

文章编号: 0253-2239(2008)08-1502-06

一种可交互的体绘制光学传递函数模型

肖永飞 付宜利 王树国

(哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对三维数据场可视化过程中兴趣区的交互分离问题,给出了基于体绘制光学传递函数的半自动调节方法。该方法从传递函数的光学模型出发,根据三维数据的光强分布,结合体数据的三维梯度场,给出了体数据的颜色及透明度值分离交互调节的模型。为了提高本方法的实用性,本文采用了交互模型与现代显卡纹理特性相结合的方法来提高交互速度。实验证明,通过实时调节改进传递函数的相关参量,该模型能以大于每秒 30 帧的交互速度获得兴趣区的最佳视觉分离效果。本方法能在交互体视化的同时实现最佳参量的获取。

关键词 光学模型; 体绘制; 传递函数; 交互; 兴趣区(ROI)

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1502

Interactive Optical Transfer-Function Model for Volume Rendering

Xiao Yongfei Fu Yili Wang Shuguo

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract To deal with the interactive separation of region of interests (ROI) in the process of three-dimensional (3D) visualization, a half-automatic adjusting method based on the optical model for volume rendering is introduced. According to the optical transfer-function model and the intensity distribution of 3D data, the interactive model is described by adjusting the RGB color and transparency values respectively with the help of the 3D gradient field. In order to make the method more effective, the interactive model and the texture feature of modern graphics are both applied to accelerate the process. The experimental results show that an optimal separating effect is achieved by adjusting the corresponding parameters in the transfer function model in real time. And the frame rate is up to 30 f/s in the interactive process. With this method, the optimal parameters are obtained in the interactive volume visualization.

Key words optical model; volume rendering; transfer function; interactive; region of interests (ROI)

1 引 言

直接体绘制是三维数据可视化的有效手段之一,由于它能在丢失信息较少的情况下实现对数据的三维重建,在医学、三维测量^[1,2]和科学计算等方面均得到了广泛的应用。光学传递函数是在体绘制过程中用来赋予数据光学特征的,因此它的设定是体视化中的重要部分。1992年,美国体视化(Volume Visualization)会议中也将光学传递函数的设定列为体视化十大关键技术之一^[3]。一个好的光学传递函数模型应该能在丢失最少量信息的同时

最大限度地分离出感兴趣区域,从而产生更好的视觉效果。然而迄今为止,寻求最佳光学传递函数仍是三维数据可视化技术中的一个难点。目前该函数的设定大体上有三种方法:依据先验知识直接设定、半自动交互调节和全自动生成。

直接设定法通常以体数据场中体元(Voxel)的密度(light intensity)为依据,Levoy于1988年首次将梯度作为分界面信息引入体绘制的光学模型中^[4],将体密度、梯度综合考虑来配置物体的颜色及透明度,使得组织分离效果更好。但这种方法必须

收稿日期: 2007-12-29; **收到修改稿日期**: 2008-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(60575016)资助课题。

作者简介: 肖永飞(1981—),男,博士研究生,主要从事医学图像处理与三维重建技术等方面的研究。

FE-mail: fei9818@gmail.com

导师简介: 王树国(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事医疗辅助机器人系统、医学影像融合和3D重建、图像标定、定位和导航技术等方面的研究。E-mail: meylfu@hit.edu.cn

预先知道数据的分布状况,如医学图像中不同组织的灰度分布,所以它只能针对特定的数据,不具备通用性。

三维数据种类多,数据量大,实现传递函数的完全自动的实时调节相当困难,目前研究的热点是半自动的交互调节^[5]。Gordon 等^[6]首先提出了光学传递函数半自动调节的数学模型,利用三维数据场梯度方向的一、二阶梯度作为重建边界的识别依据,在减小工作量的同时分离出了兴趣区边界。由于该方法能有效地将三维数据分类,于是,Guy 将该模型应用于传递函数对体数据的透明度调节上,推导出了基于透明度调节的传递函数^[7]。但以上方法均侧重于理论推导,缺乏交互手段的介绍。Bergner 等^[8]将一种光学传递函数半自动调节方法实用化,但由于其中引入了外部光照的影响,极大地降低了交互调节速度,无法满足实时交互的要求。

Joe 等^[9]根据前人理论,从体绘制光学模型的变量空间出发,提出了多维传递函数的概念,并利用三维 Widget 实现了多维传递函数的交互调节。然而,随着维数的增多,传递函数消耗的资源成幂次增长。同时,由于变量的增多,需设定多个 Widget 来操作不同的变量值,操作复杂,很难应用于实际。

本文从三维数据场函数的光学模型出发,将梯度场模型与 RGB 颜色函数分离调节,推导出一个易于交互的半自动函数模型,并依据该模型实现了三维数据兴趣区交互分离。在该平台下,通过实时调

节相关参量,能方便地分离出有着不同光学性质的三维数据,在交互的同时具备了一定的通用性。

2 交互体绘制模型

2.1 体绘制光学模型及数学描述

体绘制的光学模型最初是在研究光线穿过云雾粒子所产生的效应过程中建立的^[10]。三维数据通常是由一系列二维图像叠加而成,其中图像中的每个像素可被视为一个既发光又吸光的粒子,如图 1 所示。

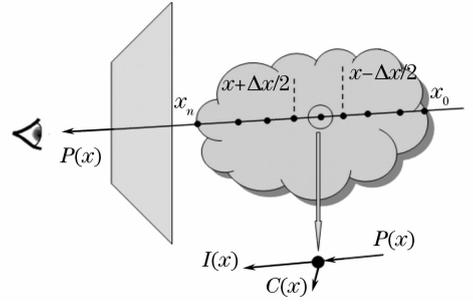


图 1 体绘制光学模型

Fig. 1 Optical model for volume rendering

假设光线经过每个粒子时,不同密度(灰度)的粒子均会吸收不同波长光,具体表现为体元光强 $I(x, \lambda)$ 和颜色 $C(x, \lambda)$ 的改变,多条光线投射至视点,即可构建出整个体数据的三维形状。若粒子密度用 $\rho(x)$ 表示,光线由 $x - \Delta x/2$ 到达 $x + \Delta x/2$ 时的光强可表示为

$$I(x + \Delta x/2, \lambda) = I(x - \Delta x/2, \lambda)[1 - \rho(x, \lambda)\Delta x] + C(x, \lambda)\rho(x, \lambda)\Delta x, \quad (1)$$

当 Δx 趋近于 0 时,变换可得

$$dI(x, \lambda)/dx + \rho(x, \lambda)I(x, \lambda) = C(x, \lambda)\rho(x, \lambda). \quad (2)$$

两边同乘以积分因子 $\exp\left[\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right]$, 得

$$\exp\left[\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right] \frac{dI(x, \lambda)}{dx} + \rho(x, \lambda)I(x, \lambda) \exp\left[\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right] = C(x, \lambda)\rho(x, \lambda) \exp\left[\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right], \quad (3)$$

若边界条件 x_0 处的光强为 $I(x_0, \lambda)$, 则对上式沿着光线从 x_0 至 x_n 积分可得

$$I(x_n, \lambda) = \int_{x_0}^{x_n} \exp\left[\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right] C(x, \lambda)\rho(x, \lambda) dx + I(x_0, \lambda) \exp\left[\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right], \quad (4)$$

式中第一项表示体元与光线交互后的光强,第二项则表示背景光穿过体数据后的衰减,从而构成了体绘制模型的连续表达式。

为了便于在计算机中处理该模型,需要将上述表达式离散化。常用黎曼和来表示积分项,即

$$\exp\left[-\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right] = \exp\left[-\sum_{i=1}^n \rho(x_0 + i\Delta x, \lambda)\Delta x\right] \approx \prod_{i=1}^n \exp[-\rho(x_0 + i\Delta x, \lambda)\Delta x] = T_i, \quad (5)$$

同样可求出

$$\int_{x_0}^{x_n} \exp\left[-\int_{x_0}^x \rho(t, \lambda) dt\right] C(x, \lambda) \rho(x, \lambda) dx \approx \sum_{i=1}^n C(x_0 + \Delta x, \lambda) \rho(x_0 + \Delta x, \lambda) \prod_{i=1}^n T_i. \quad (6)$$

不失一般性,我们令 $x_0 = 0$,同时假设在一条光线上的颜色函数为常数 $C(x, \lambda) = C$,可以求出积分项

$$\int_0^{x_n} \exp\left[-\int_0^x \rho(t, \lambda) dt\right] C(x, \lambda) \rho(x, \lambda) dx = C \left\{ 1 - \exp\left[-\int_0^{x_n} \rho(t, \lambda) dt\right] \right\}. \quad (7)$$

将(7)式和(5)式代入(4)式,得

$$I(x_n, \lambda) = I(x_0, \lambda) \prod_{i=1}^n T_i + C(\lambda)(1 - T_i). \quad (8)$$

通常用 $\alpha = 1 - \exp\left[-\int_0^{x_n} \rho(t, \lambda) dt\right]$ 来表示光线的

衰减情况,它的数字表示方法为 $\alpha = 1 - T_i$.然而更通用的方法是令 $C(x, \lambda)$ 和 $\rho(x, \lambda)$ 与采样位置关联,这样颜色函数不再是常数,再次用黎曼和来近似积分计算:

$$I(x_n, \lambda) = \sum_{n=1}^N C(x, \lambda) \prod_{i=1}^{n-1} (1 - T_i), \quad (9)$$

式中 N 为光线数.假设颜色以及粒子密度在一条光线上线性变化,利用三次线性插值可以求得每个体元上光学属性值.

2.2 颜色与透明度分离调节模型

如上所述,光线穿过体数据场时,依据不同体元的密度值,可沿光线传递路径赋予其不同的光学属性值,称其为体绘制的光学传递函数.

光强函数 $I(x, \lambda)$ 表示沿光线的不同采样点的体元光学属性,其中变量 x 的维数会随着数据的不同而变化.体绘制中常用的是二维数据集或三维标量数据场,用函数 $f(x, y, z)$ 来表示采样处的体元密度或光强值,则不同密度的体元在光线投射过程可赋予不同的红绿蓝(RGB)值来区别. Levoy 最初提出的区别方法是单纯利用透明度函数,通过分段梯度场函数进行区分^[11].虽然对于一般的密度图像场也能分离出兴趣区,但却没有 RGB 方法更具有真实感.

此外,一般的光照模型是利用梯度场即各向偏导来进行数据分类的^[12],表示如下:

$$\nabla f(x, y, z) = (f_x, f_y, f_z) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right), \quad (10)$$

实际应用中可用差分法近似^[13],且

$$\|\nabla f(x, y, z)\| = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}, \quad (12)$$

所以最终的颜色透明度值可表示为

$$\nabla f = \begin{cases} f_x & \Rightarrow R \\ f_y & \Rightarrow G, \\ f_z & \Rightarrow B \end{cases}$$

而 $\|\nabla f\| \Rightarrow \alpha$.虽然这种方法通过事先设定合适的参量,也能较好地区分出不同性质的三维数据,但是在绘制完成后,无法交互修改参量以达到更好的效果.

于是,给出了一种分离调节体密度与梯度模型并利用该模型下的光学传递模型合成最终的三维图像的方法.已知颜色是波长的函数,对不同波长光子的吸收使得体元呈现不同的颜色.将波长看作一个函数,以体数据场密度为变量,表示为 $\lambda[f(x)]$,这样不同的体元依据体密度呈现不同的 RGB 颜色.最终的颜色调节模型可表示为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N C\{x, \lambda_R[f(x)]\} \prod_{i=1}^{n-1} (1 - T_i) \\ \sum_{n=1}^N C\{x, \lambda_G[f(x)]\} \prod_{i=1}^{n-1} (1 - T_i) \\ \sum_{n=1}^N C\{x, \lambda_B[f(x)]\} \prod_{i=1}^{n-1} (1 - T_i) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

光线传递过程中的透明度函数 $\alpha = 1 - T_i$,可作为分离体数据兴趣区的一种手段.对于不同的分界面,利用梯度边界模型对其进行分离.通过图像的灰度分布图可得到兴趣区的梯度范围,若梯度变化属于该范围,则可以认为此处为兴趣区边界,否则降低其透明度值.函数表示为

$$\alpha_{\text{totle}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \alpha_i, \quad (14)$$

其中 ω_i 的变化范围在 $[0, 1/\alpha_i]$ 之间.若兴趣区的边界梯度变化范围在 $[a, b]$ 之间, ω_i 可看作

$$\begin{cases} \omega_i \rightarrow 1/\alpha_i, & \nabla f \subset [a, b] \\ \omega_i \rightarrow k, & k\alpha_i \subset (0, 1) \text{ and } \nabla f \not\subset [a, b] \end{cases} \quad (15)$$

在该模型中,分别调节区域参量 $[a, b]$ 以及权值 k ,便可实现透明度的交互调节.

3 实 现

3.1 医学图像的组织分类

以医学图像集的重建调节过程为例,在进行调节以前,需要一些先验知识来区别不同的组织。通常不同组织之间的灰度变化都在一定范围之内,较为明显的是 CT 图像,它的各个组织分布如图 2 所示。

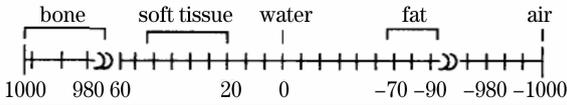


图 2 人体组织 CT 值分布

Fig. 2 CT value distribution of human tissue

在医学图像中则是用来灰度值标示的,因此需要将上述值转化至区间 $[0, 255]$ 。其中体数据函数值表示的就是三维空间上某点的密度或称为灰度值,传递函数模型中的颜色函数就是以它为变量的。

一般医学图像的有用灰度范围在区间 $[32, 255]$,所以它的最大变化梯度为 $255 - 32 = 223$ 。

在不同组织的分界面梯度变化的范围不同,如 CT 图中的软组织、骨和脂肪之间的梯度区别非常明显。因此也将梯度划分为 $0 - 223$ 个区域,以便在实现过程中实时调节。

3.2 实现流程

为了加速体绘制,在实现过程中利用了显卡的三维纹理特性。将三维数据场的标量值存储到显卡纹理内存的颜色分量中,沿着切片序列进行三次插值计算后,计算的结果被转化为纹理坐标,最终查询

颜色及透明度表,从而为体数据赋予颜色和透明度。具体过程如图 3 所示。

图中的虚线框就是对于一般体绘制流程的改进部分,其中的颜色与透明度值的调节可通过接口由用户交互操作,对体元光强和梯度场进行分别调节,用户可动态地改变不同类型数据的颜色和透明度值,以达到最佳的视觉效果。由于在最终三维图像的合成过程是显卡硬件通过读取本文计算出来的颜色表实现的,因此分离调节颜色与透明度几乎不影响体绘制速度,且能获得较好效果下的绘制参量。该方法的优势在于可以把整个体数据看作立方体状的三维纹理,同时可以将该处的纹理坐标 $[s, t, r]$ 看作查询颜色表的索引来实现颜色透明度的快速查询。由于三维纹理利用硬件来实现体数据间的插值计算,所以能大大加快体数据可视化的速度。

实现流程如下:

- 1) 读入体数据,求体密度 $f(x, y, z)$ 和梯度场 ∇f 。
- 2) 依据体函数 $f(x, y, z)$ 确定三维数据场颜色表。
- 3) 依据梯度场 ∇f 确定体数据场中不同组织分界面之间的透明度 α 值。
- 4) 利用 2) 和 3) 求得最终的颜色透明度表,引入光学模型。
- 5) 将体数据与平行于视口的多个平面相交,求出交点,利用求得的交点找出显卡三维纹理中对应的纹理单元,进行纹理映射。
- 6) 依据交互调节传递函数模型按从后向前的顺序进行体绘制。
- 7) 用户根据兴趣区特征,交互调节颜色透明度表参量,转回至 4)。
- 8) 得出最终的体绘制图像。

4 结 果

为了验证该模型的有效性,对几组体数据进行了测试。测试平台为奔腾 IV 3.0 GHz,内存 DDR2 1 G Bytes,显卡为支持三维纹理的 ATI Radeon X600,显存大小 256 M Byte,编程环境 VC6.0。

首先用三种颜色表编码来测定对颜色模型的调节。常用的体数据为灰度图像集,其变化范围在 $0 \sim 255$ 之间。用灰度编码、彩虹编码以及金属编码三种 RGB 伪彩色来区分这 256 种不同的灰度颜色,使得可视化的数据更形象,如图 4 所示。

对于 $256 \times 256 \times 256$ 的 CT 图像集,三种编码

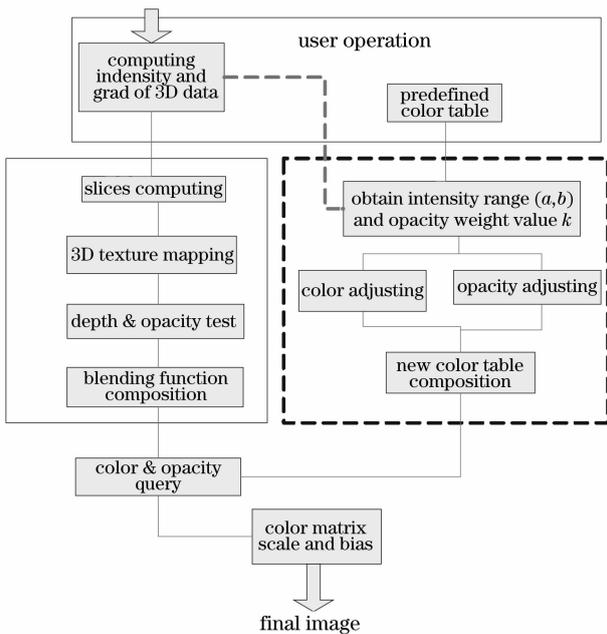


图 3 交互调节流程图

Fig. 3 Flow chart for interactive adjusting

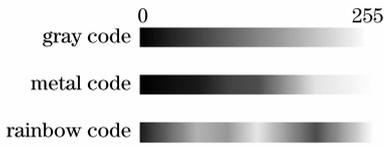


图 4 伪彩颜色表编码

Fig. 4 Pseudo-color table code

方式下重建效果如图 5 所示。

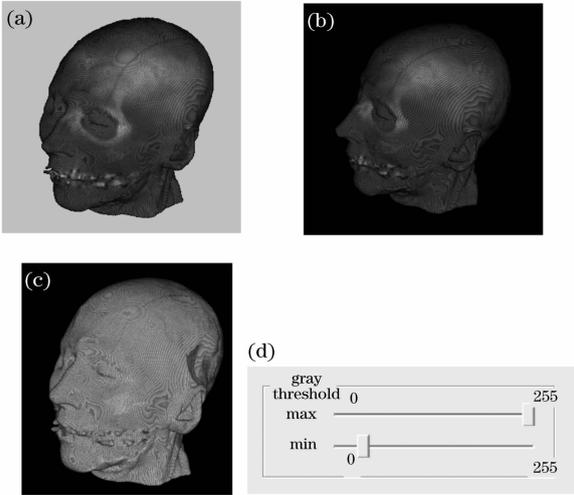


图 5 三维重建效果图。(a) 灰度编码重建, (b) 金属编码重建, (c) 彩虹编码重建, (d) 颜色调节控件

Fig. 5 Three-dimensional reconstruction diagram. (a) Gray coding reconstruction, (b) metal coding reconstruction, (c) rainbow coding reconstruction, (d) color adjusting control

实验中可利用上图中的控制条对传递函数中不同灰度范围颜色进行过滤,控制条中的最小和最大值就是前面论述中的 $C(x, \lambda)$ 密度表现形式,用以区分不同的兴趣区。如 2.1 节所述,CT 图像骨骼部分的灰度值远高于其他组织,利用该颜色控制条将有效的体数据范围进行压缩后,代入颜色调节方程 (13) 式,就能实现颅骨与其他组织的分离,分离效果如图 6 所示。

可见对于灰度差别较大的图像,对颜色模型进

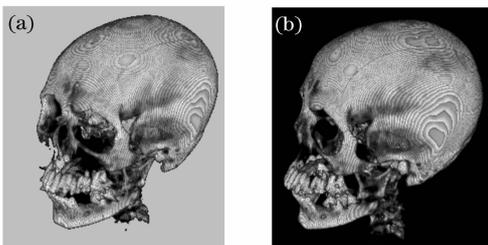


图 6 体绘制颜色调节图。(a) 灰度编码图, (b) 金属编码图

Fig. 6 Color adjusting diagram for volume rendering.

(a) Gray coding result, (b) metal coding result

行交互调节就可以有效分离不同的组织。

有一些三维数据灰度差别比较平均,单纯采用颜色函数无法达到好的分离效果,可以将颜色模型与透明度模型分别调节,以达到需要的效果,图 7 就是加入透明度调节的效果图。

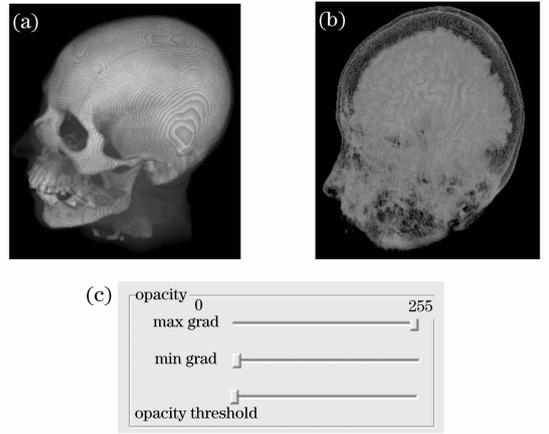


图 7 透明度调节效果图。(a) 金属编码透视图,

(b) 核磁共振成像透视图, (c) 透明度调节控件

Fig. 7 Opacity adjusting results. (a) Metal coding perspective diagram, (b) MRI perspective diagram,

(c) opacity adjusting control

图 7(a)为金属色编码 CT 图像集重建的透明效果,颜色调节模型中的显示颜色范围在灰度区间 $[32, 255]$ 而透明度的梯度变化区间在 $[110, 255]$ 之间,该区间内的透明度为 1,其它梯度范围的透明度设为 0.05,利用 (14) 式、(15) 式,便可实现一个较好的视觉分析效果。为了进一步检验该交互模型对于灰度差别比较平均数据的分辨能力,对更为复杂的 MRI 图像进行透视,依据大脑灰度的梯度范围分离大脑组织。由图 7(b) 可以看到,分离过程根据用户自己的视觉效果,通过综合调节颜色及梯度参量,就可得到颜色及透明度的最佳参量。将反馈回来的参量实时显示,可以作为寻求好的可视化效果的参考,图 5 至图 7 交互调节得到的最终参量如表 1 所示。

5 讨 论

从表 1 可以看出,利用本文方法,在图像集尺寸为 $256 \times 256 \times 256$ 大小时,交互的帧率仍大于 30 frame/s,满足实时交互要求。而 Joe 采用的多维传递函数方法虽然成像质量较本文高^[7],但由于变量的增多,在图像集尺寸为 $256 \times 256 \times 128$ 的情形下其交互帧率只有 1 frame/s,与交互调节的要求差距较大。而文献[5]中为了实现光学传递函数的自动调节,利用神经网络来识别数据类型,这导致大部

分的计算量集中在数据的识别上,对于 $100 \times 100 \times 300$ 大小的数据,其帧率也仅仅达到不足 1 frame/s,也远小于本文的方法。

表 1 交互模型参量表

Table 1 Parameters of the interactive model

Figure	Color coding	Gray range	Perspective	Grad range	Opacity of no ROI	Mean frame rate
Fig. 5	Gray, metal & rainbow	[32,255]	No	×	1	34 f/s
Fig. 6	Gray, metal	[170,255]	No	×	1	36 f/s
Fig. 7(a)	Metal	[32,255]	Yes	[113,255]	0.05	30 f/s
Fig. 7(b)	Metal	[29,255]	Yes	[50,160]	0.1	33f/s

其次,与一般方法相比,传统方法体元的颜色及透明度是利用体密度和梯度场共同确定的,也就是说,颜色函数以及透明度函数均是由 $f(x, y, z)$ 、 $\nabla f(x, y, z)$ 为变量的。用公式可表示为 $C[f(x, y, z), \nabla f(x, y, z), \lambda]$ 和 $\alpha[f(x, y, z), \nabla f(x, y, z)]$ 。这种方式会导致体绘制兴趣区分类时,颜色透明度表的尺寸成幂次增长。如二维灰度图像序列的体绘制,若灰度变化范围在 $0-m$ 之间,梯度的变化范围也在 $0-n$ 之间,则合成的 RGBa 表后对其寻址的复杂度为 $O(mn)$;而在建立交互模型下,颜色及透明度是分开调节的, $C[f(x, y, z), \lambda]$ 单单调节光强(灰度),而 $\alpha[\nabla f(x, y, z)]$ 则由梯度单独确定。分离调节二者,相当于分别建立颜色表和透明度表,在生成相同效果的前提下,寻址的复杂度变为 $O(m+n)$ 。对于更复杂的三维数据,随着变量维数的增多,这种模型的优势将更加明显。

此外,利用体密度和梯度共同确定颜色透明度表时,通常一旦求得,就无法再次修改,难以实现交互,不具有通用性。利用颜色表和梯度变化分离调节二者,不但能实现相同的显示效果,而且这种方式能及时将最佳可视化效果下所采用的参量实时反馈给用户,以作为将来的交互保留参考数据。

6 结 论

本文从体绘制的光学模型出发,结合现代显卡的三维纹理特性,实现了体绘制颜色与透明度的交互分离调节。该方法在减小传统方法颜色透明度表的同时,能够获得相同的视觉效果;还可以能通过交互实时得到三维数据场可视化数据,从而在三维数据可视化应用中寻求最佳参量提供了工具。

参 考 文 献

1 Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects[J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2007, **27**(8): 1435~1439
 唐 雁,陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1435~1439
 2 Ding Wanshan, Liu Yan. Optical measurement of object's surface three-dimensional shape in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 58~62
 丁万山,刘 艳. 水中物体的光学三维形貌测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 58~62
 3 Pfister H, Lorenzen B, Bajaj C *et al.*. The transfer function bake-off[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, **21**(3): 16~22
 4 Marc Levoy. Display of surfaces from volume data[J]. *IEEE Computer Graphics & Application*, 1988, **8**(5): 29~37
 5 Wang Liansheng, Chen Xucan, Cai Xun *et al.*. Transfer functions design for volume rendering by using neural networks[J]. *J. System Simulation*, 2006, **18**(1): 298~303
 王连生,陈旭灿,蔡 勋等. 体绘制中的自动转换函数研究与实现[J]. *系统仿真学报*, 2006, **18**(1): 298~303
 6 Gordon Kindlmann, James Durkin. Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering[C]. *IEEE Symposium on Volume Visualization*, 1998. 79~86
 7 Guy M. Nicoletti. Optimal generation of transfer functions for direct volume rendering[A]. In: *IEEE Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory*, West, Virginia, USA, 2003. 367~371
 8 Bergner S, Moller T, Tory M *et al.*. A practical approach to spectral volume rendering[J]. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 2005, **11**(2): 207~216
 9 Kniss Joe, Kindlmann G, Hansen C. Multidimensional transfer function for interactive volume rendering[J]. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 2002, **8**(3): 270~285
 10 Nelson M. Optical models for direct volume rendering[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1995, **1**(2): 99~108
 11 Marc Levoy. Efficient ray tracing of volume data[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1990, **9**(3): 245~261
 12 Qiu Zhiqiang, Liang Yonghui, Yu Qifeng. Three-dimensional structure reconstruction from image sequence based on affine approximation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1104~1010
 邱志强,梁永辉,于起峰. 基于仿射近似从序列图像重建目标三维结构[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1004~1010
 13 He Anzhi, Yan Dapeng, Zhu Zhaoqing *et al.*. Computer simulation of three-dimensional refractive index field from iterative convolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(9): 908~913
 贺安之,阎大鹏,朱兆清等. 迭代卷积重建三维折射率场的计算机模拟[J]. *光学学报*, 1994, **14**(9): 908~913