

体数据内部结构绘制技术及其在3维医学 图像分析中的应用

周建龙 王知行

(华南理工大学计算机科学与工程学院, 广州 510640)

摘要 首先基于集合论方法对体数据内部结构进行分析(内部结构是指被外部物体遮挡或隐藏而不能从外部直接看到的物体或结构),从而给出了内部结构绘制技术的功能要求。基于此功能要求,提出了基于内部结构区域的体绘制技术来分析体数据内部结构的方法。基于内部结构区域的体绘制技术之所以能够分析体数据内部结构是因为该方法把体数据分为两个子集:内部结构区域(或称局部区域)和周围区域。内部结构区域提供了深入体数据内部的机制,通过对内部结构区域的交互,用户可以分析体数据内部的任意区域,从而达到对体数据内部结构和整个体数据的综合理解。该方法还可对内部结构进行量化分析从而提高用户分析体数据的质量。最后,该方法用于分析3维医学图像以显示其在实际应用中的强大功能。实验结果表明,该方法对3维医学图像中的内部结构可以有效地进行定性和定量分析。

关键词 体视化 内部结构 医学图像分析

中图法分类号:TP301.6 文献标识码:A 文章编号 1006-8961(2008)08-1570-06

Visualization of Internal Structures of Volumetric Data and Applications in 3D Medical Image Analysis

ZHOU Jian-long, WANG Zhi-yan

(School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract In this paper we firstly analyze internal structure(refers to structures that are hidden behind outside structures and can not be seen directly) of volumetric data based on the set theory and describe the requirement for the volume rendering method used for rendering internal structures. Based on the requirements, we propose the use of an internal structure region-based volume renderer that offers an alternative for visualization of internal structures of volumetric data. The approach can analyze internal structures because it divides the volume data into two subsets; internal structure region (or local region) and context region. The internal structure region provides mechanisms to peel inside the data set for depicting information of internal structures. The user can analyze and understand any region of internal structures through interacting with the internal structure region. The proposed approach can be used to analyze volume data quantitatively and thus improve the analysis quality. The proposed approach shows powerful usefulness in 3D medical image analysis. The experiments show that the proposed approach is effective for analyzing inner structures.

Keywords volume rendering, internal structures, medical image analysis

1 引言

近年来,医学图像断层扫描术得到了快速的发

展,如计算机断层摄影、核磁共振成像、超声等,从而为医生和科研人员提供了大量的体数据。除了需要很好地管理这些体数据之外,对体数据进行分析和解释并且理解体数据中所含的物体是近年来科学计

收稿日期:2006-11-21;改回日期:2007-03-13

第一作者简介:周建龙(1974 ~),男。华南理工大学计算机应用专业博士研究生。主要研究方向为体视化技术及医学图像分析。

E-mail: Zhou. Jianlong@mail. scut. edu. cn

算可视化的主要研究领域之一。医生分析这些数据的方法通常是对原始的2维切片图像进行显示和交互以分析和解释3维数据,从而得到有用的诊断信息^[1]。由于2维切片显示模式常常不能显示足够的信息来解释位于多个2维切片上的3维结构,特别是对复杂的区域如人体的胸部数据更是显得无能为力。另外,这种方法不能充分利用数据固有的3维结构^[2]。随着成像设备分辨率的提高,这种方法不再是唯一可行的体数据分析方法。因此,体视化技术越来越广泛地使用于体数据分析^[1]。

从用户的观点来看,体视化是作为一种工具允许用户从数据中提取3维结构从而提高医学诊断过程的效率。体视化提供了基于内容的数据表示而不是基于像素的数据表示形式^[3]。但是,3维医学图像数据常常包含有复杂的内部结构,由于它们的空间位置关系,内部结构常常被外部的结构覆盖,从而影响了用户对内部结构的分析和理解。这个问题在医学图像数据中很普遍:物体通常有凹面结构,至少有部分被其他物体覆盖^[1]。3维数据分析的主要目的之一是找到并定位数据内的内部结构,从而可让医生从3维数据中提取病理信息。能够帮助医生交互地解释和分析内部结构的工具对医生进行诊断和做出治疗计划十分有用。因此,内部结构是3维数据分析的一个重要方面,但是,使用现有的体视化技术来定位内部结构有以下问题:

(1)在体视化中没有特殊的机制考虑移去覆盖物体并“深入”数据内不同层以提取内部结构;

(2)由于转换函数中“函数值—表达的意义”之间的关系可能是局部而不是全局常数,全局的单个转换函数不能有效地描述局部结构;

(3)为了使内部结构更容易理解,没有专门的机制来分别表示不同的内部结构。

在绘制超大数据时,由于通常不可能同时显示所有的数据信息,因此决定绘制哪一个数据子集和使用什么绘制方法变得十分重要。传统体视化方法的缺点主要是没有考虑所分析数据的结构信息,关于物体特征的知识没有显式地集成到绘制流程中,因此,结构分析部分常常作为一个后处理步骤在图像空间进行^[4]。如果把能够提供结构信息的数据特征集成到绘制流程并同时绘制内部结构区域和外围区域将使整个绘制提供更多的数据信息。

本文提出的内部结构绘制方法把数据分为内部结构区域(或称局部区域)和周围区域,在周围区

域,提取并绘制主要物体特征(如边缘、表面等)以给用户提供导向信息,而内部结构区域主要绘制用户感兴趣的内部结构的详细信息。该方法的主要难点在于开发一个集成架构以在体数据中提取有用特征,并把这些特征与内部结构区域绘制有效地结合在一起以提供物体详细信息。此基于特征的绘制方法需要包含以下两个主要模块:

(1)一个使用3维图像处理技术的特征提取模型以分析物体结构并提供周围区域信息;

(2)一种受限的光线投射体绘制法以在内部结构区域绘制用户感兴趣的内部结构的详细信息。

2 研究现状

体视化技术的研究近年来趋向于把多种绘制方法结合在一起绘制数据以提取更多的体数据信息。Hauser等人提出了一种称为两级体绘制的方法^[5]。该方法允许用户有选择地使用不同的绘制方法绘制3维数据中的不同子集。Rheingans和Ebert给出了一种体轮廓边缘绘制方法,该方法可看作一种基于特征的绘制方法^[6],在此方法中,原始的体数据特征(如边缘)用非真实感图形绘制(NPR)方法绘制,该方法的主要思想是需要增强的物体特征用基于局部体数据的特征(如梯度)定义并且可以局部增强。Csebfalvi等人提出了一个基于梯度大小来可视化物体轮廓的NPR方法^[7]。Westermann和Ertl用多尺度方法提取体数据特征并把他们集成到绘制流程中^[4]。Bullitt和Aylward指出,一个绘制3维体数据的理想方法应该包括交互地移出遮挡物体和/或获得有关所选物体的相关信息的能力^[8]。已有的绘制体数据中被覆盖的内部结构的方法按使用技术的不同主要可分为以下几个方面:一是通过改变外层物体的不透明度使其透明或半透明来实现被遮挡物体的绘制,这类方法主要用于基于表面绘制的方法中^[9];二是通过使用体剪切方法把遮挡内部结构的外部物体移出从而达到显示内部结构的目的^[10],使用这类方法绘制内部结构的缺点是由于移出了外部的遮挡物体,使用户感兴趣的内部结构失去了参考点,从而影响用户对内部结构的理解。虽然这些方法在一定程度上能够提供较好的可视化结果,但是它们都不能深入体数据内部同时显示内部被覆盖的结构和外部结构,缺乏对体数据的全局理解。与Hauser提出的两级体绘制的局部绘制和全局合成

方法不同,本文提出的方法用内部结构区域显示感兴趣的内部结构详细信息并用周围区域绘制整体数据的结构来生成绘制流程,这种方法是对传统体绘制方法的一个扩展。

3 基于集合论的内部结构分析

3.1 概念的提出

体数据中内部结构分析的本质是内部结构只占整个体数据的一小部分,并且可以处于体数据内部任意位置,用户需要对内部结构区域和其周围的结构区域分开处理才能有效地分析内部结构。为了更好地描述内部结构与整个体数据的关系,用集合概念来描述体数据中不同区域之间的关系,整个体数据可以看作是一个集合 G ,而内部结构是全集 G 的一个子集 F ,内部结构的周围区域也是全集 G 的一个子集 C ,它们之间有如下的关系:

$$F \subseteq G$$

$$C \subseteq G$$

$$F \cup C = G$$

$$F \cap C = \emptyset$$

如何用体绘制方法描述上述不同子集之间的关系将是本文要解决的问题之一。由上述集合关系的描述可以看出,各个子集相互独立并且它们的交集是空。从集合概念到体绘制方法之间必须建立联系的桥梁才能有效地用体绘制方法描述集合关系,这个桥梁就是把集合关系转换为体绘制方法所提供的功能要求以描述等价的集合关系。因此,根据所述集合关系,体绘制方法必须具备如下功能:对不同的区域子集分别绘制以保证子集之间没有交集;不同的区域子集使用不同的绘制方法;子集的大小和位置可以动态改变以描述不同的子集。基于以上功能要求,本文所用绘制方法把体数据分为两个区域(子集):内部结构区域和周围区域,内部结构也称为焦点区域。基于内部结构区域的体绘制是本文提出的绘制内部结构的有效方法之一。

3.2 基于内部结构区域的体绘制

基于内部结构区域的体绘制方法通过使用一个额外的辅助几何体(如球体、正方体)把体数据分为辅助几何体外和辅助几何体内两部分从而形成两个子集。辅助几何体内部分称为内部结构区域,用于绘制物体内部结构详细信息;辅助几何体外部区域称为周围区域。内部结构区域用直接体可视化或表

面绘制方法绘制;而周围区域主要用于提供体数据的结构信息并增强体数据特征,该区域可以用基于特征的方法(如轮廓绘制)绘制。在本文体绘制方法的总体框架中,内部结构区域可以交互地改变,通过这种交互方法,体视化过程可以由内部结构区域来导引以分析体不同内部区域。图 1 表示的是基于内部结构区域的体绘制方法的总体框架的 2 维示例。

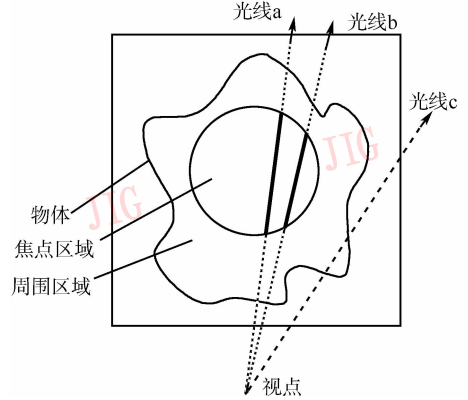


图 1 基于内部结构区域的体绘制方法的总体框架

Fig. 1 The outline of internal structure region-based volume rendering approach

4 周围区域的绘制

基于特征的体视化技术广泛应用于计算流体力学(CFD)可视化^[11],本文对基于特征的概念进行扩展并应用于 3 维医学图像可视化以描述数据的结构信息。在周围区域中,物体边界及边缘包含大多数的相关信息,是主要的物体特征,因此,在周围区域中,提取主要的物体边界及边缘并对其进行绘制。

4.1 绘制流程

在体绘制中,通常基于体数据梯度信息提取物体边界和边缘特征。本文使用的梯度计算方法是 Zucker-Hummel(ZH)^[12]方法。ZH 方法是一个 3 维边缘算子,它利用 $3 \times 3 \times 3$ 相邻体素的整体信息来得到边缘的更好估计。本文基于梯度的特征提取过程如下:首先计算体数据的梯度,然后检查每个取样位置的梯度值是否是局部最大值。当一个位置的梯度值大于或等于其相邻位置梯度值,则认为该梯度值为局部最大值。当取样位置具有局部最大梯度值时设置该位置的值为 1,否则为 0,这样生成一个二元体数据掩码,该体数据掩码包含原始体数据的边界信息,用这个体数据掩码控制最后的绘制合成过

程。使用这种方法提取数据特征不需要指定特定的边界阈值,系统能够自动地提取边界信息。

从特征提取过程中得到一个与原始体数据具有相同分辨率的另一个体数据,该体数据对特征信息进行了编码,这个特征信息(也即边界信息)需要集成到绘制流程。在直接体绘制算法中,绘制平面上特定位置的强度可以通过沿每条视线计算以下体绘制积分得到^[6]

$$I_{\lambda}(x, r) = \sum_{k=1}^M C_{\lambda}(s_k) \alpha(s_k) \cdot \prod_{i=1}^{k-1} (1 - \alpha(s_i))$$

这里 $\alpha(s_k)$ 是沿着光线的不透明度取样值, $C_{\lambda}(s_k)$ 是从光照模型得到的局部颜色值。

前面已经把局部最大梯度值信息编码进了一个掩码体数据,这个掩码体数据包含了原始体数据的边界信息。现在要在合成步骤使用这个掩码体数据,通过使用光线投射法并且把原始体数据与掩码体数据进行合成从而获得最后的周围区域绘制。在合成过程中,如果光线遇到的体素位置在对应位置的掩码体数据中的值是 1,则对原始体数据用上式进行合成计算;否则,该片段的不透明度值设为 0。这种有选择地进行体绘制的方法,其优点是在用户不感兴趣的区域花很少的或不花计算时间。由于绘制的合成过程由边界掩码体数据控制,所以在绘制结果中只绘制物体边界区域。

4.2 物体特征的增强

提取体数据中的边界体素后,用选择性的体光线投射法来合成绘制图像,这样就生成物体的边界表面。为了主要显示表面方向并且产生物体轮廓效果,需要对梯度方向与视线方向基本垂直的体素取样点的不透明度值进行增强,这可由梯度方向与视线方向之间的点积值约等于零来表示。这种方法已经成功地应用于体插图^[6]。轮廓增强可通过下式实现。

$$\alpha_s = \alpha_o (k_n + k_s (1 - \|\nabla_{f_n} \cdot \mathbf{V}\|)^n)$$

其中, α_s 是增强后的轮廓不透明度值, α_o 是取样点的原始不透明度值, k_n 用于控制非轮廓区域的比例, k_s 用于控制轮廓增强的强度, ∇_{f_n} 是归一化的梯度方向, \mathbf{V} 是归一化的视线方向, n 用于控制轮廓线的粗细。

4.3 基于体轮廓模型的物体特征增强

由于体轮廓是基于物体特征得到,所以基于体轮廓模型也可对物体特征进行增强。基于 NPR 的体轮廓模型可表示为

$$I(\mathbf{P}, \mathbf{V}) = WF(\nabla(\mathbf{P})) \cdot W(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \cdot DepthW(\mathbf{P})$$

式中, \mathbf{P} 为体素位置, \mathbf{V} 为视线方向, $I(\mathbf{P}, \mathbf{V})$ 是体素位置 \mathbf{P} 的强度值, $WF(\nabla(\mathbf{P}))$ 是体素位置 \mathbf{P} 的梯度窗口函数; $W(\mathbf{P}, \mathbf{V})$ 是由梯度和视线方向决定的调节函数,它用于将视线方向引入该模型并对属于物体轮廓的体素赋予较大值; $DepthW(\mathbf{P})$ 用于调节深度对 \mathbf{P} 点的强度值的影响。

梯度窗口函数 $WF(\nabla(\mathbf{P}))$ 用于确定用户感兴趣的梯度值范围,本文模型提供的窗口函数类型如图 2 所示,不同的窗口函数可得到不同的感兴趣的梯度值范围,通过这种方法用户可控制哪些特征需要增强和绘制。

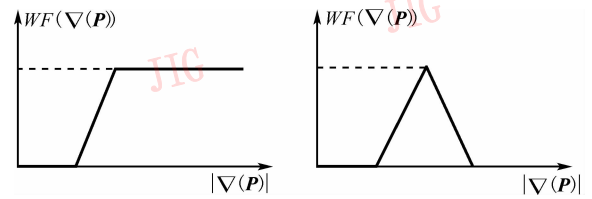


图 2 不同的窗口函数类型

Fig. 2 Different window functions

引入深度因子 $DepthW(\mathbf{P})$ 可以使用户产生更自然的绘制效果,在视线方向假设有与视线方向垂直的一组平面,赋予前面平面较大的深度因子值,而对于后面平面赋予较小的深度因子值,这样沿着视线方向随着深度值的增加,计算得到的强度值就会逐渐降低。深度因子 $DepthW(\mathbf{P})$ 可表示为

$$DepthW(\mathbf{P}) = \frac{d_{\max} - d_i}{d_{\max}}$$

式中, d_{\max} 是第 1 个平面到最后 1 个平面的距离, d_i 是第 1 个平面到第 i 个平面的距离。

5 内部结构区域的绘制

因为内部结构区域是用户最感兴趣区域,在用基于特征的方法生成周围区域的物体结构信息后,用直接体可视化技术绘制内部结构区域。为了有效地进行绘制并提供更多的信息,在内部结构区域绘制时,在光线投射过程中对绘制光线进行限制,该限制是通过用户所定义的辅助几何体(如球体、正方体)并根据用户所感兴趣的区域来进行的,通过对绘制光线进行限制,避免了不必要的光线计算从而也提高了绘制效率。图 1 同时也表示了在体可视化光线投射过程中受限光线的 2 维示例。

光线限制法通过用户定义的辅助几何体对光线

进行修剪,这是通过对辅助几何体进行两次投影得到的,即首先提取较近的深度缓存区,然后提取较远的深度缓存区。对从深度缓存区得到的值根据当前视变换进行解码,将得到的解码数值对(近,远)作为到视点的距离,图 1 描述了光线限制过程。从图 1 可以看出,在光线投射过程中,只有对被限制的光线部分(图中粗线部分)进行计算,这样只绘制内部结构区域而不是所有的体数据。

6 内部结构的量化分析

一个绘制场景中可以同时使用多个内部结构区域。绘制多个内部结构区域与绘制一个内部结构区域的基本原理是一样的,用户只需在绘制场景中加入另外的内部结构区域并使用相似的方法对该区域进行绘制。使用多个内部结构区域一方面可以使用户在同一绘制场景中同时对不同的内部结构区域进行对比分析,另一方面用户可以对多个内部结构区域进行量化分析。内部结构的量化分析主要包括以下几个方面:两个内部结构之间的空间距离;内部结构在体数据空间中的坐标位置;内部结构的体积估量等。因为用户可对内部结构区域进行自由操作,因此通过内部结构区域的位置,用户可容易地测量区域之间的距离以及显示区域本身的位置。体积估计是通过对整个内部结构区域的体积估计得到。进行量化分析时需要在绘制场景中加入额外的坐标位置标志和距离标志并同时在场景中绘制出量化结果。

7 在 3 维医学图像分析中的应用

如在引言中所述,能够帮助医生交互地解释和分析内部结构的工具对医生进行诊断和做出治疗计划十分有用。基于内部结构区域的体绘制方法正是基于此问题提出。用本文方法分析医学图像体数据以提取用户感兴趣的内部结构的详细信息,同时显示周围区域信息以帮助用户综合理解所提取的物体。这里所用医学数据为不同人体组织的 CT 体数据,我们用不同的绘制方法在周围区域中绘制物体特征并同时在内部结构区域绘制用户感兴趣的物体的详细信息从而使用户综合理解所分析的数据。

图 3 是用基于轮廓模型的方法绘制脚趾部的分析结果。此图中用户想分析内部脚趾骨可能的病变以及它所在的位置,在内部结构区域绘制特定的内

部骨骼信息,而在周围区域描述重要的物体特征如皮肤及内部骨骼轮廓结构以对内部结构区域提供位置和导向信息。从图 3 可以看出,使用基于轮廓模型的方法绘制周围区域物体具有以下优点:它能清晰地描述周围区域物体边界信息,并能很好地表示物体空间关系信息,而且在 3 维空间能够使周围区域与内部结构区域很好地合成在一起。



图 3 使用基于轮廓模型绘制周围区域以描述物体特征
Fig. 3 Using silhouettes-based model to control the context region rendering in order to depict object features

图 4 给出了用直接体可视化方法绘制周围区域信息,并且内部结构区域形状采用正方体。从这个绘制结果可以看出,虽然直接体绘制方法能够清晰绘制周围区域的外观形状,但它无法给出周围区域内部的结构信息,如血管分布等,这些信息对于用户在周围区域移动内部结构区域是很有帮助的。在图 4 的内部结构区域中绘制了肝脏中的一个肿瘤,传统体绘制方法是很难同时绘制内部结构(如肿瘤)和外部结构(如肝脏外部形状)的。



图 4 使用直接体可视化绘制周围区域并使用正方体形状内部结构区域

Fig. 4 Using the cube-shaped internal structure region and DVR to render the context region

图 5 给出了用本文方法对肝脏内部肿瘤进行量化分析的结果,该示例同时使用两个内部结构区域对不同的肿瘤进行对比分析,同时给出了它们之间的空间距离。另外,该示例用单个内部结

构区域对肿瘤的空间位置坐标进行定位。这些基于内部结构区域的量化分析可以大大提高医生对所分析体数据的理解,更有利于做出合理的治疗方案。

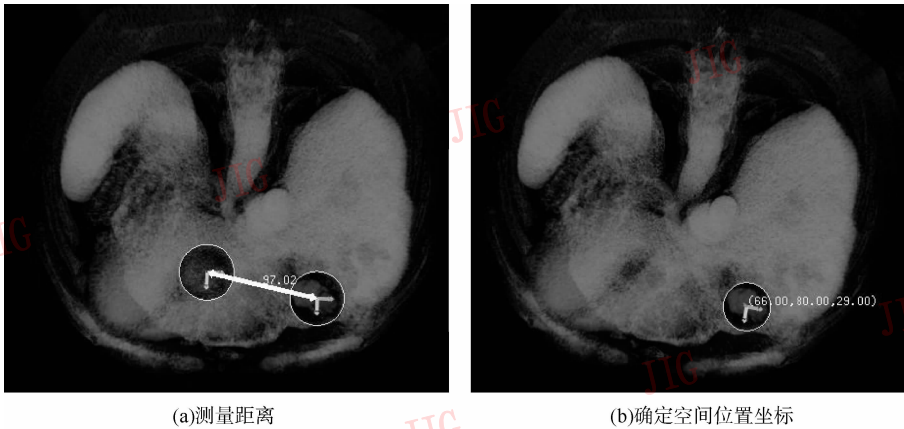


图 5 对不同的内部结构进行量化分析

Fig. 5 Analyze internal structures quantitatively using the proposed approach

8 结 论

本文提出了基于内部结构区域的体绘制方法用于绘制体数据内部结构及其在 3 维医学图像分析中的应用。基于内部结构区域的体绘制可使用户深入体数据内部提取内部结构从而克服了传统的体绘制方法分析被外层物体覆盖的内部物体时所遇到的困难。本文所述方法还可对内部结构进行量化分析。本文使用基于内部结构区域的体绘制方法对 CT 医学数据进行了分析,显示了其在 3 维医学图像分析过程中的强大功能和有效性。对本文所述方法的继续研究将集中于提供更多的周围区域特征提取和绘制方法,同时可对系统交互工具进行增强以使用户更有效地指定内部结构区域的属性。

参考文献 (References)

- 1 Preim B, Peitgen H-O. Smart 3D visualizations in clinical applications [A]. In: Proceedings of Smart Graphics Conference [C], Heidelberg, Germany, 2003: 79 ~ 90.
- 2 Turlington J Z, Higgins W E. Improved techniques for fast sliding thin-slab volume visualization [A]. In: Proceedings of SPIE (Medical Imaging 2000) [C], San Diego, CA, USA, 2000: 3976:110 ~ 123.
- 3 Sonka M, Fitzpatrick J M. Handbook of Medical Imaging: Medical Image Processing and Analysis [M], Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2000: 175 ~ 272.

- 4 Westermann R, Ertl T. A multiscale approach to integrated volume segmentation and rendering [J]. Computer Graphics Forum, 1997, 16(3):117 ~ 129.
- 5 Hauser H, Mroz L, Bischi G I, et al. Two-level volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(3):242 ~ 252.
- 6 Rheingans P, Ebert D. Volume illustration: nonphotorealistic rendering of volume models [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(3):253 ~ 264.
- 7 Csebfalvi B, Mroz L, Hauser H, et al. Fast visualization of object contours by non-photorealistic volume rendering [J]. Computer Graphics Forum, 2001, 20(3):452 ~ 460.
- 8 Bullitt E, Aylward S. Volume rendering of segmented tubular objects [A]. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention [C], Utrecht, The Netherlands, 2001, 2208:161 ~ 168.
- 9 Theußl T. Issues on displaying 3D data for scientific visualization [A]. In: Proceedings of CESC'98 [C], Budmerice, Slovakia, 1998:1 ~ 13.
- 10 Weiskopf D, Engel K, Ertl T. Interactive clipping techniques for texturebased volume visualization and volume shading [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003, 9(3):298 ~ 312.
- 11 Post F H, Leeuw W C, Sadarjoen I A, et al. Global, geometric, and featurebased techniques for vector field visualization [J]. Future Generation Computer Systems, 1999, 15(1):87 ~ 98.
- 12 Zucker S W, Hummel R A. A three-dimensional edge operator [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1981, 3(3):324 ~ 331.