

局部自适应的特征增强体绘制新方法

朴东升, 郑玉健, 伯彭波

(哈尔滨工业大学(威海)计算机科学与技术学院, 山东 威海 264209)

摘 要: 提出一种局部自适应调整的特征增强体绘制新方法, 通过体数据整体特征信息和局部特征信息的差别进行不透明度调节, 达到加强边界特征和减弱内部区域的显示效果。算法借鉴了非真实感绘制技术, 利用相对简单的传递函数计算初始不透明度。通过体素在不透明度上的聚类选择调节参数, 得到整体上均衡的特征增强绘制效果。给出新方法生成的几个医学体数据的绘制效果和已有方法结果的对比, 实验展示了新方法生成的体绘制结果的局部特征增强效果。

关 键 词: 体绘制; 特征增强; 非真实感绘制

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

Volume Rendering with Adaptive Local Feature Enhancement

Piao Dongsheng, Zheng Yujian, Bo Pengbo

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: A new method is proposed for rendering volumetric data with adaptive local feature enhancement. The opacity of voxels is adjusted by the difference between global feature information and local feature information. Feature enhancement rendering effect is obtained by strengthen the contrast of feature regions and non-feature regions. Based on the NPR technique, the new method performs a classification on original opacity computed by a simple transfer function. Different model parameters are used for different class of voxels. Some medical data sets are tested and corresponding rendering results are given with comparisons to existing methods.

Keywords: volume rendering; feature enhancement; NPR

1 引言

体绘制技术突出体数据的结构特征的一个常用手段是增强不同物质间边界的显示效果, 即边界增强。边界增强通过对物体的轮廓进行增强使物体结构信息更加清楚, 比如物体的外形或者物体内部凹凸不平的褶皱部分。医学数据的边界增强能够突出生理组织或者病变区域的显示, 从而帮助对病变的发现和诊断。

体绘制技术的两类主要方法包括: 基于传递函数的体绘制和基于非真实感绘制技术的体绘制。传递函数是传统体绘制算法的核心, 不同的传递函数给出不同的绘制效果。很多研究工作通过设计复杂的传递函数来得到特征突出的绘制效果。Roettger 等提出将二维直方图中的空间连接区域归组进行物质边界分类的方法[1]。Huang 等加入了空间信息, 将传递函数的定义域扩展到三维, 利用代价函数在三维空间进行区域

收稿日期: 2017-04-30; 定稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61672187)

第一作者: 朴东升(1990-), 男, 硕士。主要研究方向为体绘制技术。E-mail: 56384393@qq.com

第二作者: 郑玉健(1996-), 男, 本科在读。主要研究方向为几何建模。E-mail: paul.yj.zheng@gmail.com

通信作者: 伯彭波(1978-), 男, 山东威海人, 副教授, 博士。主要研究方向为计算机图形学。E-mail: pbbo@hit.edu.cn

增长[2]。Lürig 和 Ertl 将空间信息融入到多尺度分析中, 基于形态学计算光学属性, 使特征提取的准确度得到提高[3]。Lundström 等提出使用局部直方图表示标量采样体元素的空间分布[4]。Correa 等将直方图视为离散表示, 通过考虑视线相关的密度变换并遵循 Bachthaler 方法导出可见性连续分布图, 构造出高维可视性直方图[5]。Wang 等在二维特征空间内利用高斯混合模型和椭圆形的传递函数, 提高了边界的准确度和传递函数的设计效率[6]。Caban 等提出了基于纹理特征的传递函数, 能有效的区分体数据的结构信息[7]。Tzeng 等提出将采样点的空间信息作为自变量, 利用神经网络设计了高维传递函数, 更好地提取用户感兴趣的物质[8]。Rickard 等对标准的直接体绘制技术和 5 种流行的直接体绘制图像的空间感增强技术的效果进行了对比[9]。体数据边界增强的绘制效果可以通过复杂的传递函数来实现, 然而复杂的传递函数常常含有非常多的参数, 这些参数缺乏与最终绘制效果的直观联系, 而且计算复杂度比较大。因为这些原因, 另一类基于非真实感绘制技术的体绘制方法得到了研究。

基于非真实感绘制技术的体绘制方法对由简单传递函数生成的体素不透明度进行调整, 从而产生特征增强的绘制效果。这一类方法的关键是借鉴了非真实感的增强技术, 避免了采用复杂的传递函数的计算量大, 调节参数多等缺点。2000 年, Ebert 和 Rheingans 提出了体描述(Volume Illustration)方法, 根据体数据中包含的深度、梯度信息等对体绘制生成的颜色值或者不透明度的值进行调整, 以在绘制结果中加强重要结构的显示效果[10]。Csébfalvi 等提出了一种物体边界的快速绘制技术, 利用采样点梯度信息以及视线方向与梯度方向的夹角, 得出采样点相应的不透明度值, 并利用最大密度投影方法生成绘制图像, 得到边界绘制效果[11]。Bruckner 等将体描述方法整合到交互的系统中[12], 提出了一种增强深度信息的特征阴影算法[14]。Wu 等提出基于人的感知因素的不透明度优化方法[13]。Burns 等提出了一种能够产生线画效果的体绘制方法, 绘制物体边界线和轮廓线等信息, 使体数据的结构特征更加突出[15]。Lu 等提出了一种在体绘制中产生点绘制效果的算法, 实现边界轮廓等特征的增强效果[17]。Liang 等提出了基于局部差值累计的体数据特征增强绘制技术[17]。

本文提出一个改进体描述方法的增强体绘制技术, 能够改善特征增强的效果。新方法同样是利用简单的传递函数得到初始不透明度, 方法的关键: 1) 利用体数据的整体信息和局部特征信息进行自适应的不透明度调整, 通过增强边界区域的不透明度和增加非边界区域的透明度达到边界特征增强的绘制效果, 使体数据集中包含的组织结构特征更加明显; 2) 通过对体素进行聚类, 利用体数据整体的特征信息和局部特征信息进行自适应的不透明度调整, 得到特征增强的体绘制效果。利用体素的特征聚类结果选取增强模型的参数, 得到整体上均衡的边界增强绘制效果。

2 边界增强的体绘制技术

本节对基于非真实感技术的体描述边界增强绘制方法做简单介绍, 引出新的方法。

2.1 简单传递函数的设计

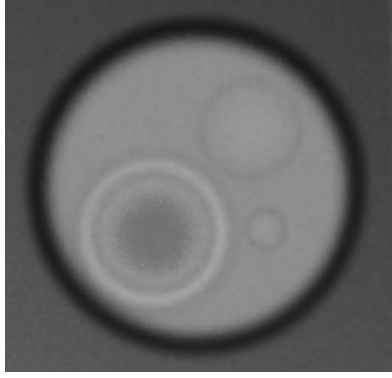
传递函数将体素的灰度值映射得到体素的不透明度值和颜色值。在体绘制方法的实际应用中, 典型的传递函数一般设计为相对简单的分段多项式函数。假设体素 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 的灰度值为 I_{p_i} 。一个典型的计算体素不透明度值 O_{p_i} 的传递函数公式定义是

$$O_{p_i} = \begin{cases} 0 & I_{p_i} < I_{\min} \\ a \times (I_{p_i} - I_{\min})^b & I_{\min} \leq I_{p_i} \leq I_{\max} \\ a \times (I_{\max} - I_{\min})^b & I_{p_i} > I_{\max} \end{cases}, (1)$$

其中 I_{\min} 和 I_{\max} 分别是体数据中最小和最大灰度值。系数 a 和 b 是调节参数, 控制映射函数的曲线形状, 调节不透明度值随灰度值变化的快慢。在实际应用中, 系数 b 通常设为 1, 即体素的不透明度值是体素灰度值的线性函数。

这种分段线性函数形式简单, 计算效率高。然而在实际应用中, 为了获得满意的绘制效果, 常常需要

通过交互的方式手动调整模型参数; 对于较复杂的体数据集, 采用分段线性传递函数得到绘制结果边界特征不够突出。图 1 的体数据集为一个大气球内部包含 3 个小球, 数据集大小为 $128 \times 128 \times 128$ 体素。图 1(a) 是采用分段线性传递函数(1)生成的体绘制效果。传递函数中的 I_{\min} 和 I_{\max} 灰度值分别设置为体数据的最小灰度值和最大灰度值, 系数 $a = 0.2$, 系数 $b = 1$ 。从绘制结果可以看到采用分段线性传递函数能够大致显示出体数据中的边界区域, 但是边界区域在整体图像中不够突出。



(a) 直接体绘制效果

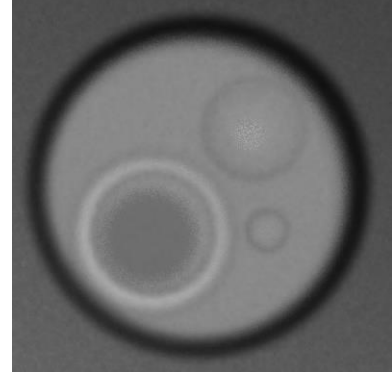
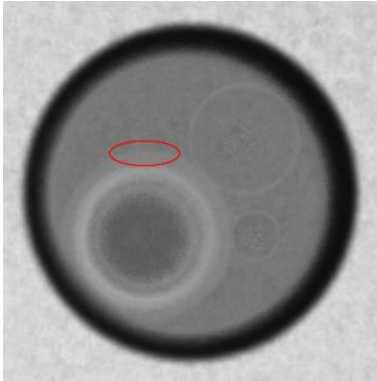
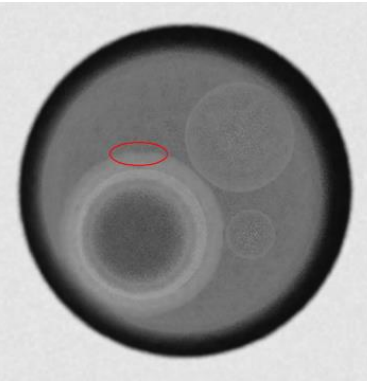
(b) 采用体描述方法基于梯度的增强效果
($\alpha = 0.61, \beta = 0.5, \gamma = 0.62$)

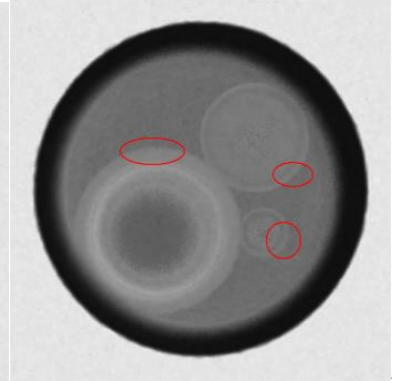
图 1 直接体绘制和体描述方法



(a) 球形数据集的增强效果(k=10)



(b) 两次增强的效果



(c) 球数据集分类增强效果(h=1.5)

图 2 简单球形体数据的增强效果

2.2 基于梯度的边界区域增强

在医学三维数据集中, 属于同一种组织内部的体素常常具有相近的灰度值, 属于不同组织的体素的灰度值则差别较大; 不同组织的边界处体素的灰度值会有显著的变化。因此很多已有方法利用体素灰度值的变化率(梯度)来衡量体数据的分布变化情况, 从而估计边界区域。

设 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 是三维空间中位于 (x_i, y_i, z_i) 处的一个体素, $f(x_i, y_i, z_i)$ 是对应的灰度值。用中心差分法定义 P_i 点的灰度梯度为

$$G(P_i) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} f(x_{i+1}, y_i, z_i) - f(x_{i-1}, y_i, z_i) \\ f(x_i, y_{i+1}, z_i) - f(x_i, y_{i-1}, z_i) \\ f(x_i, y_i, z_{i+1}) - f(x_i, y_i, z_{i-1}) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

具有较大梯度值的体素处于边界区域的可能性较大, 而梯度值较小的体素更可能位于非边界区域。为了在绘制结果中达到边界增强的效果, 可以依据体素的梯度信息, 增加可能处于边界处的具有较大梯度值的体素的不透明度值, 而对组织内部非边界区域的体素则赋予相对较小的不透明度值。

原始体描述方法中的边界增强公式根据体素的梯度值对体素的不透明度值进行调整[10], 计算公式为

$$O_n = \alpha \times O_o + \beta \times O_o \times \|G\|^\gamma, \quad (3)$$

其中 O_n 为增强后的不透明度值; O_o 为原始传递函数计算得到的不透明度值; α 和 β 分别是原始传递函数得到的不透明度值和调整量的权衡系数; γ 值控制增强曲线的形状。根据公式(3), 灰度值变化速度较大的区域(梯度值较大), 其不透明度的增强量较大; 灰度值变化速度较小的区域增强量较小。通过增加边界特征的不透明度, 产生边界增强的效果。图 1(b)是利用公式(3)增强后的效果。我们发现边界增强效果并不令人满意, 一个原因是体数据中全部的体素都以相同的系数进行增强, 没有考虑体数据的局部特征, 使得有些局部上显著但是整体上不凸出的边界特征没有得到较好的增强。如果系数选择得不好, 更会造成增强效果不够或者过度增强, 导致成像质量下降。

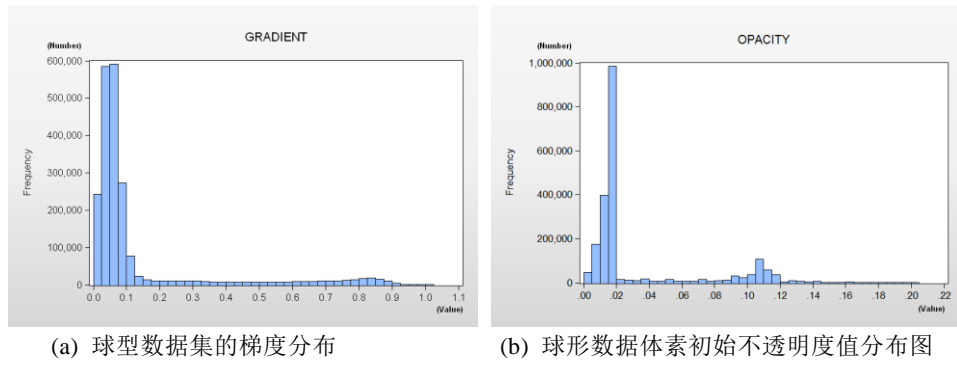


图 3 球体数据的梯度分布和初始不透明度分布

3 局部自适应调整的边界增强

3.1 基于梯度的边界区域增强

观察原始体描述方法中的不透明度增强公式(公式(3)), 定义不透明度的增强量

$$E = O_o \times \|G\|^\gamma. \quad (4)$$

利用分段线性函数得到的初始不透明度和灰度值是线性关系, 具有较大灰度值的体素的初始不透明度也较大。要得到组织边界特征增强的绘制效果有两方面的要求: 1) 边界区域的不透明度得到增加; 2) 内部非边界区域的不透明度得到降低。公式(4)计算的增强量是一正值, 只能得到增加边界区域不透明度的效果。另外, 如果边界特征位于灰度值较小的区域内, 根据公式(4)得到的不透明度增强量相对也较小。因此该方法对低灰度区域内的边界增强效果有时候不明显。

为解决以上问题, 本文提出新的不透明度增强公式, 能够根据局部的特征信息进行自适应的不透明度调整, 提高整体上边界特征的绘制效果。新公式考虑体数据整体的灰度值分布特征, 根据局部的灰度值和不透明度来计算新的不透明度, 对具有不同局部特征信息的体素采用不同的调节系数。新方法增加边界区域的体素的不透明度值, 减少非边界区域的体素的不透明度值, 最大限度的将边界区域和非边界区域的体素不透明度值区分开来, 并且能够针对灰度值比较低的区域加大增强力度, 得到整体上均衡的增强绘制效果。

首先定义体数据的平均增强量为

$$E_x = h \times \|\bar{G}\|^\gamma, \quad (5)$$

其中 h 值是一个调节系数; \bar{G} 是全局体素的整体特征代表, 这里采用全部体素梯度模的算术平均值, 公式为

$$\bar{G} = \frac{\sum_{i=1}^n \|G_i\|}{n}, \quad (6)$$

其中 n 为体素个数, G_i 为体素 $P(x_i, y_i, z_i)$ 位置处的梯度。平均增强量 E_x 代表了体数据的整体平均信息, 作为体素不透明度局部调整的基准; 参数 h 能提供对增强门槛更灵活的调节自由度。考虑采样点体素的增强量与平均增强量的差别, 对采样点的不透明度值进行调整。新的不透明度值调整公式为

$$O_{new} = O_{old} + K \times (E - E_x), \quad (7)$$

其中 O_{new} 为调节后的不透明度值, O_{old} 为原始不透明度值, K 称为增强系数。由于边界处体素的梯度一般大于平均梯度, 其增强量 E 大于平均增强量 E_x , 因此不透明度调节量为一正值, 利用公式(7)进行不透明度调整后, 体素的不透明度增加。非边界的内部区域的体素增强量通常小于平均增强量, 所以利用公式(7)进行不透明度调整后, 内部区域体素的不透明度值减小。结果是数据整体的边界绘制效果更加突出, 组织结构的展现更加明显。

对于图 1 的球型体数据集, 所有体素的梯度值分布如图 3(a)所示。根据公式(6)计算得出数据集的平均梯度值为 0.127。从图 3(a)观察到, 这个值是体素的梯度值发生明显变化的位置, 把体素分为边界区域和非边界的内部区域两部分。图 2(a)显示的是 $h=1, K=10$ 时的增强效果, 可以看到, 对边界区域和非边界区域的体素的不透明度值进行分别调整后, 各个球体的边界都得到了增强, 原来图像中难以发现的边界也得到了显现(图 2(a)中红色圆圈位置)。这是由于边界处的体素的不透明度值得到了增加, 并且非边界处区域的体素的不透明度值有一定程度的降低。边界区域和非边界区域的体素的不透明度值得到了局部自适应的调整, 得到有效的边界增强绘制效果。

以上增强方法基于当前体素的不透明度信息进行局部增强, 理论上该算法可以多次调用, 使得某些区域的特征增强更加明显。图 2(b)是对球面数据进行两次不透明度调整的效果(采用和图 2(a)相同的参数), 每次增强以当前体素的不透明度值为基础。第 2 次调整使边界处的体素的不透明度值进一步增加, 使非边界处的体素的不透明度值进一步减小, 因此绘制结果中边界区域更加明显, 非边界区域的显示效果进一步减弱(图 2(b)中红色圆圈中显示效果)。通过实验发现, 虽然多次增强会突出某些特征, 但是对某些数据集也可能产生过渡增强的效果, 从而使得某些特征变得不明显。这里不提供增强次数的自动确定方法, 但是可以通过增强效果的反馈让用户自己决定增强的次数。一般情况 1-2 次增强能得到满意的效果。

3.2 基于体素聚类的边界增强

对于包含不同组织信息的复杂体数据集来说, 不同组织的体素灰度值可能会相差较大。为了使得灰度值较大的区域和灰度值较小的区域都得到较好的增强效果, 考虑对不同区域采用不同的增强系数 K 。

为了识别具有不同局部特征的体素, 本文采用 k 均值聚类算法对体素的不透明度值进行聚类。对图 1 中体数据的体素以初始不透明度为特征进行聚类($k=3$), 得到低不透明度、中不透明度和高不透明度三类。聚类中心 C_k 分别为 0.01、0.02 和 0.11。图 3(b)显示的是球形数据集不透明度的分布图。

新的不透明度增强量考虑局部区域的不透明度和体素的梯度。为了增强灰度值较小区域的边界显示效果, 我们希望增强系数 K 与原始不透明度成反比, 从而使得边界和内部的对比更加明显。本文定义增强系数 K 为

$$K = \frac{1}{C_k + \sigma}.$$

其中, C_k 是不透明度聚类中心, σ 是一个很小的常数。这种取值方式比较简单并且可以取得较好的增强效果。图 2(c)给出了该方法得到的球形数据的绘制结果。

4 实验结果与分析

医学体数据一般具有比较复杂的组织结构,对某些组织边界的增强绘制能够帮助医生诊断疾病。本节给出几个采用本文方法增强的医学体数据的绘制效果。图 4 展示的是对一个心脏数据集(数据集大小 $512 \times 512 \times 308$)分别使用直接体绘制技术、体描述边界增强方法和本文提出的边界增强方法的绘制结果对比,本文方法中体素按不透明度值分为 3 类,增强系数分别为 $K_1=0.58, K_2=0.8, K_3=0.48, h=1$ 。通过三个绘制结果的对比,可以看到心脏器官中组织边界的显示效果得到了很好的改善,绘制结果中心脏的组织结构更加清晰。

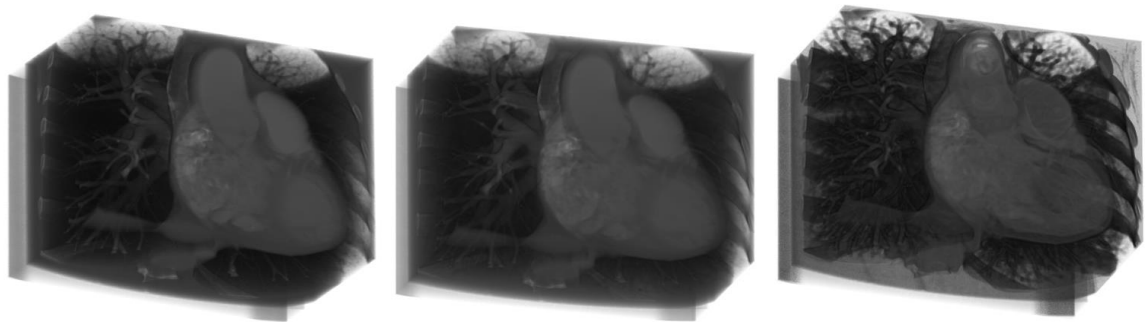
图 5 展示的是对腹部数据集(数据集规模 $512 \times 512 \times 361$ 体素)分别使用直接体绘制技术、体描述边界增强绘制和本文提出的边界增强绘制方法的绘制结果对比。体素按不透明度值分为 3 类,增强系数分别为 $K_1=0.66, K_2=1, K_3=0.72, h=3.24$ 。通过三个绘制结果的对比,可以看到采用本文提出的方法通过对增强系数的调整肾脏中的结石物质也明显的显示了出来,相对直接体绘制和体描述方法,边界的增强效果更加明显。

图 6 展示的是头部数据集(数据集规模 $512 \times 512 \times 245$ 体素)分别使用直接体绘制技术、体描述边界增强绘制和本文提出的边界增强绘制方法的绘制结果对比,对体素不透明度值分 3 类,增强系数 $K_1=0.66, K_2=0.67, K_3=0.34, h=1.12$ 。通过三个绘制结果的对比,可以看到采用本文提出的方法头骨的边界显示效果更加突出,头部整体的组织结构信息表现的比较清楚。

通过对不同数据集的一系列的对比实验,可以看到本文提出的边界增强方法相比原有的体描述边界增强方法能产生更好的边界增强绘制效果,使体数据中包含的结构信息显示的更加清晰,有助于对组织结构的理解和疾病诊断。本文方法的缺点是增强系数无法自动确定,用户通过交互操作来确定合适的参数。本文方法采用了简单的传递函数,因此具有计算量小,绘制快的特点,不同参数的绘制结果可以快速反馈给用户。

5 结论

本节提出了一种新的边界增强方法,基于局部特征信息进行自适应的不透明度调整,得到整体上均衡的特征增强绘制效果。通过对实验结果的分析表明,本文提出的方法能够有效的对体数据的边界区域进行增强,取得了良好的边界显示效果。在接下来的研究工作中,我们将尝试其它的体数据整体信息表示方法,以及利用彩色信息的增强绘制。

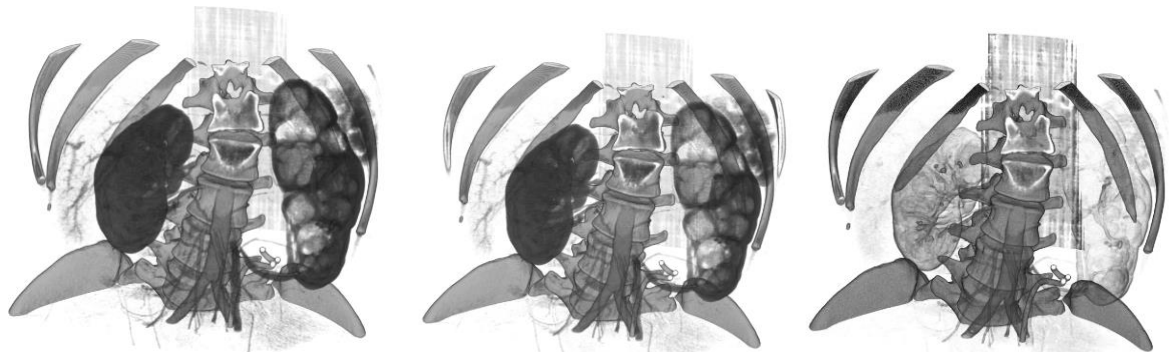


(a)直接体绘制效果

(b) 体描述绘制效果

(c)采用本文边界增强方法的结果

图 4 心脏数据集的绘制效果

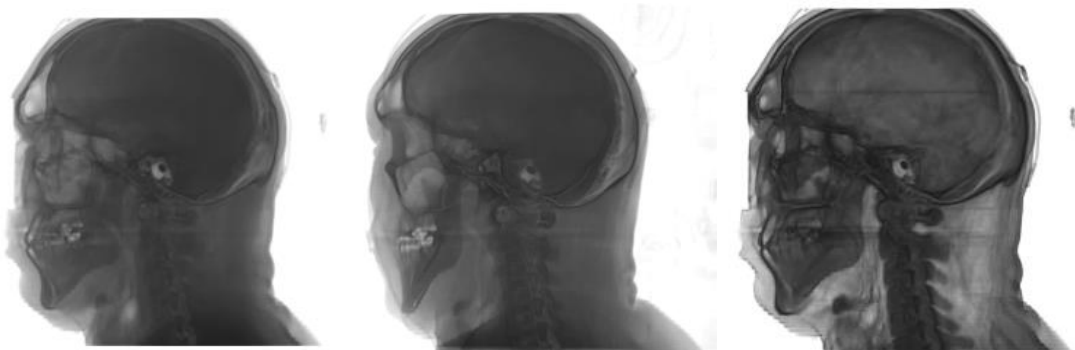


(a)直接体绘制效果

(b) 体描述绘制效果

(c) 采用本文边界增强方法效果

图 5 腹部数据集的绘制效果



(a)直接体绘制效果

(b)体描述绘制效果

(c)采用本文边界增强方法效果

图 6 头部数据集的绘制效果

参 考 文 献

- [1] Roettger S, Bauer M, Stamminger M. Spatialized transfer functions. Proceedings of the seventh joint Eurographics[J]. IEEE VGTC conference on Visualization. Eurographics Association, 2005: 271-278.
- [2] Huang R, Ma K L, McCormick P, et al. Visualizing industrial CT volume data for nondestructive testing applications[C]//Proceedings of IEEE Visualization. IEEE Computer Society, 2003: 72.
- [3] Lurig C, Ertl T. Hierarchical volume analysis and visualization based on morphological operators[C]//Proceedings of the IEEE conference on Visualization. 1998: 335-341.
- [4] Lundstrom C, Ljung P, Ynnerman A. Local histograms for design of transfer functions in direct volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(6): 1570-1579.
- [5] Correa C D, Ma K L. Visibility histograms and visibility-driven transfer functions [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(2): 192-204.

- [6] Wang Y, Chen W, Shan G, et al. Volume exploration using ellipsoidal gaussian transfer functions[C]//Pacific Visualization Symposium. 2010: 25-32.
- [7] Caban J J, Rheingans P. Texture-based transfer functions for direct volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1364-1371.
- [8] 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.
- [9] Rickard Englund and Timo Ropinski. Evaluating the perception of semi-transparent structures in direct volume rendering techniques[C]//Symposium on Visualization. ACM, New York, 2016: Article 9, 8 pages.
- [10] David Elbert, Penny Rheingans. Volume illustration: non-photorealistic rendering of volume models[C]//Proceedings of IEEE Visualization. 2000:195-202.
- [11] Csébfalvi B, Mroz L, Hauser H, et al. Fast visualization of object contours by non-photorealistic volume rendering[J]. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishers Ltd, 2001, 20(3): 452-460.
- [12] Bruckner S, Groller M E. Volumeshop: an interactive system for direct volume illustration[C]//Proceedings of IEEE Visualization. 2005: 671-678.
- [13] Wu Y, Mark W, Chan M, Chan W, Qu H. Perception-based transparency optimization for direct volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1283-1290.
- [14] Bruckner S, Groller M E. Enhancing depth-perception with flexible volumetric halos[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1344-1351.
- [15] Burns M, Klawe J, Rusinkiewicz S, et al. Line drawings from volume data[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM, 2005, 24(3): 512-518.
- [16] Lu A, Morris C J, Ebert D S, et al. Non-photorealistic volume rendering using stippling techniques[C]//Proceedings of IEEE Visualization. IEEE, 2002: 211-218.
- [17] Liang R, Wu Y, Ma X. Feature enhanced visualization algorithm for volumetric data[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2012, 10: 1302-1311. (in Chinese)
(梁荣华, 吴云飞, 马祥音. 局部特征加强的体绘制. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 10: 1302-1311.)