设计方法的都是为了分析和研究数据场,并没有本质的区别,例如,数据中心法根据数据场的特征设计传递函数,而对象中心法则先对数据场分类然后根据分类的结果设计传递函数,在对对象分类之前同样需要计算数据场的特征,因此,数据中心法是对象中心法的基础,对象中心法是数据中心法的拓展。

4 研究方向

随着 3 维数据场数据量的增加,实时可视化的需求,传递函数的设计将面临新的挑战,下面几个问题将成为本领域的未来的主要研究方向:

(1) 对压缩的数据场设计传递函数。随着数据场分辨率的增加,数据量越来越大,数据一般以压缩的格式保存。如何为压缩的数据场设计传递函数是新的研究问题。目前,有 4 种对压缩数据场设计传递函数的方法。第 1 种是先将数据场全部解压,然后再设计传递函数。这种方法能得到较好的绘制效果,但是需要很大的存储空间和计算时间。第 2 种是边解压边设计传递函数。该方法综合考虑已解压和未解压数据的属性,实现绘制图像的由模糊到逐步清晰的过程。第 3 种是边设计传递函数边解压。它是根据预先设计的传递函数为数据场指定的可见性来对数据场进行解压。最后一种是直接对压缩的数据设计传递函数,该方法最简单,但是绘制的效果较差。Patric Ljung 采用第 3 种方法,将医学知识融入到传递函数,根据传递函数指定的可见性来选择层次细节模型,解压部分数据,实现压缩数据场的快速绘制^[73]。除了压缩格式的数据场,对不规则数据场,随时间变化的数据场,多变量数据场等设计传递函数也是未来研究的方向。

(2) 定量的分析方法。目前设计的传递函数主要是定性的对数据场进行分析和研究,并没有为用户提供量化的分析结果。然而量化的分析对数据场的研究非常的有意义,例如在医学的肿瘤提取应用中,如果能够提供肿瘤提取信息的确定性给出量化的信息,就能够为医生的准确诊断提供重要依据,提高手术的成功率。因此定量的对数据场进行可视化研究是未来研究的重要方向之一。

(3) 多维传递函数的设计和化简。虽然高维传递函数能够准确地提取特征,但是高维的传递函数,参数多,调节困难,降低了设计的效率,因此,需要设计更好、更有效的算法和更直观的用户界面。自变量的数量也不是越多越好,如果不是每个维度都有效果,不但增加了计算量,而且还会影响设计的效果,因此,需要设计好的维度化简算法,选择最优的维数。

(4) 视角的选择。在对数据场进行交互时,每个视角只能看到一部分数据场。当用户视角改变时,需要对数据场重新计算和绘制,对规模大的数据

场,很难做到实时交互。如果能自动计算出最优的视角,那么将更准确、更快速地观察和理解整个数据场。Bordoloi 提出通过计算投影图像的熵值来确定最优视角^[74]。Takahashi 则是根据将对象的重要性考虑进来选择最优的视角^[75]。将视角的选择融入到体绘制的传递函数设计算法中还不多,是一个非常值得研究的方向。

5 结束语

体绘制是3维数据场可视化的重要算法,它广泛的应用在医疗诊断、手术规划、地理信息等领域。体绘制算法的关键是传递函数的设计,然而传递函数的设计方法缺乏直观的用户界面和有意义指导信息,没有统一通用的设计算法,阻碍了可视化算法的应用和发展,因此,研究和设计传递函数一直受到国内外研究者的重视。本文综述了各种传递函数的设计方法,从传递函数的定义域、值域、映射函数的设计开始,重点介绍了图像中心法、数据中心法和对象中心法的设计思路,比较了它们特点和相互关系,最后展望了未来传递函数设计和研究的方向。相信未来必将产生新的设计方法拓展传递函数,丰富用户界面,使体绘制算法成为更加强大的可视化工具。

参考文献 (References)

- 1 Tang Ze-sheng. Visualization of 3D Data Sets[M]. Beijing: Tsing Hua Press, 1999: 1~20. [唐泽圣. 3维数据场的可视化[M]. 北京:清华大学出版社, 1999: 1~20.]
- 2 Wang Han-qing, Tang Ze-sheng. An interactive volume rendering tool for transfer function specification [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(6): 1063~1067. [黄汉青, 唐泽圣. 应用于传递函数设定的交互式体绘制工具[J]. 计算机学报, 2005, 28(6): 1062~1067.]
- 3 Kindlmann G. Transfer functions in direct volume rendering: Design, interface, interaction[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'02[C]. San Antonio, TX, USA, 2002: 50~60.
- 4 Kniss J, Kindlmann G, Hansen C. Multidimensional transfer functions for interactive volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(3): 270~285.
- 5 Pfister H, Lorenzen B, Bajaj C. The transfer function bake-off [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(1): 16~22.
- 6 Hadwiger M, Kniss J, Engel K. High-quality volume graphics on consumer hardware[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'02[C]. San Antonio, TX, USA, 2002: 42~49.
- 7 Sereda P. The Transfer Function Design for Volume Data Rendering [A]. In: Proceedings of the Advanced School for Computing and

- Imaging[C]. Heijen, Netherlands, 2004: 17~28.
- 8 Nelson M. Optical models for direct volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995, 1(2): 99~108.
- 9 Levoy M. Display of surfaces from volume data[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(3): 29~37.
- 10 Rheingans P, Ebert D. Volume illustration: Non-photorealistic rendering of volume models [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(3): 253~264.
- 11 Moller T, Machiraju R, Mueller K. Evaluation and design of filters using a Taylor series expansion [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1997, 3(2): 184~199.
- 12 Neumann L, CseÁbfalvi B, KoÈnig A. Gradient estimation in volume data using 4D linear regression [A]. In: Proceedings of the 21st Annual Conference Eurographics [C], Interlaken, Switz, 2000: 351~357.
- 13 Lum E B, Ma K L. Lighting transfer functions using gradient aligned sampling[A]. In: Proceedings of IEEE Visualization[C], Austin, TX, USA, 2004: 289~296.
- 14 Kindlmann G, Durkin J W. Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering [A]. In: Proceedings of IEEE Symposium on Volume Visualization [C], New York, NY, USA, 1998: 79~86.
- 15 Kindlmann G. Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering [D]. NY: Master's thesis, Cornell University, Ithaca, 1999: 30-45.
- 16 Pekar V, Wiemker R, Hempel D. Fast detection of meaningful isosurfaces for volume data visualization [A]. In: Proceedings of the IEEE Conference on Visualization 2001 [C], San Diego, CA, 2001: 223~230.
- 17 Yoshinabu S, Carl-Fredrik W, Bhalerao A. Tissue classification based on 3D local intensity structures for volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(2): 160~179.
- 18 Hladuvka J, Konig A, Groller E. Salient Representation of Volume Data [A]. In: Proceedings of the Joint Eurographics-IEEE TVCG Symposium on Visualization [C], San Diego, CA, USA, 2001, 203~211.
- 19 Monga O, Lengagne R, Deriche R. Crest lines extraction in volume 3D medical images: a multi-scale approach [A]. In: Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Computer Vision & Image Processing[C], Jerusalem, Isr, 1994: 553~555.
- 20 Interrante V. Illustrating surface shape in volume data via principal direction-driven 3D line integral convolution [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH '97 [C], Los Angeles, CA, USA, 1997: 109~116.
- 21 Interrante V, Fuchs H, Pizer S M. Conveying the 3D shape of smoothly curving transparent surfaces via texture [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1997, 3(2): 98~117.
- 22 Hladuvka J, Konig A, Groller A. Curvature-based transfer functions for direct volume rendering [A]. In: Proceedings of Spring

- Conference on Computer Graphics 2000 [C], Amsterdam, Netherlands, 2000; 58 ~ 65.
- 23 Kindlmann G L, Whitaker R, Tasdizen T, *et al.* Curvature-based transfer functions for direct volume rendering: methods and applications [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization [C], Seattle, WA, USA, 2003; 513 ~ 52.
- 24 Monga O, Benayoun, Faugeras. From partial derivatives of 3D density images to ridge lines [A]. In: proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Champaign, IL, USA, 1992, 354 ~ 359.
- 25 Surazhsky T, Magid E, Soldea O, *et al.* A comparison of gaussian and mean curvatures estimation methods on triangular meshes [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C], Taipei, China, 2003; 1021 ~ 1026.
- 26 Soldea O, Elber G, Rivlin E. Global segmentation and curvature analysis of volumetric data sets using trivariate B-spline functions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, **28**(2): 265 ~ 278.
- 27 Lum E B, Stoppel A, Ma K L. Using motion to illustrate static 3D shape-kinetic visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003, **9**(2): 116 ~ 126.
- 28 Tzeng F Y, Lum E B, Ma K L. A novel interface for higher-dimensional classification of volume data [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2003 [C], Seattle, WA, USA, 2003; 505 ~ 512.
- 29 Roettger S, Bauer M, Stamminger M. Spatialized transfer functions [A]. In: Proceedings of IEEE/EUROGRAPHICS Symposium on Visualization 2005 [C], Minneapolis, MN, USA, 2005; 271 ~ 278.
- 30 Huang R. RGVis: region growing based techniques for volume visualization [A]. In: Proceedings of Pacific Graphics 2003 [C], Canmore, Alta., Canada, 2003; 355 ~ 363.
- 31 Tzeng F Y, Ma K L. Opening the black box-data driven visualization of neural networks [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2005 [C], Minneapolis, MN, USA, 2005; 383 ~ 390.
- 32 Noordmans H J, Vander Voort H T M, Smeulders A W M. Spectral volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, **6**(3): 196 ~ 207.
- 33 Bergner S, Möller T, Drew M S, *et al.* Interactive spectral volume rendering [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2002 [C], Boston, MA, USA, 2002; 101 ~ 108.
- 34 Bergner S, Möller T, Tory M, *et al.* A practical approach to spectral volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, **11**(2): 207 ~ 216.
- 35 Bruckner S, Grimm S, Kanitsar A. Illustrative context-preserving volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, **12**(6): 1559 ~ 1569.
- 36 Bruckner S, Gröller M E. VolumeShop: An interactive system for direct volume illustration [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2005 [C], Minneapolis, MN, USA, 2005; 671 ~ 678.
- 37 König A, Gröller E. Mastering transfer function specification by using volumePro technology [A]. In: Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics [C], Budmerice, Slovakia, 2001; 279 ~ 281.
- 38 Potts S, Moeller T. Transfer functions on a logarithmic scale for volume rendering [A]. In: Proceedings of Graphics Interface 2004 [C], London, Ontario, Canada, 2004; 57 ~ 63.
- 39 Kniss J, Premo E S, Ikits M, *et al.* Gaussian transfer functions for multi-field volume visualization [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2003 [C], Seattle, WA, USA, 2003; 497 ~ 504.
- 40 Taosong H, Lichan H, Kaufman A, *et al.* Generation of transfer functions with stochastic search techniques [A]. In: Proceedings of the 7th conference on Visualization '96 [C], San Francisco, CA, USA, 1996; 227 ~ 234.
- 41 Marks J, Andalman B, Beardsley P A, *et al.* Design galleries: a general approach to setting parameters for computer graphics and animation [A]. In: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques [C], Los Angeles, CA, USA, 1997; 389 ~ 400.
- 42 Tory M, Möller T. Human factors in visualization research [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, **10**(1): 72 ~ 84.
- 43 Jankun Kelly T J, Ma K L. Visualization exploration and encapsulation via a spreadsheet-like interface [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, **7**(3): 275 ~ 287.
- 44 Tory M, Potts S, Moller T. A parallel coordinates style interface for exploratory volume visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, **11**(1): 71 ~ 80.
- 45 Bajaj C L, Pascucci V, Schikore D R. The contour spectrum [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 1997 [C], Phoenix, AZ, USA, 1997; 167 ~ 173.
- 46 Bong-Soo S, Bajaj C. Time-varying contour topology [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, **12**(1): 14 ~ 25.
- 47 Kniss J, Kindlmann G, Hansen C. Interactive volume rendering using multi-dimensional transfer functions and direct manipulation Widgets [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2001 [C], San Diego, CA, USA, 2001; 255 ~ 262.
- 48 Tenginakai S, Lee J, Machiraju R. Salient iso-surface detection with model-independent statistical signatures [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2001 [C], San Diego, CA, USA, 2001; 231 ~ 238.
- 49 Sereda A, Vilanova I W O, Serlie F A, Gerritsen. visualization of boundaries in volumetric datasets using LH histograms [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, **12**(2): 208 ~ 218.
- 50 Huang R, Ma K L, McCormick P. Visualizing industrial CT volume data for nondestructive testing applications [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2003 [C], Seattle, WA, USA, 2003; 547 ~ 554.
- 51 Lurig C, Ertl T. Hierarchical volume analysis and visualization based on morphological operators [A]. In: Proceedings of IEEE

- Visualization 1998 [C], Research Triangle Park, NC, USA, 1998: 335 ~ 341.
- 52 Shiao-fen F, Biddlecome T, Tuceryan M. Image-based transfer function design for data exploration in volume visualization [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 1998 [C], Research Triangle Park, NC, USA, 1998: 319 ~ 326.
- 53 Fang Shiao-fen, Marwan A. Multi-scale iso-surface extraction for volume visualization [A]. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry [C], Singapore, 2004: 390 ~ 394.
- 54 Fujishiro I, Azuma T, Takeshima Y. Automating transfer function design for comprehensible rendering based on 3D field topology analysis [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 1999 [C], San Francisco, CA, USA, 1999: 467 ~ 470.
- 55 Fujishiro I, Azuma T, Takeshima Y, *et al.* Volume data mining using 3D field topology analysis [J]. IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications, 2000, **20**(5): 46 ~ 51.
- 56 Takahashi S, Takeshima Y, Fujishiro I. Topological volume skeletonization and its application to transfer function design [J]. Graphical Models, 2004, **66**(1): 24 ~ 49.
- 57 Lefohn A, Kniss J, Hansen C, *et al.* A streaming narrow-band algorithm: interactive computation and visualization of level sets [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, **10**(7): 422 ~ 433.
- 58 Ebert D, Rheingans P. Volume Illustration: non-photorealistic rendering of volume models [A]. In: Proceedings of the conference on Visualization 2000 [C], Salt Lake City, UT, USA, 2000: 195 ~ 202.
- 59 Svakhine N, Ebert D. Interactive volume illustration and feature halos [A]. In: Proceedings of IEEE Pacific Graphics [C], Canmore, Alta, Canada, 2003, **15**(3): 67 ~ 76.
- 60 Csébfalvi B, Mroz L, Hauser H, *et al.* Fast visualization of object contours by non-photorealistic volume rendering [J]. Computer Graphics Forum, 2001, **20**(3): 210 ~ 218.
- 61 Tzeng F Y, Ma K L. A cluster-space visual interface for arbitrary dimensional classification of volume data [A]. In: Proceedings of the Joint Eurographics-IEEE TVCG Symposium on Visualization 2004 [C], San Diego, CA, 2004: 17 ~ 24.
- 62 Sereda P, Vilanova A, Gerritsen F A. Automating transfer function design for volume rendering using hierarchical clustering of material boundaries [A]. In: Proceedings of IEEE EuroVis [C], Lisboa, Portugal, 2006: 243 ~ 250.
- 63 Zhang J W, Sun J Z. Adaptive transfer function design for volume rendering by using a general regression neural network [A]. In: Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics [C], Xi'an, China, 2003: 2234 ~ 2239.
- 64 Tzeng F Y, Lum E B, Ma K L. An intelligent system approach to higher-dimensional classification of volume data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, **11**(3): 273 ~ 284.
- 65 Kniss J, Van Uiter R, Stephens A, *et al.* Statistically quantitative volume visualization [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2005 [C], Minneapolis, MN, USA, 2005: 37 ~ 45.
- 66 Grigoryan G, Rheingans P. Point-based probabilistic surfaces to show surface uncertainty [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, **5**(10): 564 ~ 573.
- 67 Ebert D S, Rheingans P, Terry S Y. Designing effective transfer functions for volume rendering from photographic volume [J]. IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 2002, **3**(2): 183 ~ 197.
- 68 Takahashi I, Lum E B, Ma K L, *et al.* ISpace: interactive volume data classification techniques using independent component analysis [A]. In: Proceedings of Pacific Graphics 2002 [C], Pohang, Korea, 2002: 366 ~ 374.
- 69 Hauser H, Mroz L, Bischli G I, *et al.* Two level volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, **7**(3): 242 ~ 252.
- 70 Hadwiger M, Berger C, Hauser H. High-quality two-level volume rendering of segmented data sets on consumer graphics hardware [A]. In: Proceedings of Visualization 2003 [C], Seattle, WA, USA, 2003: 301 ~ 308.
- 71 Viola I, Kanitsar A, Groller M E. Importance-driven volume rendering [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2004 [C], Austin, TX, USA, 2004: 139 ~ 145.
- 72 Viola I, Kanitsar A, Groller M E. Importance-driven feature enhancement in volume visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, **11**(4): 408 ~ 418.
- 73 Ljung P, Lundstrom C, Ynnerman A, *et al.* Transfer function based adaptive decompression for volume rendering of large medical data sets [A]. In: Proceedings of IEEE Symposium on Visualization and Graphics 2004 [C], Austin, TX, USA, 2004: 25 ~ 32.
- 74 Bordoloi U D, Shen H W. View selection for volume rendering [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2005 [C], Minneapolis, MN, USA, 2005: 72 ~ 79.
- 75 Takahashi S, Fujishiro I, Takeshima Y, *et al.* A feature-driven approach to locating optimal viewpoints for volume visualization [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization 2005 [C], Minneapolis, MN, USA, 2005: 63 ~ 70.