

基于二维直方图局部聚类的半自动 传递函数设计方法^{*}

罗月童, 王寒冰, 陈进生

(合肥工业大学 计算机与信息学院 VCC 研究室, 合肥 230009)

摘要: 传递函数对直接体绘制结果有重要影响,但设计合适的传递函数并非易事。通过在二维直方图中嵌入体数据的空间信息,并基于嵌入的空间信息对直方图中的散点进行聚类,然后利用聚类结果自动/半自动地生成二维传递函数。该方法避免了传统的二维传递函数设计时用户在直方图上繁琐的操作,提高了传递函数的效率和直观性。此外,多组体数据的实验结果证明了该方法的有效性和实用性。

关键词: 直接体绘制; 传递函数; 空间信息; 聚类

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)06-1878-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.073

Semi-automatic transfer function design based on local clustering of 2D histograms

LUO Yue-tong, WANG Han-bing, CHEN Jin-sheng

(VCC Division, School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Transfer function has significant influence on direct volume rendering, but designing of proper transfer function is not a trivial. By embedding volume spatial information into 2D histogram, and clustering 2D histogram bins according to the embedded spatial information, this paper designed transfer function automatically/semi-automatically according to the clustering result. The method could avoid tedious manual operation involved in traditional 2D-histogram based transfer function design method, so that it improved both efficiency and intuitiveness. Furthermore, several experiments demonstrate the method's effectiveness and practicability.

Key words: direct volume rendering; transfer function; spatial information; clustering

0 引言

直接体绘制是将包含特征或结构的三维体数据转换为利于人们观察的二维图像的一种方法。在绘制之前或绘制的时候将体素映射为可视觉感知的颜色与透明度信息,是通过传递函数来完成的。因此,传递函数的设计直接决定直接体绘制图像的质量。

尽管直接体绘制技术的发展已有较长的历史,如何设计出好的传递函数至今仍然是影响体绘制结果的限制之一。其原因十分复杂,主要在于体数据的结构复杂、特征众多,如何有效地利用体数据包含的信息来提取这些特征和结构是一大难点,尤其是体数据的多样性使得寻找一种合适且通用的传递函数相当困难。

通常,传递函数的设计采用手动的方式。例如,直接指定灰度—颜色映射表的一维传递函数,以及基于灰度—梯度直方图的手动设置二维映射表的二维传递函数设计。此外,传统的传递函数一般利用体数据的灰度和梯度信息,从而忽视或难以

考虑它们包含的其他信息(主要是体素的空间信息)。

考虑体数据更多信息的传递函数称为高维传递函数。对于高维传递函数的设计,由于超过二维的信息难以供用户交互,高维传递函数一般通过类似平行坐标系等的方式接受用户的手动调整。可以指出的是,尽管高维传递函数带来了更强的分类能力,但它的设计对用户的要求也更高,难度更大。

本文利用直方图上体素的空间特征的统计信息(均值和方差)对灰度—梯度直方图进行局部聚类,并且按照一定规则自动地生成二维传递函数。该方法对用户操作的要求较低,并且由于聚类是基于直方图的后处理过程,执行效率高。

1 相关工作

Kniss 等人^[1]指出了梯度在传递函数设计中的重要性,并由此提出了基于灰度—梯度直方图的二维传递函数设计。其主要交互方式是由用户在直方图上添加包含颜色和不透明度的几何形状的控件,根据用户对这些控件的调节和设置生成二维传递函数。对某些体数据,要区分它们包含的一些特征,则

收稿日期: 2012-09-17; **修回日期:** 2012-11-05 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11005028, 61070124); 安徽省基金资助项目(090412066)

作者简介: 罗月童(1978-),男,安徽青阳人,副教授,博士,主要研究方向为科学计算可视化、虚拟现实、计算机技术在核能领域的应用(ytluo@hfut.edu.cn); 王寒冰(1987-),硕士研究生,主要研究方向为科学计算可视化、计算机辅助设计; 陈进生(1988-),硕士,主要研究方向为科学计算可视化。

需要考虑更多的信息,由此研究人员提出更高维的传递函数。Tzeng 等人^[2]将体数据包含的多种信息引入传递函数的设计,提供的交互方式是用户对切片图像的直接笔画操作,通过人工智能的算法实现了高维传递函数设计。文献[3]通过将直方图和体素的空间信息对应起来,按照一定的规则利用生长算法对整个直方图进行聚类,通过用户选择部分或单个类别设置颜色属性来完成传递函数的设计。

文献[4]进一步地研究了体数据灰度—梯度直方图和灰度—二阶梯度直方图的特点与体数据自身特征的关系,并基于该理论的结果提出了一种半自动的传递函数设计方法。文献[5]利用 LH 直方图的方法自动地检测体数据特征的边界,然后自动地生成传递函数,该方法不需要用户在传递函数空间的交互操作。文献[6]通过构造轮廓树(contour tree)来生成体数据的拓扑结构,再利用剩余流量模型的思想对轮廓树的各个分支自动地设置颜色和透明度,完成传递函数的设计。文献[7]则通过最小化用户不同的视点所得到的可见性分布的信息熵来半自动地生成传递函数。

2 直方图局部聚类 and 半自动传递函数设计

因为体数据的梯度是区分不同特征的重要信息,而引入更多信息又会使得传递函数设计的难度大大增加,本文提出的半自动传递函数仍然是基于灰度—梯度直方图的二维传递函数。基于直方图来生成传递函数的另外一个好处是计算代价相对从体数据来生成较小。

本文的主要工作包括:

a) 对直方图的散点按照空间信息进行聚类 and 划分。首先使用散点对应体元坐标的方差将部分散点筛选排除,对余下的散点使用 K-means 算法进行聚类。称这一聚类过程为对直方图的局部聚类。

b) 根据局部聚类的结果自动生成传递函数。本文认为局部聚类之后的直方图的各个划分区别了体数据中不同的特征,因此依据指定的规则来设置二维传递函数。

2.1 直方图和体元的空间特征

灰度—梯度直方图是体数据的统计结果,一般表示为一些二维的散点分布。将灰度和梯度分别作为此分布所在参考坐标系的横轴和纵轴,那么这些散点就代表了体数据中灰度和梯度对应值的体素。通常直方图中散点的亮度 L 同它所对应体素的个数 x 存在一定的关系,以避免出现散点间亮度的数量级差别过大,如取对数 $L = \log(x)$ 、取 N 次方根 $L = \text{pow}(x, 1.0/K)$, $K \in \mathbb{R}^+$ 等。

传统的直方图通过散点的亮度来展示体素的灰度和梯度分布,为传递函数的设计提供了重要的辅助。然而,它完全抛弃了体素的空间信息这一重要属性。文献[3]通过将直方图的散点颜色用其对应体素的空间坐标的均值来代替,并由此得到了一种使用了空间信息的传递函数,称为 spatialized transfer function。本文对其方法加以变化,对直方图上部分散点进行聚类,并根据聚类的结果自动生成传递函数,得到使用空间 $p(v)$ 信息的半自动传递函数设计结果。

根据直方图的定义,图上的每个散点 s 均对应了体数据中

的一些体素,记这些体素 v 的集合为 U 。对 U 中体素的坐标 $p(v)$ 进行统计,能够得到每个散点对应的两个空间相关的属性——体素坐标的均值和方差:

$$m_s = \frac{1}{n} \sum_{v \in U} p(v) \quad n = |U|, v = (x, y, z)$$

$$v_s = \frac{1}{n} \sum_{v \in U} (p(v) - m_s)^2$$

因为 m_s 是坐标的平均值,它包含 x, y, z 三个分量,它们作简单的归一化可以当成 R, G 和 B 值表征直方图上散点 s 的颜色值。这样可以得到一个彩色的直方图,如图 1 所示(彩图见电子版)。

2.2 局部聚类 and 传递函数的生成

2.2.1 直方图的局部聚类

本文选择对直方图的部分散点进行聚类,而不是对全部散点聚类,原因是体数据中通常包含大量的噪声数据。如果全部的散点都参与聚类,会导致最后的传递函数和体绘制结果受到噪声的影响很大。对散点的筛选是根据其对应体素坐标的方差 v_s 来完成的。这一做法的基于基本假定是:体数据中的单个重要特征在空间上均是比较集中的,即其方差应较小。本文后面的实验结果也基本证明了这一假定的合理性。

对散点的聚类采用基本的 K-means 算法,过程如下:

- 随机取出 K 个散点坐标 $C_1, \dots, C_k$ 作为聚类的初始中心;
- 对所有散点 v 计算与中心 C_i 的距离,选择距离最小的中心 C_m 聚为一类,即 v 的类别置为 m ;
- 每个类别包含的散点集合记做 L_i ,重新计算每一类的聚类中心 $C_i = \frac{1}{|L_i|} \sum_{v \in L_i} v$;

d) 重复步骤 b) c) 直到散点所在类别不发生变化。

图 2 是使用 K-means 算法对某体数据的灰度—梯度直方图进行局部聚类得到的结果。首先利用散点对应体素坐标的方差对直方图上的散点进行筛选,然后在直方图上按照聚类的结果用不同颜色绘制显示出结果(被筛选排除的散点仍然按照原来普通直方图的方式绘制)。

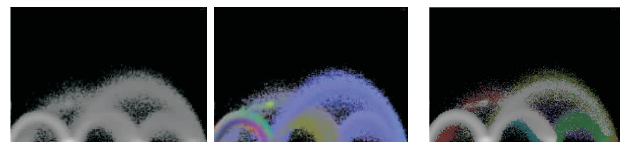


图1 普通直方图和反映空间信息的彩色直方图

图2 直方图的局部聚类结果

2.2.2 传递函数的生成

按照前面的假定,直方图上按照方差 v_s 被筛选掉的散点 s 对应的体素可以被认为是体数据中的噪声或相对不重要的数据。因此在生成传递函数的时候需要避免这部分体素的绘制,于是可将这部分的散点对应传递函数的不透明度置为 0。

为了更好地展示体数据的结构信息,且体素的梯度较大的部分常常是不同结构的边界,基于这一点,在设定其他体素的不透明度时,按照其对应的梯度量来进行设置。

综上,对体数据自动生成的二维不透明度传递函数如下:

$$\text{opacity}(s) = \begin{cases} 0 & v_s > r \\ \alpha_{\max} g_s & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中: r 是由用户指定的筛选散点的方差阈值; g_s 是 s 对应的梯

度大小,即归一化的散点的纵坐标值; $\alpha_{\max}$ 是最大不透明度值。

此外,考虑传递函数中的 RGB 映射。首先根据聚类的个数对颜色空间进行等分,这里所指的颜色空间是 HSV 空间。对色相(hue)区间等分,并且取相同的饱和度(saturation)和亮度(value),再利用 HSV 颜色到 RGB 颜色的转换式,可以得到一个 RGB 颜色的数组 $\text{RgbColor}[K]$ 。

这样,对直方图的每个散点,按照其聚类结果的类别 i 为其分配对应的颜色 $\text{RgbColor}[i]$ 。于是得到二维颜色传递函数:

$$\text{color}(s) = \begin{cases} 0 & v_s > r \\ \text{RgbColor}[i] & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)(2)合并即可得到自动生成的二维传递函数。

2.3 半自动传递函数设计流程

本文具体实现的基于直方图局部聚类的半自动传递函数设计的完整流程如图3所示。

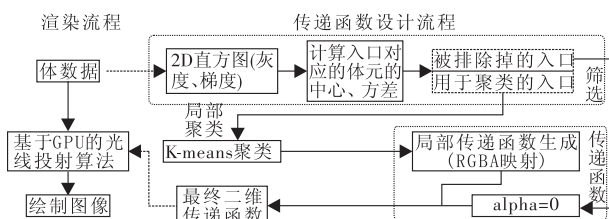


图3 半自动传递函数设计的流程

由于直方图数据和散点对应的体元坐标的均值和方差均是体数据的统计信息,第一次读入某个体数据时,这些信息可以被计算得出并按一个固定的数据结构存储在磁盘上。这样,下次绘制统一体数据时可以直接读出,避免重复的计算工作。

在对直方图的散点进行筛选时,初始时方差的阈值 v_s 被自动设定(按照实验的结果,方差阈值 r 的取值满足 $0.2 < r < 0.4$,得到的结果基本符合2.2.1节的假定,本文实现的系统默认取0.35)。同时,用户可利用系统提供的工具进行手动调整。此外需要用户手动指定聚类的个数,它表示用户期望观察到的体数据包含特征的个数(在实际实验过程中,聚类个数指定为2~10之间的值可以得到较好的结果)。

完成直方图的局部聚类 and 传递函数的自动生成之后,为了增加此系统设置传递函数的灵活性,用户同样可以手动设置不同类别(即直方图上对应散点)的颜色和不透明度。因此,称这个过程是半自动的传递函数设计。

综上所述,利用此流程进行传递函数的设计和体数据的渲染,对用户的交互要求比较低。体数据的渲染采用基于GPU加速的二维传递函数的光线投射算法,并加入 Phong 光照模型。

3 实验结果与分析

本文对基于直方图局部聚类的半自动传递函数设计方法进行了实现,并使用多个体数据进行实验。实验的基本配置如下: Intel i3 2.93 GHz CPU, 2.0 GB RAM, NVIDIA GeForce GTS450 GPU。运行环境为 Microsoft Windows 7 32 bit, 程序设计中使用了 Qt 4.7.2 与 OpenGL 3.1 等库,其中主要部分使用

C++ 语言编写,用于体绘制的光线投射算法以及光照部分采用的是可编程着色器语言 GLSL。

3.1 不同体数据的绘制结果

本文选取了多个体数据进行实验。其中包括盆景数据(bonsai)、牙齿数据(tooth)、双脚数据(feet)、足数据(foot)等。各数据的详细信息以及设置的方差阈值和指定的聚类个数如表1所示。

表1 实验所用体数据

体数据	分辨率	大小/M	方差阈值	聚类个数
bonsai	256 × 256 × 256	16	0.2	4
tooth	256 × 256 × 161	10	0.2	8
feet	256 × 256 × 256	16	0.35	6
foot	256 × 256 × 256	16	0.35	4

图4是对表1中数据进行实验所得到的最终体绘制结果。在每个体数据对应的三幅图中,最左边是经过筛选和局部聚类之后的直方图,中间和右边分别是开启和关闭光照之后的直接体绘制图像。

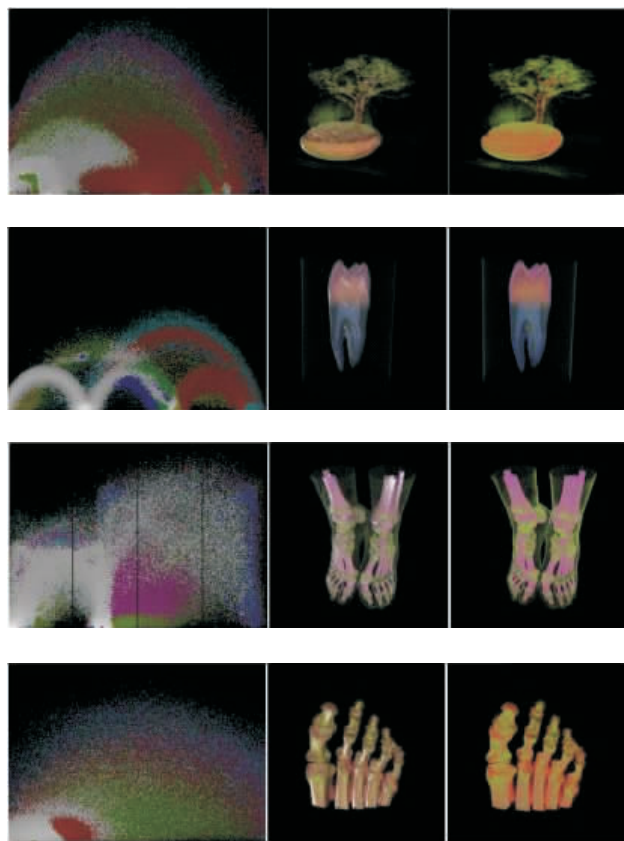


图4 实验结果(从上至下分别是 bonsai、tooth、feet、foot 数据的局部聚类的直方图和体绘制结果)

方差阈值 r 可以通过用户观察体数据的主要特征在空间所占的范围来决定。占范围较少的体数据如上面的 tooth 和 bonsai 数据, r 的设置可以取相对较小的值;反之如 feet 和 foot 数据则可以取略大些的值。经过多次实验发现,对于大部分体数据, r 的取值在 0.2~0.5 之间基本可以得到较好的结果。图5是 feet 数据采用不同的 r 筛选并聚类直方图之后又用半自动传递函数设计的体绘制结果。

从此结果可以看出, r 取值较小的时候,直方图上的入口被筛选排除得较多,从而导致特征丢失严重;而如右图 r 取值过大,直方图上的入口几乎没有被筛选掉,均参与聚类并生成

传递函数,最终绘制的结果不利于观察位于内部的重要特征。在生成不透明度传递函数的时候,均取 $\alpha_{\max} = 0.5$ 。

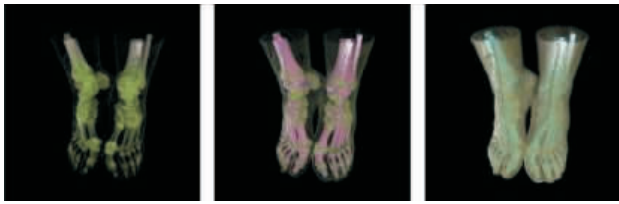


图5 不同的方差阈值对直接体绘制结果的影响
($K=6, r=0.15, 0.35, 0.55$)

3.2 性能分析

实验使用 GPU 加速的光线投射算法实现直接体绘制,其中局部聚类与体绘制的性能如表 2 所示。

表2 实验性能分析

体数据	聚类时间/s	帧数/fps
bonsai	0.27	42
tooth	0.84	48
feet	0.62	40
foot	0.46	45

表 2 中所列的体数据以及所用的方差阈值和聚类个数同表 1。直接体绘制图像的分辨率是 512×512 , 片段程序中光线投射算法的采样距离是 0.005。

从表 2 可以看出,因为聚类的对象是直方图上被筛选的散点,规模较小,对于各体数据聚类的时间代价均很小。又由于应用了硬件加速的直接体绘制技术,体数据的渲染也达到了较高的帧数。因此该方法可以满足用户的实时交互要求。

4 结束语

针对传统传递函数设计的交互存在难度的事实,以及在设计时常忽视体数据空间信息的缺点,本文提出一种基于直方图局部聚类的半自动传递函数设计方法,利用空间信息对二维直方图进行局部聚类并据此直接生成传递函数。该方法在仅需用户指定方差阈值和聚类个数两个参数的条件下,能够达到观

察体数据内部主要特征的要求,因而是一种可靠的传递函数设计手段。

本文仍基于二维传递函数设计,没有考虑将空间信息直接加入传递函数设计的参数空间,因此未能增强分类的能力,而对一些特殊的体数据,空间信息应当可以作为体数据特征区分的依据之一(如 feet 数据,左右脚骨可以利用空间信息进行区分)。因此今后的工作可以考虑将空间信息应用到传递函数设计的参数空间中。此外,本文使用的聚类算法采用了简单的 K-means 算法,仍需要用户指定聚类的个数,今后可以考虑使用自动聚类的方法,进一步降低对用户的操作要求。

参考文献:

- [1] KNISS J, KINDLMANN G, HANSEN C. Multi dimensional transfer functions for interactive volume rendering [J]. *IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics*, 2002, 8(3): 270-285.
- [2] TZENG F Y, LUM E B, MA K L. An intelligent system approach to higher dimensional classification of volume data [J]. *IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics*, 2005, 11(3): 273-284.
- [3] ROETTGER S, BAUER M, STAMMINGER M. Spatialized transfer functions [C]//Proc of Eurographics/IEEE TVCG Workshop on Volume Graphics. New York: ACM Press, 2003: 35-44.
- [4] KINDLMANN G, DURKIN J. Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering [C]//Proc of IEEE Symposium on Volume Visualization. 1998: 79-86.
- [5] PRASSNI J S, ROPINSKI T, HINRICHS K H. Efficient boundary detection and transfer function generation in direct volume rendering [C]//Proc of the 14th International Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization. 2009: 285-294.
- [6] ZHOU Jian-long, TAKATSUKA M. Automatic transfer function generation using contour tree controlled residue flow model and color harmonics [J]. *IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1481-1488.
- [7] RUIZ M, BARDERA A, BOADA I, et al. Automatic transfer functions based on informational divergence [J]. *IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics*, 2011, 17(12): 1932-1941.
- [8] OHTAKE Y, BELYAEV A, ALEXA M, et al. Multi-level partition of unity implicits [C]//Proc of SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2003: 463-470.
- [9] NAGAI Y, OHTAKE Y, SUZUKI H. Smoothing of partition of unity implicit surfaces for noise robust surface reconstruction [C]//Proc of Symposium of the Geometry Processing. New York: ACM Press, 2009: 1339-1348.
- [10] OZTIRELI C, GUENNEBAUD G, GROSS M. Feature preserving point set surfaces based on non-linear kernel regression [J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, 28(2): 493-501.
- [11] 唐月红, 李秀娟, 程泽铭, 等. 隐式 T 样条实行封闭曲面重建 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(2): 270-275.
- [12] 杨军, 诸昌铃. 带噪声的点云数据的隐式曲面重建算法 [J]. *西南交通大学学报*, 2008, 43(1): 29-34.
- [13] 袁红星, 郭立, 郁理. 一种无需包围盒的自适应采样可见外壳生成算法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2010, 31(9): 1877-1880.
- [14] LEMPITSKY V, BOYKOV Y. Global optimization for shape fitting [C]//Proc of Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-8.
- [15] CAMILLE C, XAVIER B, LAURENT N, et al. Surface reconstruction using power watershed [C]//Proc of International Symposium on Mathematical Morphology. New York: ACM Press, 2011: 381-392.
- [16] 袁红星, 郭立, 郁理, 等. 采用窄带图切割的多目重构方法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(4): 605-611.
- [17] BRANDT A. Algebraic multigrid theory: the symmetric case [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 1986, 19(1-4): 23-56.
- [18] OHTAKE Y, BELYAEV A, SEIDEL H P. An integrating approach to meshing scattered point data [C]//Proc of ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. New York: ACM Press, 2005: 61-69.
- [19] LEMPITSKY V. Surface extraction from binary volumes with higher-order smoothness [C]//Proc of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1197-1204.
- [20] CURLESS B, LEVOY M. A volumetric method for building complex models from range images [C]//Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1996: 303-312.
- [21] BABAK T. Generation and optimization of local shape descriptors for point matching in 3D surfaces [D]. Kingston: Department of Electrical and Computer Engineering, Queen's University, 2009.

(上接第 1873 页)