

## 体数据可视化传递函数研究

郭翰琦<sup>1,2)</sup>, 袁晓如<sup>1,2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(北京大学信息科学技术学院机器感知与智能教育部重点实验室 北京 100871)

<sup>2)</sup>(北京大学科学与工程计算中心 北京 100871)

(xiaoru.yuan@pku.edu.cn)

**摘要:** 体数据可视化被广泛地用于理解复杂的科学、工程、生物医学等领域的模拟和观测数据。体数据可视化的核心问题是传递函数的设置, 用户通过设置传递函数、定义数值到颜色和不透明度等可视特征, 然后由体可视化算法生成图像结果。文中从基于图像的传递函数、以数据为中心的传递函数、传递函数设置的用户界面和交互方式等角度, 对传递函数的基础和研究现状进行综述, 并对传递函数研究的前景进行了展望。

**关键词:** 体数据; 传递函数; 体数据可视化; 人机交互

**中图分类号:** TP391

## Survey on Transfer Functions in Volume Visualization

Guo Hanqi<sup>1,2)</sup> and Yuan Xiaoru<sup>1,2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(Key Laboratory of Machine Perception (Ministry of Education), School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871)

<sup>2)</sup>(Center for Computational Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract:** For understanding sophisticated volumetric data, volume visualization is widely applied in many area ranging from scientific research, engineering, and medical diagnosis. Transfer functions, which are often specified by users, transforms the data values into colors and opacities, thus the rendering algorithms can generate the volume visualization results. In this paper, we summarize the basics and the state-of-the-art research works on transfer functions, including data-centric and image-based transfer functions, as well as the novel user interface for transfer function design. We also discuss the future research in transfer functions.

**Key words:** volume data; transfer functions; volume visualization; human-computer interface

体数据可视化技术广泛地应用于科学与工程研究中的数值模拟、大气与海洋模拟以及医学诊断等领域。在体可视化应用中, 如何产生内涵丰富的图像结果, 以及如何为用户提供有效的交互手段是至关重要的。随着图形硬件以及体数据可视化算法的不断发展, 体可视化图像的绘制已经趋于成熟, 例如速度越来越快、绘制越来越精确, 而且产生出很多新的绘制风格。近年来, 体可视化的核心研究课题已经逐

渐从如何渲染和绘制体数据转变为传递函数的设置 (transfer function design)。传递函数决定了体可视化结果的内容, 它将体数据中的数值转化为视觉属性——颜色与不透明度值, 进而体绘制算法可以将这些数据转化为图形。用户通过调整传递函数, 隐藏或凸显体数据中的特征, 产生可视化结果。

传递函数设置是体可视化的核心问题。传递函数将体数据中的采样值转化为颜色和不透明度, 体绘制

算法就可以将体数据转化为图像.形式上,传递函数可以定义为

$$T: \mathbf{x} \mapsto \{c, \alpha\}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

其中,  $\{c, \alpha\}$  通常为颜色和透明度的二元组,  $\mathbf{x}$  为体数据的属性值,  $\mathbf{x}$  的维数  $n$  为属性的个数.  $\mathbf{x}$  所构成的空间称为特征空间(feature space). 传递函数本质上将体数据按照在特征空间中的分布进行了分类,并转化为光学属性. 在实际应用中,常用  $n$  维查

找表或者其他易于计算和存储的参数化的函数进行存储和运算. 对于标量场数据,最典型的传递函数类型为一维传递函数,即直接利用体数据采样值进行传递函数设置. 如图 1 所示,用户可以按照体素(voxels)统计直方图的提示,定义体素采样值到光学特征的映射. 对于多变量数据,需要使用多变量传递函数将体数据的多维属性映射为颜色和透明度值.

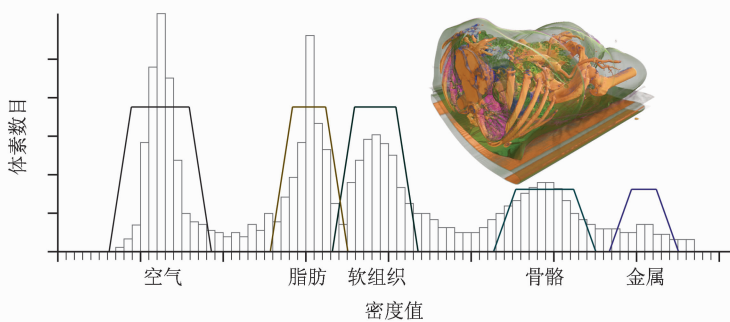


图 1 传递函数及其分类原理示意图

传递函数完成了从数据到光学特征(颜色和透明度等)的映射,它是体可视化算法中最重要的参数之一. 近年来,传递函数设计方法越来越多样,应用场合越来越广泛. 然而,传递函数还有很多潜在的问题需要解决,例如大部分的传递函数仍然需要很多人工干预才能达到满意的效果,传递函数的设计对用户很不直观等. 针对这些问题,可视化领域的研究者在 20 多年来不断提出新的方法,以提高体可视化方法的有效性和实用性. 传递函数的设计方法大致可以分为以数据为中心的方法和以图像为中心的方法<sup>[1]</sup>. 近年来,为了使传递函数设计更加直观易用,可视化领域的研究者还设计了一些新的直观的方法和交互手段.

## 1 以数据为中心的传递函数

以数据为中心的传递函数主要关注数据本身的数值属性及其衍生属性. 传递函数可以看作是对体数据的一种分类,即将具有不同特征的体素映射为不同的视觉特征. 用于体数据分类的属性所组成的空间通常称作特征空间.

### 1.1 一维、二维及多维传递函数设计

一维传递函数是最简单、直接的传递函数,它直接将体数据中的标量数值映射为颜色和透明度<sup>[2]</sup>. 例如,医学 CT 扫描数据常按照 HU 值(Hounsfield units)来衡量测量结果,进而根据不同的 HU 值对

数据进行分类,如空气的 HU 为  $-1000$ ,水为  $0$ ,血液为  $+30 \sim +45$ ,肌肉为  $+40$ ,骨骼大于  $+400$  等. 根据这些经验分类方法可以设定一维传递函数,将 CT 扫描中的不同种结构映射为不同的视觉特征. 除了 CT 扫描数据外,一维传递函数还可以对其他各类数据进行映射. 例如,湍流模拟数据中的涡量幅值(vorticity magnitude),大气模拟数据中的温度值等.

以数据为中心的传递函数往往需要用户对传递函数进行设置,通常的方法是在体数据的统计图(histogram)的提示下进行试错(trial-and-error),常见的一维传递函数设计的用户界面由用户设置曲线以定义颜色和透明度. 针对数值分布较复杂的体数据,Yuan 等<sup>[3]</sup>在传递函数设计界面的横轴引入了鱼眼(fish eye)放大工具,使得在提高传递函数设置界面空间利用率的同时,方便用户对传递函数进行精确和微小的调节. 这种传递函数的设置和呈现方式符合可视化中 Focus+Context 的理念,即在强调局部信息的同时将全局信息展示出来.

在体可视化应用中,一维传递函数的分类效果往往受到很大局限,因此可以引入体数据的导出变量提高传递函数的分类效果<sup>[2]</sup>. 例如,为了更好地在直接体绘制结果中体现表面信息,在传递函数设计时可以同时考虑体数据在空间中的梯度幅度值. 这样将衍生的维度引入传递函数设计,可以将本来在一维空间内难以区分的特性提取出来.

文献[4-6]更加系统地阐述了二维甚至高维传递函数的设计.在二维传递函数中,物质的分界面在二维统计图上常常表现为弧形<sup>[4,6]</sup>,通过一些小工具在统计图上将这些特性背后所代表的体素赋予颜色和透明度值,以获取更好的渲染效果.

Kniss 等<sup>[4,6]</sup>设计了二维传递函数设计中的一些小工具(Widgets),如图 2 所示.在二维传递函数中,物质的分界面在二维统计图上常表现为弧形或簇集形态,因此可以设计梯形、矩形等形状帮助用户定义颜色与不透明度.针对弧形特征,可以用弧形或抛物线形的特征选择器对二维传递函数做调整<sup>[7]</sup>.Kniss 等<sup>[4,6]</sup>还设计了三维传递函数设计的小工具,即在三维统计图上选取特征.三维传递函数中同时考虑了物质本身的特性以及一阶、二阶特性,使得表面信息更容易提取,但其复杂性使得用户不易使用.

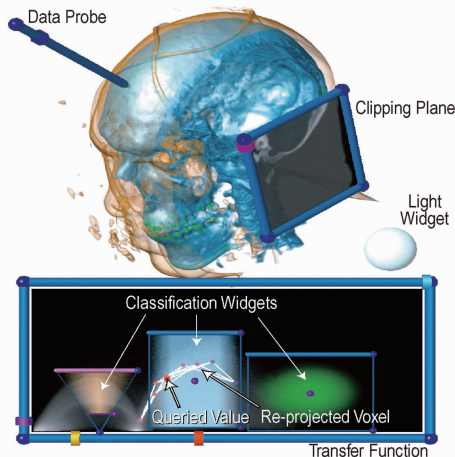


图 2 二维传递函数设置界面<sup>[4]</sup>

Hadwiger 等<sup>[8]</sup>提供了一种三维传递函数的用户界面,用户可以通过操纵三维特征空间的二维界面来定义所选择的特征.对于更高维度的传递函数,由于受到屏幕空间和人理解高维数据的困难,目前缺乏很有效的手段,但可以通过其他途径产生多维传递函数,例如通过机器学习<sup>[9-10]</sup>等方法.

除了提取数据的一阶、二阶梯度幅值外,还可以从数据中导出其他有意义的特征作为高维传递函数的变量,在新的特征空间中调整传递函数.表 1 所示为用于传递函数的体数据的衍生数据维度及对应文献.

与梯度幅值相仿,也可以基于曲率(curvature)设计传递函数<sup>[11]</sup>.通过曲率定义传递函数,还可以应用于体数据的非真实感绘制、显示等值面不确定性(uncertainty)等.但是对于噪声比较大的体数据,如 fMRI 数据,精确的曲率提取就变得比较困难.

表 1 体数据衍生维度及对应文献

衍生数据维度	文献	特性
一阶梯度幅值	[2,4]	增强边界
二阶梯度幅值	[5]	增强边界
曲率	[11]	可以实现一些 NPR 效果
相对大小	[12]	提高分类能力
空间信息	[13]	提高分类能力
局部统计特性	[14]	提高分类能力
局部极值	[15]	提高分类能力
环境遮挡	[16]	提高被遮挡物体的分类能力
分布	[17]	利用分布信息分类

Röttger 等<sup>[13]</sup>在设计传递函数时同时考虑了体数据的空间信息.对于二维散点图中的每一点,比较对应体素附近区域在散点图上的映射,通过这一变化定义距离函数,按照一定的半径范围赋予体素颜色与不透明度值,以区分落在散点图同一区域的 2 个特征.

进一步考虑空间特性,Correa 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于大小(size-based)的传递函数设计方法,如图 3 a 所示.其中大小信息的提取,可以通过对原数据作高斯模糊来提取新的体数据中的极大值点并估算其半径.对于一维传递函数,同一密度值可能对应着许多不同的特征,导致这些特征难以用简单的一维传递函数区分.用大小信息辅助一维传递函数的设计可以区分这样的特征,帮助用户设计传递函数.

为了更好地显示体数据中的表面信息,Sereda 等<sup>[15]</sup>提出了使用 LH 统计图设计传递函数的方法.该方法从任意体素出发,沿其梯度方向可以找到局部的最大值点  $F_H$  和最小值点  $F_L$ ,将  $F_L$  和  $F_H$  绘制成二维密度图即可得到 LH 统计图.对处于边界区域的体素,其  $F_H$  和  $F_L$  值相差比较大,利用这一特征可以方便地找到原体数据的边界信息,如图 3 c 所示.

Caban 等<sup>[18]</sup>提出了基于纹理的(texture-based)传递函数.该方法中体素的颜色和不透明度不是由其数值决定的,而是由局部纹理特性决定的.例如,在医学图像中血管壁和肺壁强度值相当,基于纹理的传递函数将分析这 2 种区域的属性,并赋予其不同的颜色和不透明度.使用基于纹理的传递函数有很多益处,如不需要用户的先验知识就可以区分具有相同数值特性的体素,而且可以区分形状相似的结构.

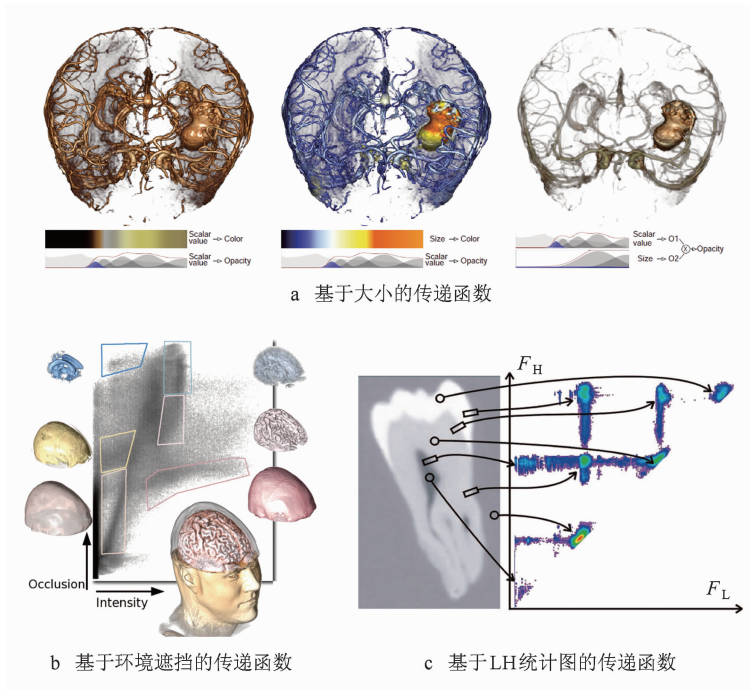


图 3 利用体数据的衍生维度进行传递函数设计

基于能见度 (visibility)<sup>[19]</sup> 和基于环境遮挡 (ambient occlusion)<sup>[16]</sup> 的传递函数设计是从渲染角度出发设计的传递函数. 在调节传递函数时, 用户往往给希望看到的部分赋予更高的不透明度, 但若同时要同时绘制多个特征, 外层的物体就会遮挡内部的物体. 在体绘制时可以提取每个体素的能见度, 并做出能见度统计图 (visibility histogram), 如图 4 所示, 可以提示用户哪些特征虽然被赋予了高不透明度, 但能见度仍然很低, 从而引导用户设计更好的传递函数; 同时, 也可以设计一些自动的优化算法生成传递函数. 基于能见度的传递函数是和用户的视角有关的, 可以计算每个体素在各个方向上的遮挡情况, 计算其环境遮挡, 在散点图上设计二维传递函数, 如图 3b 所示. 与能见度方法类似, 信息论方法也可以用于在传递函数设置时提示哪些部分被充分体现<sup>[20]</sup>.

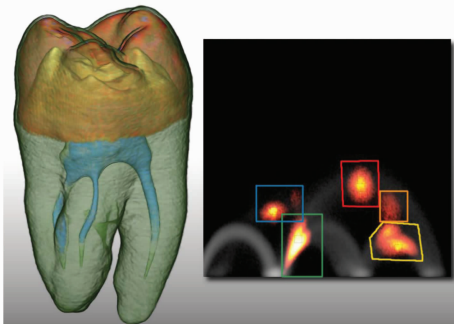


图 4 基于能见度的二维传递函数设置<sup>[19]</sup>

计算单个体素周围体素的一阶和二阶统计量 (均值与方差). 在物质分界面附近, 由于体素附近数据的方差比均一物质数据的方差要大, 因此可以利用这些统计量在体数据中特征边界附近的变化设定不透明度, 以清晰地表现物质边界.

### 1.2 基于体数据拓扑信息的传递函数设置

分析体数据, 特别是标量体数据的一种重要方法是等值面拓扑 (contour topology) 分析, 它常常能够表征体数据中的整体和局部的结构特征. 体数据可视化中, 传递函数设置的重要目标是将体数据中的这些结构特征清晰地呈在结果中呈现, 因此体数据的拓扑信息可以辅助传递函数的设置, 甚至可以帮助用户自动生成传递函数.

对于定义在单联通区域上的体数据, 其拓扑特性可以利用等值面树 (contour tree)<sup>[21]</sup> 来描述. 树的顶点为临界点 (critical point), 一般分为鞍点、极大值和极小值 3 种; 边代表等值面在临界值 (critical value) 之间变化时体数据中对应的区域.

最早将等值面拓扑信息引入体可视化的工作是“等值面谱 (contour spectrum)”<sup>[22]</sup>, 它可以辅助用户找到体数据中比较有意义的等值面, 帮助用户生成内涵丰富的体数据可视化结果.

Fujishiro 等<sup>[23-24]</sup> 将拓扑信息用于自动的传递函数设置, 这种方法假定临界值为体数据中重要的数值特征, 并对这样的值赋予高不透明度和不同的颜色, 则体数据中的同质区域被隐匿, 只强调体数据中比较重要的成分.

Patel 等<sup>[14]</sup> 提出了矩曲线 (moment curves), 即

利用体数据拓扑信息还可以进行局部传递函数(local transfer functions)的设置,与常见的传递函数不同,它可以对体数据中数据不同拓扑结构的区域进行区分.然而,这种基于拓扑信息的局部传递函数往往比传统的全局传递函数更难设置,因此近年来出现一些对传递函数的颜色设置进行自动化的工作,在一定程度上降低了局部传递函数设置的难度.Zhou等<sup>[25]</sup>利用 Darcy's law 设置了等值树上的流动模型,使树结构上不同层次的节点采用不同色相(hue)的颜色.此外,还可以根据拓扑信息定义重要性函数,以优化颜色的配置<sup>[26]</sup>.

### 1.3 多变量体数据的传递函数设置

随着科学技术的发展与医学的进步,越来越多的数据同时包含了多个变量和通道.在医学数据中,以可视人体数据(visible human)为例,其中包含了CT, fMRI 以及一些彩色照片数据.这样的数据含有多个变量和模态,如何利用所有或部分的变量生成有意义的可视化结果成为一个研究课题.

多变量传递函数往往难以用查找表的方式存储和使用,因此需要使用其他参数化的表达方式.其中

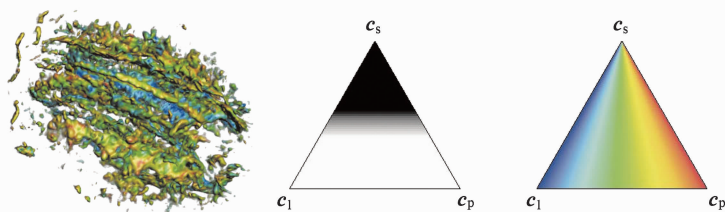


图 5 针对 DT-MRI 数据的传递函数设计<sup>[32]</sup>

近年来,有很多科学可视化的研究工作中引入了信息可视化中高维数据可视化的一些成果,用来解决传递函数设计中的问题,这些方法包括平行坐标、维度投影图等. Guo等<sup>[33-34]</sup>提出了一种基于维度投影和平行坐标结合形式的多变量传递函数设置界面,如图 6 所示,使用户可以在投影图和平行坐标图之间灵活切换和选择,以定义多变量传递函数.下面分别总结基于平行坐标和维度投影的传递函数设置方法.

#### 1) 基于平行坐标的多变量传递函数设置

平行坐标<sup>[37-38]</sup>是经典的高维数据可视化工具之一.对于多变量传递函数设计,用户需要首先理解复杂的高维特征空间,而平行坐标恰恰可以作为这样的工具.例如针对多模态的卫星遥感图像, Yuan等<sup>[39]</sup>利用平行坐标设置多变量传递函数将不同模态的测量值映射为颜色,以供领域科学家进行分析和解读.

最常见的形式为高斯传递函数<sup>[27]</sup>,它将传递函数表示为一系列高斯核函数的叠加. Wang等<sup>[28-29]</sup>提出了通过高斯混合模型(Gaussian mixture model)对数据分布进行拟合,进而生成高斯传递函数的方法.

含有彩色信息的体数据也可以看作是一种多变量体数据. Ebert等<sup>[30]</sup>将照片体数据的 RGB 值映射到  $L * u * v$  色彩空间中,进而调整传递函数,该色彩空间中的  $u *$  成分很好地提示了肌肉信息,利用颜色的距离梯度的点积还可以帮助用户找到骨骼、脂肪和其他组织信息.如果结合 CT 数据和 fMRI 数据,则可以更好地利用各通道的优势,在可视化结果中反映更多的内涵.

DT-MRI 数据也可以作为多变量体数据进行处理,用传递函数设定体素的颜色和不透明度直接将数据绘制出来<sup>[31-32]</sup>,一种方法是利用张量的 3 个特征值推算出形状特征  $c_l$  (linear anisotropic),  $c_p$  (planarly anisotropic) 和  $c_s$  (isotropic), 如图 5 所示.在三角形中(bary-centric 坐标)调节颜色和不透明度,直接应用于体数据中.这样,用户可以直观地在绘制结果中看出数据集的方向分布特征.

平行坐标可以用来探索多变量体数据<sup>[40]</sup>.为了提高平行坐标渲染的速度,可以对数据做预处理,存储平行坐标图像,用户通过数据刷等交互工具提取出体数据中的表面等特征.类似地, Jones等<sup>[41]</sup>利用坐标指定粒子系统中粒子的颜色,并交互地探索数据.在平行坐标中,用户也可以观察到所感兴趣的数据范围随时间的变化.这类方法可以直接地用于传递函数设计<sup>[35-42]</sup>.

#### 2) 基于投影和降维方法的传递函数设置

随着传递函数研究的不断深入,越来越多的维度和特征被引入传递函数设计中,但是用户难以直接调节高维传递函数.除了使用一些智能的交互界面间接地设计传递函数外,还可以对高维特征空间进行降维、投影与聚类,在相对低维的空间中定义传递函数.

Pinto等<sup>[43]</sup>使用了自组织映射(self-organizing maps, SOM)的方法对高维空间降维,将  $N$  维体素

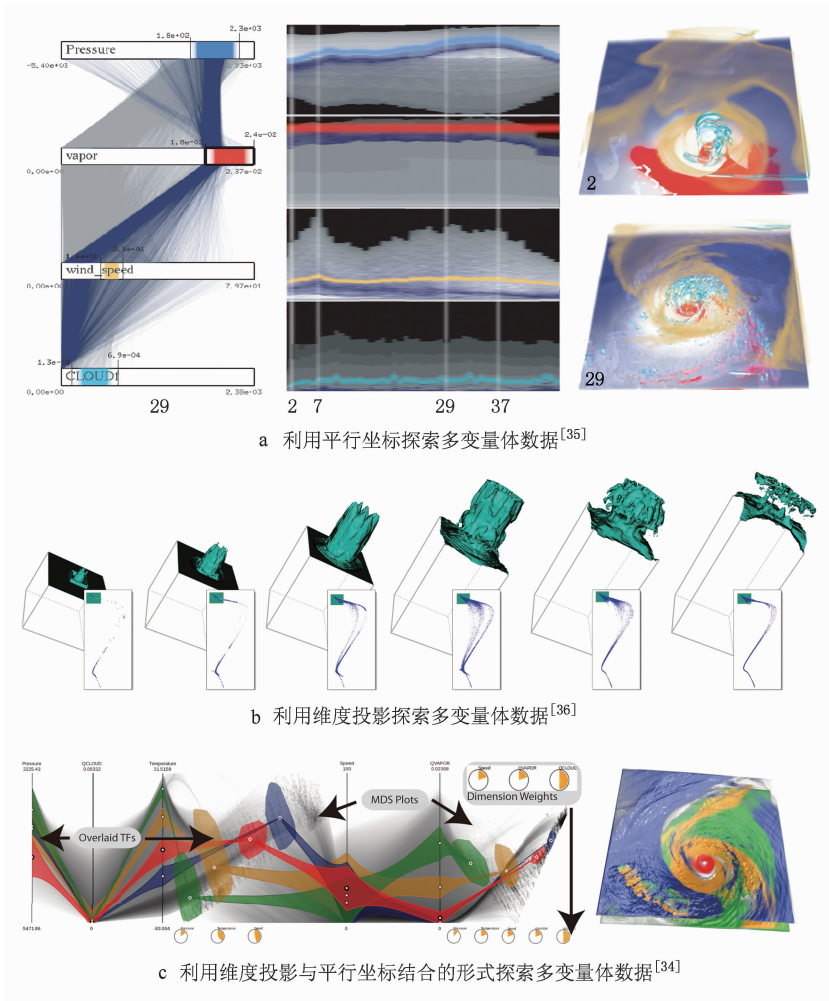


图 6 基于平行坐标、维度投影及其结合形式的多变量传递函数设置<sup>[34-36]</sup>

映射到二维空间中,并记录下该空间中每个点对应的原素位置,用户即可在二维空间中调整传递函数.类似地,Tzeng 等<sup>[44]</sup>利用 ISODATA (iterative self-organizing data analysis technique)技术对高维空间中的体素进行聚类,用户通过不断地选择不同聚类结果调整迭代参数,取得所需的传递函数. Blaas 等<sup>[45]</sup>采用交互的动态坐标系统将高维多变量数据投影到二维空间中,方便用户选取特征.独立成分分析(independent component analysis, ICA)也可以用于体数据的分类<sup>[46]</sup>.类似的方法也可以用于向量场的交互式探索<sup>[47]</sup>.

体数据的降维投影的最大问题是数据的规模.传统的降维方法,如经典 MDS(multi-dimensional scaling)的时间和空间复杂性使得多变量体数据难以降维.针对这一问题,Paulovich 等<sup>[36]</sup>提出了部分线性多维投影(part-linear multidimensional projection, PLMP),大大地减小了投影过程的时间和空间复杂度,使其很好地应用于多变量体数据的浏览,图 6 a 所示.

经过近年来的研究,以数据为中心的传递函数分类能力得到了提高,然而高维的特征空间不仅给用户带来了理解和认知上的困难,而且也难以设计有效的多维传递函数设置界面.

## 2 基于图像的传递函数设置

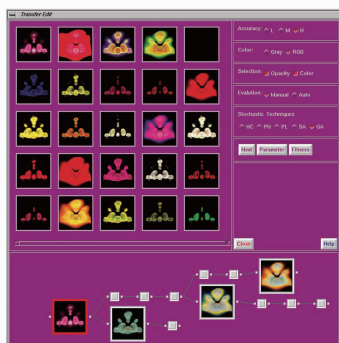
与以数据为中心的传递函数设计不同,基于图像的传递函数设置以特定图像结果为目标间接地改变传递函数.这类方法是“目标导向”的,用户不需要直接设置传递函数,只需要通过一定方式设定可视化结果.

体绘制图像的优化和改善往往可以看作是一个参数优化的过程,其中参数为传递函数.为了解决传递函数这一参数优化问题,He 等<sup>[48]</sup>提出了基于随机搜索的传递函数设计,首先由计算机随机生成若干传递函数,并给出渲染结果,以小图的形式排列在界面中;然后计算机通过用户的选择对传递函数进行优化,以用户的需求为目标获得迭代结果,如图 7 a

所示. 在这个迭代过程中应用了很多图像处理的方法, 如计算熵、计算方差以及能量等方式评价图像, 最终找到合适的传递函数.

类似地, Design Galleries<sup>[49]</sup>展示了一系列用不同传递函数产生的体绘制结果供用户选择和优化, 如图 7 b 所示. 由不同传递函数产生的缩略图在平

面中以 MDS 的方式排列, 其中传递函数间的距离是由它们参数化后的距离决定的. 这样, 相似的传递函数在图中排列得比较近, 而不相似的传递函数在图中排列较远, 方便用户选择. 与上述基于随机搜索的传递函数方法类似, 用户也需要从大量的候选传递函数中选择满意的结果, 如图 7 b 所示.



a 基于随机搜索的传递函数设计界面<sup>[48]</sup>



b Design Galleries<sup>[49]</sup>

图 7 基于图像的传递函数设计

Fang 等<sup>[50]</sup>将传递函数定义为一系列的三维图像处理过程, 并允许用户调节参数, 以达到所需效果. 例如, 用户可以定义“增强边缘”这一语义目标, 该方法即通过一系列的算法实现这个效果. 这种方法直观有效, 避免了使用者对传递函数的直接调节, 然而用户却难以控制优化的过程与结果, 更无法通过这种方法对数据进行探索和分析.

基于例子 (example-based) 的体可视化<sup>[51]</sup>也是一种目标导向的方法, 用户可以找到一些已有的可视化结果, 甚至是插图, 把这些例子的风格传递给当前所探索的数据集, 其中风格是定义在对图像结果中颜色的统计特性上的. 这种方法对于医学数据等特殊应用比较有效.

传统的基于图像的传递函数可以在一定程度上避免用户对特征空间的探索, 然而这类方法对用户而言难以定义明确的优化目标及改变程度, 在实际应用中不如以数据为中心的传递函数广泛.

### 3 传递函数的设置界面与交互方式

为了方便用户在更高层次上对复杂的参数空间

中指定传递函数, Rezk-Salama 等<sup>[52]</sup>将复杂的参数模型抽象为语义. 语义模型定义在一系列传递函数模板上, 用户可根据预设的语义对最终渲染的结果做直接的调整, 极大地方便了非专家用户, 特别是医护人员对体可视化的应用. 这项工作同时阐释了如何在 2 种语义的传递函数间做渲染结果的平滑过度, 如图 8 所示. Rautek 等<sup>[53]</sup>定义了语义层, 将体数据的属性映射到多种可视化风格中. 在基于语义的传递函数中, 基础的传递函数仍然是通过其他方法指定的, 而融合这些传递函数也是很复杂的问题.

近年来, 基于手绘输入的用户界面越来越常见, 因为手绘输入能够较直接地表现用户意图, 使用也比较直观. 在计算机图形学领域, 手绘输入界面的应用也越来越广泛, 例如在很多图像处理、三维建模、甚至体数据分割等工具中都引入了手绘输入. 可视化研究人员也提出了一些通过手绘界面设计传递函数的方法, 以简化用户设置传递函数的过程. 例如, 用户可以在体数据的二维切片上通过手绘笔画标定预期的分类效果, 并指定颜色与不透明度, 实现传递函数设计<sup>[9-10]</sup>. 这种方法适用于高维度的数据, 特别是噪声大、分类困难的 MRI 数据, 其机制是由人工

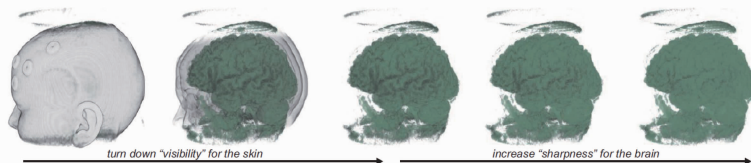


图 8 基于语义的传递函数<sup>[52]</sup>

神经网络或支持向量机等机器学习算法实现的. Wu 等<sup>[54]</sup>提出了一种新的利用手绘输入设计传递函数的方法,用户可以从预先生成的一系列含有不同特征的体绘制图像中融合不同的特征,以生成新的体绘制结果.特征融合和删除语义是由用户手绘输入的.更进一步,Ropinski 等<sup>[55]</sup>提出了基于笔画的传递函数设计,用户可以通过在体绘制图像上指定前景和

背景进而提取对应体数据的特征分布,并将这些特征保存为图层,以便进一步调整不同图层的颜色与不透明度.最近,Guo 等<sup>[56]</sup>提出了一种“所见即所得”的体可视化传递函数设置方法,如图 9 所示,用户可以利用类似于 Photoshop 等软件中的喷涂工具直接对可视化结果进行修改,而不需要直接设置和调节传递函数.

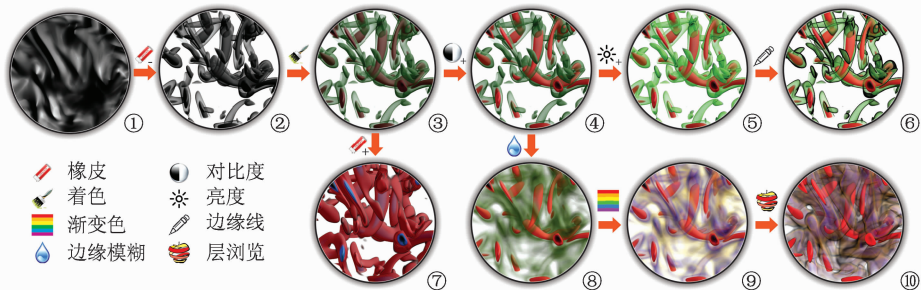


图 9 一种“所见即所得”的传递函数设置方法

对传递函数用户界面的研究和探索具有非常积极的意义,它使用户能够更加快捷地设置传递函数,甚至不需要直接对传递函数进行编辑;然而,用户能够直接操作的仍然是一些间接的结果,例如图层和一些预先生成的绘制结果等.今后对于传递函数的研究工作将更加强调用户的中心和主导地位,使体数据可视化得到更加广泛的应用.

#### 4 小结与展望

本文简要回顾并总结了过去 20 多年中重要的体数据可视化传递函数设置方法,这些方法是与可视化学科的发展,甚至是很多科学与工程领域的发展相辅相成的.随着体数据可视化中绘制算法的不断成熟与进步,对传递函数的研究成为了体可视化的中心课题;随着体数据可视化需求的不断增长,领域用户也对传递函数设置方法提出了新的需求.

传递函数的概念是朴素而简单的,但它又是极其复杂的,它实现了体数据数值到颜色、不透明度等可视特征的映射;但由于体数据可视化中存在的遮挡、非线性混合、人的视觉感知能力,甚至特定领域约定俗成的规则等复杂因素,传递函数的设置远远不像它的定义那样简单.

从传统的分类来讲,传递函数研究可以分为以数据为中心和基于图像两大类,这 2 类方法都可以不同程度地帮助用户探索和分析体数据.然而这两大类方法的出发点也存在一定的局限性,它们并没有将用户置于中心地位;用户通过传递函数探索体数据往往扮演的是被动的角色,未能充分发挥主观

能动性.

为了使体可视化工具得到更加广泛和有效的应用,我们依然需要更加深入地开展对传递函数的研究.一方面,传递函数需要更加有效,这种有效性主要体现在传递函数的分类能力,特别是复杂的多变量体数据等;另一方面,传递函数需要更加直观和易用,使用户能够更方便地探索和分析数据.

#### 参考文献 (References):

- [1] Pfister H, Lorensen W E, Bajaj C L, *et al.* The transfer function bake-off [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(3): 16-22
- [2] Levoy M. Display of surfaces from volume data [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1988, 8(3): 29-37
- [3] Yuan X R, Nguyen M X, Chen B Q, *et al.* High dynamic range volume visualization [C] // *Proceedings of IEEE Visualization*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 327-334
- [4] Kniss J, Kindlmann G L, Hansen C D. Multidimensional transfer functions for interactive volume rendering [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2002, 8(3): 270-285
- [5] Kindlmann G L, Durkin J W. Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering [C] // *Proceedings of IEEE Symposium on Volume visualization*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1998: 79-86
- [6] Kniss J, Kindlmann G L, Hansen C D. Interactive volume rendering using multi-dimensional transfer functions and direct manipulation widgets [C] // *Proceedings of IEEE Visualization*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 255-262



- [7] Higuera F V, Sauber N, Tomandl B, *et al.* Automatic adjustment of bidimensional transfer functions for direct volume visualization of intracranial aneurysms [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2004, 5367: 275-284
- [8] Hadwiger M, Laura F, Rezk-Salama C, *et al.* Interactive volume exploration for feature detection and quantification in industrial CT data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1507-1514
- [9] 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
- [10] Tzeng F Y, Lum E B, Ma K L. A novel interface for higher-dimensional classification of volume data [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 2003: 505-512
- [11] Kindlmann G L, Whitaker R T, Tasdizen T, *et al.* Curvature-based transfer functions for direct volume rendering; methods and applications [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 2003: 513-520
- [12] Correa C, Ma K L. Size-based transfer functions: a new volume exploration technique [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1380-1387
- [13] Röttger S, Bauer M, Stamminger M. Spatialized transfer functions [C] // Proceedings of EuroVis05; Joint Eurographics-IEEE VGTC Symposium on Visualization. Aire-la-Ville; Eurographics Association Press, 2005: 271-278
- [14] Patel D, Haidacher M, Balabanian J P, *et al.* Moment curves [C] // Proceedings of IEEE Pacific Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 2009: 201-208
- [15] Sereda P, Bartroli A V, Serlie I, *et al.* Visualization of boundaries in volumetric data sets using LH histograms [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(2): 208-218
- [16] Correa C, Ma K L. The occlusion spectrum for volume classification and visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1465-1472
- [17] Johnson C R, Huang J. Distribution-driven visualization of volume data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(5): 734-746
- [18] Caban J, Rheingans P. Texture-based transfer functions for direct volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1364-1371
- [19] Correa C, Ma K L. Visibility histograms and visibility-driven transfer functions [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(2): 192-204
- [20] Haidacher M, Bruckner S, Kanitsar A, *et al.* Information-based transfer functions for multimodal visualization [C] // Proceedings of Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine. Aire-la-Ville; Eurographics Association Press, 2008: 101-108
- [21] Boyell R L, Ruston H. Hybrid techniques for real-time radar simulation [C] // Proceedings of IEEE 1963 Fall Joint Computer Conference. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 1963: 445-458
- [22] Bajaj C L, Pascucci V, Schikore D. The contour spectrum [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 1997: 167-174
- [23] Fujishiro I, Azuma T, Takeshima Y. Automating transfer function design for comprehensible volume rendering based on 3D field topology analysis [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 1999: 467-470
- [24] Fujishiro I, Takeshima Y, Azuma T, *et al.* Volume data mining using 3D field topology analysis [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, 20(5): 46-51
- [25] Zhou J L, Takatsuka M. Automatic transfer function generation using contour tree controlled residue flow model and color harmonics [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1481-1488
- [26] Wang L, Kaufman A. Importance driven automatic color design for direct volume rendering [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(3/4): 1305-1314
- [27] Kniss J, Premoze S, Ikits M, *et al.* Gaussian transfer functions for multi-field volume visualization [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 2003: 497-504
- [28] Wang Y H, Chen W, Shan G H, *et al.* Volume exploration using ellipsoidal Gaussian transfer functions [C] // Proceedings of IEEE Pacific Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 2010: 25-32
- [29] Wang Y H, Chen W, Zhang J, *et al.* Efficient volume exploration using the Gaussian mixture model [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(11): 1560-1573
- [30] Ebert D S, Morris C J, Rheingans P, *et al.* Designing effective transfer functions for volume rendering from photographic volumes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(2): 183-197
- [31] Kindlmann G L, Weinstein D M. Hue-balls and lit-tensors for direct volume rendering of diffusion tensor fields [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos; IEEE Computer Society Press, 1999: 183-189
- [32] Kindlmann G L, Weinstein D M, Hart D. Strategies for direct volume rendering of diffusion tensor fields [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(2): 124-138

- [33] Guo H Q, Xiao H, Yuan X R. Multi-dimensional transfer function design based on flexible dimension projection embedded in parallel coordinates [C] //Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 19-26
- [34] Guo H Q, Xiao H, Yuan X R. Scalable multivariate volume visualization and analysis based on dimension projection and parallel coordinates [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(9): 1397-1410
- [35] Akiba H, Ma K L. A tri-space visualization interface for analyzing time-varying multivariate volume data [C] // Proceedings of Eurographics/ IEEE Symposium on Visualization (EuroVis 2007). Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 115-122
- [36] Paulovich F V, Silva C T, Nonato L G. Two-phase mapping for projecting massive data sets [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1281-1290
- [37] Inselberg A. The plane with parallel coordinates [J]. The Visual Computer, 1985, 1(2): 69-91
- [38] Inselberg A, Dimsdale B. Parallel coordinates: a tool for visualizing multi-dimensional geometry [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1990: 361-378
- [39] Yuan X R, Xiao H, Guo H Q, *et al.* Scalable multi-variate analytics of seismic and satellite-based observational data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1413-1420
- [40] Blaas J, Botha C P, Post F H. Extensions of parallel coordinates for interactive exploration of large multi-timepoint data sets [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1436-1451
- [41] Jones C, Ma K L, Ethier S, *et al.* An integrated exploration approach to visualizing multivariate particle data [J]. IEEE Computing in Science and Engineering, 2008, 10(4): 20-29
- [42] Zhao X, Kaufman A. Multi-dimensional reduction and transfer function design using parallel coordinates [C] // Proceedings of IEEE/ Eurographics International Symposium on Volume Graphics. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2010: 69-76
- [43] Pinto F M, Freitas C. Design of multi-dimensional transfer functions using dimensional reduction [C] //Proceedings of Eurographics/IEEE Symposium on Visualization (EuroVis 2007). Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 131-138
- [44] Tzeng F Y, Ma K L. A cluster-space visual interface for arbitrary dimensional classification of volume data [C] // Proceedings of Eurographics/IEEE Symposium on Visualization (VisSym 2004). Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2004: 17-24
- [45] Blaas J, Botha C P, Post F H. Interactive visualization of multi-field medical data using linked physical and feature-space views [C] //Proceedings of Eurographics/IEEE Symposium on Visualization (EuroVis 2007). Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 123-130
- [46] Takanashi I, Lum E B, Ma K L, *et al.* ISpace: interactive volume data classification techniques using independent component analysis [C] //Proceedings of Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002: 366-374
- [47] Joel D, Anderson E W, Nonato L G, *et al.* Interactive vector field feature identification [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1560-1568
- [48] He T S, Hong L C, Kaufman A E, *et al.* Generation of transfer functions with stochastic search techniques [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1996: 227-234
- [49] Marks J, Andalman B, Beardsley P A, *et al.* Design galleries: a general approach to setting parameters for computer graphics and animation [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1997: 389-400
- [50] Fang S F, Biddlecome T, Tuceryan M. Image-based transfer function design for data exploration in volume visualization [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1998: 319-326
- [51] Lu A D, Ebert D S. Example-based volume illustrations [C] // Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 655-662
- [52] Rezk-Salama C, Keller M, Kohlmann P. High-level user interfaces for transfer function design with semantics [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006: 12(5): 1021-1028
- [53] Rautek P, Bruckner S, Gröller E. Semantic layers for illustrative volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007: 13(6): 1336-1343
- [54] Wu Y C, Qu H M. Interactive transfer function design based on editing direct volume rendered images [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(5): 1027-1040
- [55] Ropinski T, Pražni J S, Steinicke F, *et al.* Stroke-based transfer function design [C] //Proceedings of IEEE/ Eurographics International Symposium on Volume and Point-Based Graphics. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2008: 41-48
- [56] Guo H Q, Mao N Y, Yuan X R. WYSIWYG (what you see is what you get) volume visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(12): 2106-2114