

文章编号: 0253-2239(2009)07-1842-07

# 一种透视体绘制光学模型及其实现

付宜利 肖永飞 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** 在三维数据可视化的应用中,经常要求保留体数据外部组织的同时透视内部某一兴趣区,而这一过程的实现通常需要对三维数据进行预处理后才能取得较好的效果。从体绘制的传统光学模型出发,推导出一种可交互调节的体绘制光学模型。通过在分类信息中引入透射光对数据显示作用的计算,建立了基于内部兴趣区的透视光线模型,在保留外部组织半透明的同时,无需对三维数据进行预处理来实现较传统模型更好的透视效果。实验证明:该方法能以大于 20 f/s 的速度完成交互,且与传统模型相比有着更好的透视效果。本模型可有效提高用户对三维数据的特征识别能力,为三维数据的有效分析提供理论依据。

**关键词** 光学模型;体绘制;传递函数;交互;兴趣区

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.1842

## A Perspective Optical Model of Volume Rendering and Its Realization

Fu Yili Xiao Yongfei Wang Shuguo

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

**Abstract** In the application of 3D data visualization, demands on insight into the inner region-of-interest (ROI) of volume are often made while keeping the outer tissue visible. However, a better effect is usually achieved after 3D data has already been preprocessed. In this paper, according to the traditional optical model of volume rendering, an interactive optical model is deduced. The calculations on the transmitted light effect of 3D data are introduced in the classifying information. And a perspective ray model based on inner region of interests is constructed. In this model, a better perspective effect is gotten without any preprocessing while keeping the outer tissues semi-transparent. The experiment proves that this method produced a more intuitive result than the traditional model together keeping the frame rates greater than 20 f/s. Using this model, the ability to recognize the feature of 3D data is improved and the theoretic supports are provided for the effective analysis on 3D data.

**Key words** optical model; volume rendering; transfer function; interactive; region of interests

### 1 引言

三维标量数据场的可视化是一门由体数据直接还原物体三维原型的技术,由于直接体绘制能在不丢失内部信息的情况下近乎无损地重建数据场,在医学图像重建、虚拟现实、三维地层数据分析和石油勘测等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。在研究体数据的直接绘制过程中,需要建立一些数学模型来分析体数据的生成、光线在数据场中的折射、散射以及体元对光线的透射及吸收。

随着科学技术的不断发展,对数据场的可视化也提出了更高的要求,不仅仅局限于重建三维外貌

和区别显示不同组织,更提出了对体数据内部各个组织空间拓扑结构的定位及透视显示的要求。而以往的体绘制模型在建立之初并没有太多地考虑透视效果,因此在绘制过程中,实现有计划地调节不同组织的透明度方面效果不太良好,但很多学者已经进行了相关的研究。

Levoy<sup>[2]</sup>首先在体绘制中引入颜色以及透明度值,这种方法的实现原理单纯,只是依据体密度分割出体数据中不同的组织,主要强调显现不同组织间的等值面,所以通常只能绘制单一的组织,无法显现组织间的拓扑空间结构。Parker 等<sup>[3]</sup>依据该思想实现

收稿日期: 2008-06-19; 收到修改稿日期: 2008-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(60575016)资助项目。

作者简介: 付宜利(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事医学图像处理与医疗机器人和医学影像融合和 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.

了一种可交互的体绘制模型,并将光照和介质的特性引入到该模型中。但是,由于光照效果的引入,使得硬件配置随之增高,从而影响了该系统的普及性。彭延军等<sup>[4]</sup>为了实现对三维数据场内不同组织的区分,在普通光学模型中引入了分界面信息,但他改进的模型也未指出透射光对内部数据场的影响。Nelson<sup>[5]</sup>将对模拟高温火焰附近的云雾粒子的研究用于直接体绘制<sup>[5]</sup>。Nelson 指出要提取更多有用的信息,需要以数据场函数为变量,但他并未对此进行更深入的讨论。Joe 等<sup>[6]</sup>在总结前人的基础上,构建了一个更接近现实的模型。同时他还指出了将其模型应用于基于纹理的体绘制的一些优势,但是在其模型中没有指出粒子光对兴趣区分界面的影响。

本文在三维标量场的吸收/散射模型的基础上分析了透视光对介质的影响,并把数据场函数连同内部分界面信息引入到该模型的传递函数中,进一步地完善了该模型,在体绘制过程中能根据用户要求保留外部结构的同时更清晰地交互分离出不同的兴趣区。

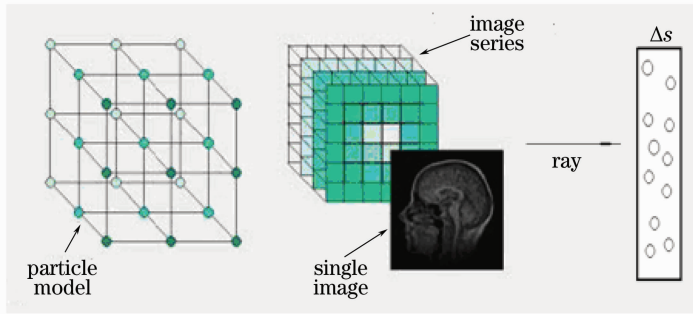


图 1 吸收/散射粒子模型

Fig. 1 absorption/emission particle model

对于“冷粒子”,光线通过单位体积介质时粒子的吸光率为  $\rho\pi r^2\Delta s$ ,令  $\Delta s$  趋近于 0,粒子重叠的可能性也会降为 0,这样可以得到下面的方程:

$$\frac{dI}{ds} = -\rho\pi r^2 I(s) = -\tau(s) I(s), \quad (1)$$

其中  $s$  是光线投射方向的当前位置,  $I(s)$  是当前位置光线的强度。 $\tau(s) = \rho\pi r^2$  则代表光线的衰减系数,它用来表示光线被粒子吸收的程度,设  $I_0$  是  $s = 0$  处的光强,可得

$$I(s) = I_0 \exp\left[-\int_0^s \tau(t) dt\right]. \quad (2)$$

$1 - \exp\left[-\int_0^s \tau(t) dt\right]$  在直接体绘制的光线传递函数中代表体元的不透明度,常用  $\alpha$  来表示。如果整个三维标量场用函数  $f(s)$  表示,则投射光线经过每

## 2 经典的体绘制粒子模型

Nelson 和 Peter 在研究云雾粒子的三维模拟过程中提出了“冷热”粒子模型<sup>[7]</sup>,从而为体绘制奠定了理论基础。本文提到的体数据均为规则的,不规则的情况不在考虑之内。我们对该模型建立原理进行剖析,以便将来进一步的改进。如图 1 所示,规则数据场通常是通过一系列同尺寸的二维图像序列叠加而成,这样会形成一个三维空间内规则点阵模型,其中二维图像的每个像素均可视作三维数据场中的一个粒子。由于每个二维图像上的像素规则排列,因此体元粒子在材质中均匀分布,且半径为  $r$ ,整个三维数据场就可以看作是无数薄片的层层叠加,令其中每个薄片侧面积为  $E$ ,厚度为  $\Delta s$ ,令单位体积的介质中粒子的密度是  $\rho$ ,光线投射到该介质相当于与介质内部的粒子相互作用,这样就构成体绘制过程基本的吸收/散射模型<sup>[8]</sup>。为了便于最后模型的合成,把粒子分为只吸收不发光的“冷粒子”和只发光不吸收的透明“热粒子”两种。

个粒子需要对其赋予其光学属性值,如颜色、不透明度。这个赋值函数就成了一个以  $f(s)$  为变量的函数,通常称其为体绘制的光学传递函数。

对于“热粒子”我们可以用  $C$  表示单个粒子在单位区域发出的光强,单位体积介质发出的光强为  $C\rho\pi r^2\Delta s$ ,同样可以得到一个关于  $I(s)$  的微分方程:

$$\frac{dI}{ds} = C(s)\rho\pi r^2 I(s) = C(s)\tau(s) = k(s), \quad (3)$$

这里的  $I(s)$  表示的是发光率,可以求得:

$$I(s) = I_0 + \int_0^s k(t) dt. \quad (4)$$

最终的粒子模型是综合冷热粒子特点的模型,合成后的微分方程为:

$$\frac{dI}{ds} = k(s) - \tau(s) I(s), \quad (5)$$

假设  $s=D$  表示视点位置,依据上面的公式就可以得到最终的吸收/散射粒子模型:

$$I(D) = I_0 \exp\left[-\int_0^D \tau(t) dt\right] + \int_0^D C(s) \tau(s) \exp\left[-\int_0^D \tau(t) dt\right] ds = I_0 \exp\left[-\int_0^D \tau(t) dt\right] + \int_0^D k(s) \exp\left[-\int_s^D \tau(t) dt\right] ds. \quad (6)$$

通过分析可以发现,式中第一项表示的是背景光对粒子的作用,同时在这个过程中考虑了光线衰减的影响;第二项则代表了光照对粒子的作用。因此,粒子的颜色和透明度值也是由两方面决定的:一是背景光在沿视点传播时的光学属性;二是光源经过粒子的反射和吸收对粒子的影响。这样构建的模型对于显示三维物体原形或分离数据场的单一组织都是很方便的,但是由于忽略了透射光作用每个粒子时的效应以及内部三维数据的边界信息,上述模

型在透视数据场内部不同兴趣区时很难实现较好的效果。

### 3 透射光和分类信息的引入

要使体数据的显示更接近现实,一个完善的光学模型中须考虑更多,包括粒子的密度(灰度)、对光线的吸收度、反射度,甚至还要考虑数据场内部粒子间对光线传递的影响。因此在完善的模型中,某个粒子受到的光,除了背景光、外部光照和本身的粒子光外,还要考虑数据场中其他粒子的透射作用。在目前情形下,更接近现实的模型会导致计算量的急剧上升,单单依靠软件已无法实现对其的交互操纵。为了加速该过程,文献[9,10]中均提出了利用图形卡的硬件特性来加速算法的方法,虽然一定程度上提高了绘制速度,但仍然需要减少部分光学属性的引入才可获得较理想的绘制速度<sup>[11]</sup>。

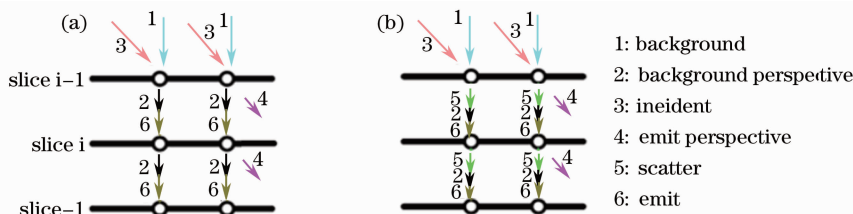


图 2 粒子光谱分析

Fig. 2 particle spectral analysis

在经典的体绘制光学模型中[图 2(a)],最终投射到屏幕上的光线只由两部分组成:穿过数据场的背景光(2号箭头)和粒子本身发出的光(6号箭头),见(6)式。为了使重建的模型更具真实感,还需考虑外部光照的影响(3号箭头和4号箭头)。因此外部光照情形下,在(6)式的第二项中,还要引入反射以及散射因素。文献[6,7]中均给出了该状况下的数学表达式,若用  $x(s) = x_0 + \omega s$  来表示背景点  $x_0$  在方向  $\omega$  上的采样距离,则光照情形下光学模型的第二项中的  $k(x)$  表示为

$$k(x) = S(x)R(x)P(\omega, \omega')I(x) \exp\left[-\int_0^x \tau(t) dt\right], \quad (7)$$

其中  $S(x)$  是 Blinn-Phong 表面散射函数,它与表面上点的梯度向量以及该点在三维数据场中的位置有关; $R(x)$  为反射函数,而  $\exp\left[-\int_0^x \tau(t) dt\right]$  则表示散射光的衰减系数; $P(\omega, \omega')$  是反射光的相函数,它用来表示在方向为  $\omega$  的入射光的作用下在  $\omega'$  方向

的散射光分布状况,其值取决于入射光和散射光之间的夹角。

为了便于在计算机中实现,将(7)式代入(6)式后离散化,令  $t = i\Delta t$ ,采样距离为  $D = n \times i$ ,衰减系数  $\exp\left[-\int_0^D \tau(t) dt\right]$  可近似为

$$\exp\left[-\int_0^D \tau(t) dt\right] \approx \exp\left[-\sum_{i=1}^n \tau(i\Delta t) \Delta t\right] = \prod_{i=1}^n a_i, \quad (8)$$

同样

$$\exp\left[-\int_s^D \tau(t) dt\right] \approx \exp\left[-\sum_{i=\Delta t}^D \tau(t) dt\right] \approx \prod_{j=i+1}^n a_j, \quad (9)$$

则

$$\int_0^D k(s) \exp\left[-\int_s^D \tau(t) dt\right] ds \approx \sum_{i=1}^n k_j \prod_{j=i+1}^n a_j, \quad (10)$$

将(7)式代入(6)式,并将其近似为

$$I(D) = I_0 \prod_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n k_j \prod_{j=i+1}^n a_j. \quad (11)$$

由(11)式可以看出,在光学模型的实际应用中,为了加快三维重建的速度,大部分方法都会忽略在数据场内部发生散射时的情况。如(11)式,其第一项表示背景光经过  $n$  个粒子衰减  $\prod_{i=1}^n a_i$  后投射于屏幕的光强,第二项表示引入光照因素后,光线方向上每个粒子的累积光强,所以最终投射到屏幕上的光强并没有考虑粒子间的散射效果,如图 2(a) 所示。文献[6,12]中指出,粒子散射效应相当于在体数据内部增强了光线的强度,可使得在视觉上对于细节信息的分辨更为清晰,而完全模拟粒子间的散射效应却是体绘制中计算量最大的部分<sup>[13]</sup>。

为了能在对体绘制速度影响较小的情况下将粒子散射效应引入常用模型,我们对散射过程进行了分析。在实际环境中,每个粒子的散射光均可通过传播路径作用于其他粒子,这在一定程度上增加了其他粒子的光强。每个粒子既发光也吸收光,发光表现为光强的增加,而吸收光则表现为对光强的衰减效应。而在图像处理方法中,像素灰度的黑白就如同亮度的明暗,因此,灰度也常被用来衡量光强。体绘制中的粒子实际上表示的是图像中的像素,因此其亮度受限于灰度的范围。同时,考虑到在前述的模型中,每个粒子对光线的吸收效应,即光线经过粒子的衰减效应,见(2)式,因此粒子间距离越远,粒子间散射光途经的粒子越多,彼此间散射效应越弱。若第  $i$  个粒子的光强用  $K_i$  表示,它上一个粒子可表示为  $K_{j-1}$ ,沿某一光线传播路径,不考虑背景光的影响,第  $j$  个粒子受散射影响后光强可表示为

$$k = k_j + k_{j-1}a_{j-1} + k_{j-2}a_{j-1}a_{j-2} + k_{j-3}a_{j-1}a_{j-2}a_{j-3} + \dots \quad (12)$$

由于粒子间的衰减度是用负的幂指数表示,其值为  $[0,1]$  间的小数。而且体数据的粒子数量庞大,这也决定了透明度值  $a$  是一个较小的小数(通常在  $10^{-4} \sim 10^{-2}$  数量级),才能产生最终的透视效果。因此(12)式中的透明度乘积的结果在实际计算中可进行近似计算。我们将某个粒子接受的所有散射光近似为光线方向上最近后续粒子的散射光,如图 2(b) 所示,5 号箭头表示最近粒子在光线投射方向上的近似散射光。加入该近似光到(11)式中,可得

$$I(D) = I_0 \prod_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n (k_j + k_{j-1}a_{j-1}) \prod_{j=i+1}^n a_j \quad (13)$$

散射是在表面上进行的,因此数据场内部分界面上的粒子散射效应也是我们模型捕捉的重点。分界面信息的计算可以采用多种方法,蔡文立等指出

了三种算子<sup>[12]</sup>,并比较了它们各自的优劣。为了减少计算的复杂度,我们采用了最常用的梯度算子  $\nabla I$ 。而某个粒子的梯度可表示为

$$\nabla I = (I_x, I_y, I_z) = \left( \frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial z} \right) \quad (14)$$

在实际应用中可用中心差分法近似<sup>[9]</sup>,即  $I_x \approx I(x+1, y, z) - I(x, y, z)$ ,  $I_y$  与  $I_z$  类似,则第  $i$  个粒子的梯度大小为

$$\|\nabla I_i\| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2} \quad (15)$$

在不同组织的分界面处,粒子的梯度差通常大于同一组织之间粒子的梯度差,换言之,当两粒子间在  $x$ 、 $y$  或  $z$  某一方向上的光强差大于规定阈值,即被认为该粒子位于某一分界面处。不考虑背景光作用,引入散射光后,粒子  $i$  的光强可表示为

$$I'_i = \sum_{m=1}^i (k_j + k_{j-1}a_{j-1}) \prod_{j=m+1}^i a_j = I_i + \sum_{m=1}^i k_{j-1}a_{j-1} \prod_{j=m+1}^i a_j = I_i + \Delta I_i \quad (16)$$

同理,粒子  $i$  在光线方向上最近的后续粒子  $i-1$  光强为  $I'_{i-1} = I_{i-1} + \Delta I_{i-1}$ 。粒子  $i$  与  $i-1$  的光强求差可得:

$$\Delta I = (I_i - I_{i-1}) + (\Delta I_i - \Delta I_{i-1}) \quad (17)$$

由于在未设置透明度前,即各个粒子透明度相同时,  $|\Delta I| \geq |I_i - I_{i-1}|$ ,所以引入散射模型后,与原来相比粒子间的光强差变大了。假设分界面处沿光线方向相邻两粒子为  $i$  和  $i-1$ ,引入散射光后,可知道粒子间的变化幅度为

$$\Delta I_i - \Delta I_{i-1} = \sum_{m=1}^i k_{j-1}a_{j-1} \prod_{j=m+1}^i a_j - \sum_{m=2}^i k_{j-2}a_{j-2} \prod_{j=m+1}^i a_j \quad (18)$$

因为不同材质间粒子的光强  $k$  的差更大,所以在相同透明度下,在越靠近分界面处,由于光强差的增大,细节也更容易分辨。可以看出,在引入散射效应后,兴趣区边界的清晰程度强于经典模型。因为只有透视情形下才能观察到内部的兴趣区,所以在改进模型中必然还要加入对透明度的考虑。透视过程是对不同组织赋予不同的透明度值来实现对各个组织的分离的,而改变透明度值必然对粒子光强产生影响。要突出数据场内的兴趣区,用户设定透明度值时,属于兴趣区的粒子透明度  $a$  的设置值通常要大于非兴趣区粒子的透明度值,即(18)式中的  $a_{j-1}$  要大于  $a_{j-2}$ 。由于分界面处粒子间的光强  $k_{j-1}$  也大于  $k_{j-2}$ ,所以由(18)式可知,引入透明度后,粒子间

的光强差还要大于未考虑透明度因素前的光强差。从而可得出改进模型对分界面分离能力的关系为：经典模型 < 引入粒子散射的改进模型 < 引入粒子散射与透明度调节的改进模型

确定兴趣区与非兴趣区分界面的相关研究很多, Gordon 等<sup>[14]</sup>提出了一种半自动调节的光学模型, 结合了粒子光强、一阶与二阶导数来综合识别分界面; Joe 等<sup>[15]</sup>将粒子模型由一维、二维扩展到了多维。但随着变量的增多, 计算的复杂度也呈幂级数增长, 因此这两种方法均很难实现交互体绘制。在本文的改进模型中, 由于引入粒子散射效应后分界面更易于分离, 因此只需要较少维数的变量即可实现较好的透视效果。前面指出  $a = \exp[-\int_0^s \tau(t) dt]$

表示体元不透明度, 只与光强  $I(s)$  有关, 而梯度是改进模型中判断分界面的重要依据之一, 因此将改进模型中的梯度信息引入透明度函数, 则  $a[I(s)]$  变成了  $a[I(s), \nabla I]$ 。这时的透明度函数只是一个简单的二维函数, 由于引入梯度的透明度函数对边界的识别能力更强, 结合改进模型, 便可较好的实现对数据场内兴趣区的透视。改进模型中粒子梯度的计算结果可直接用于透明度函数, 因此也无需进行额外的计算, 对交互速度的影响也较小。另外, 为了便于用户的交互调节, 还需确定交互参数作为接口。由于这时的透明度函数不但依赖于粒子本身的密度, 还要考虑该点梯度的大小, 因此假设某兴趣区的灰度范围在  $a, b$  之间, 用体数据函数可表示为  $I(x) \subset (a, b)$ , 令非兴趣区的透明度为  $k, 0 < k < 1$ , 则

$$a = \begin{cases} 1, & [I(x) \subset (a, b)] \cap (\nabla I < \text{threshold}) \\ k, & \text{other} \end{cases}, \quad (19)$$

这样通过动态地调节  $k, a$  和  $b$  这三个交互参数, 代入改进模型的(17)式, 较不考虑散射因素的方法能呈现出更好的透视效果, 从而达到对体数据不同组织透明度交互调节的目的。

## 4 实现方法

为了更快地实现三维数据场的直接体绘制, 目前常用的方法是利用硬件加速的三维纹理技术来实现大数据量下的交互体绘制<sup>[8~16]</sup>。由于该方法中计算量最大的三次线性插值可通过硬件来实现, 所以有效地加快了体绘制的速度。基于三维纹理的体绘制是用一系列等间距的切片来表示规则三维数据

场的, 这也与我们光学模型中将数据场假设为薄片吻合<sup>[9]</sup>。当切片的数目满足采样定理时, 便可表示出整个三维体数据。在规则的矩形数据场中, 由于三维像素阵列是规则排列的, 如图 1 所示, 在切片序列保持平行的前提下, 沿任意方向对体数据切割, 切片上的像素均能保持分布均匀, 这也满足模型中假设粒子在材质中均匀分布的条件。

基于三维纹理的方法最终生成的三维图像是利用多个切片来合成的, 而每个切片可以看作第一节所述粒子模型中厚度为  $\Delta s$  的薄片。在光线穿过每个薄片时, 要实现三维数据场中体元的内散射效果, 需要得到光线与切片的交点, 再由交点处的  $I(s)$  计算出该点的散射光, 依据改进光照模型, 将散射光通过(13)式累加到光线中, 就可在一定程度上提高内部体元的光强, 从而使得该模型能更清晰地观察内部兴趣区。在实际应用中, 粒子的光强是通过数据场中像素的灰度来确定的, 光线投射与切片序列相交处均可视作模型中的粒子。最终的三维模型是通过很多条光线投射而成的, 对于某一条光线, 若发起处粒子密度为  $I_0$ , 按照从后向前的投射顺序, 实现过程为:

$$I = I_0; \nabla I(i) = a(0);$$

for( $i = 1; i < N; i++$ );  $N$  为切片数

利用切片  $i$  与边界盒交点找对应的三维纹理坐标;  
三次线性插值得到粒子原始光强  $I(i)$  和梯度  $\nabla I(i)$ ;

依据  $\nabla I(i)$  和  $I(i)$  确定透明度  $a(0)$ ;

计算  $I = I \cdot a(i) + [k(i) + k(i-1)a(i-1)]a(i)$ ;

读取颜色表后获取相应的 RGBA 值;

其中光线经过体元时的散射和内散射信息是根据(15)式在各个采样点计算求得的。由于粒子  $i-1$  的梯度和光强在上次计算中已经获得, 所以光线投射到粒子  $i$  时, 只简单地使用上次的结果就可以了, 也无需重复计算, 所以对绘制速度的影响不大。

如第 3 节所述, 可利用(19)式导出的调节参数对粒子透明度进行调节, 使得透视过程中分界面的识别更为清晰。为突出显示效果, 实验中只显示了数据内部的两张切片, 见图 3。在相同的透视条件下, 改进后兴趣区的透视效果更为清晰, 分界面更为明显, 从而也证实了改进的有效性。

基于三维纹理体绘制的特点之一就是可以利用显卡硬件来实现光线投射过程中粒子密度、梯度的插值计算, 这样就大大加快了绘制的速度<sup>[17]</sup>。剩下的计算量就集中在光线投射时透射及散射光强的计



算上。我们将光照计算在另一线程中进行,并且为每个采样点的光学属性提供一个专门的存储区以切片矩阵的形式进行存取。从流程图可知,计算出每个采样点的光学属性后需要拷贝到切片纹理内存中,支持三维纹理的显卡硬件通常都优化了从像素内存到纹理内存的拷贝过程,从而避免了不必要的

拷贝操作。虽然这样不可避免地加大了系统资源的开销,但是为了获得一个客观的速度,这样的折中的方法有时候是必要而且有效的。此外,由于引入了梯度算子,因此需要在三维纹理体绘制之前对数据加入一些预处理,来计算改进模型中需要的一些信息如梯度、光强计算的中间量等等。

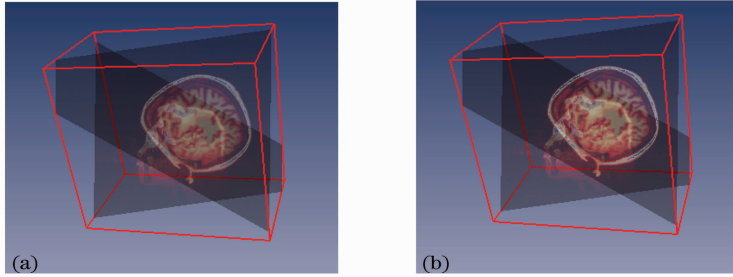


图 3 透明度对透视效果影响的比较。(a)传统光照模型;(b)改进光照模型

Fig. 3 Comparison between different perspective effects considering opacity factors.

(a) Traditional light model; (b) reformed light model

### 5 实验及讨论

我们利用两组完整的体数据进行了实验,一组是  $256 \times 256 \times 256$  的人脑 CT 数据,一组是  $256 \times 256 \times 256$  的人脑 MRI 数据。为了更好地看出改进模型的效果,这两组数据均是未进行任何人工处理的原始数据。所用操作系统 Windows XP,处理器为奔腾 IV 3.0G,内存 1G,显卡为支持三维纹理的 ATI Radeon X600,显存大小 256M,VC6.0 结合 Opengl 库完成编程。

在 CT 数据组中,利用改进前后的不同光学模型来透视隐藏于皮层下的颅骨,如图 4 所示,在相同的

透视条件下,改进后的模型较传统的模型能更清楚的突出颅骨。为了评价改进模型对兴趣区细节的透视效果,我们同样对 MRI 数据组中的脑部组织进行了透视。图 5 是改进前后不同的脑部透视效果图:从图中可以看出,在改进模型下,可以清楚地看到脑部分界面的沟回,透视质量明显改善。而图 4 和图 5 中的 (b)、(c)图分别是在不同的散射率下的改进模型效果,可以看出,改变粒子的散射率系数或入射的光强可以提高透视质量。这正是因为在原有模型的基础上引入了内散射模型,使得分界面随着散射光的增强而更为明显的结果。

表 1 不同模型下的体绘制帧率比较

Table 1 Frame-rate Comparison of direct volume rendering in different models

	traditional /(f/s)	reformed (low scatter)/(f/s)	reformed (high scatter)/(f/s)	color code	transparency
CT dataset	32f	24	22	Rainbow	0.03
MRI dataset	33	21	22	Metal	0.05

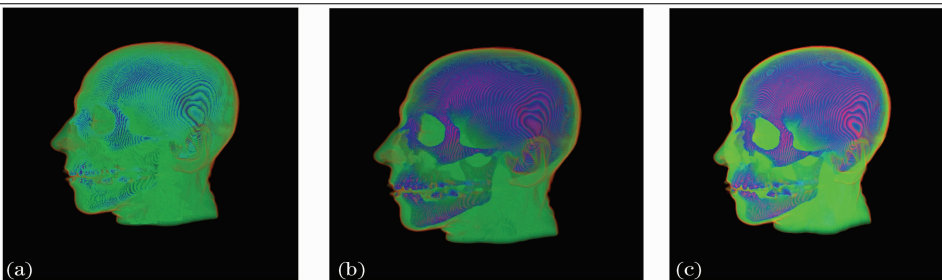


图 4 CT 数据直接体绘制结果 (a) 传统光照模型 (b) 散射率较低的改进光照模型;(c) 散射率较高的改进光照模型

Fig. 4 samples of direct volume rendering with CT data. (a) Traditional light model; (b) reformed light model with a lower diffusion rate (c) reformed light model with a higher diffusion rate

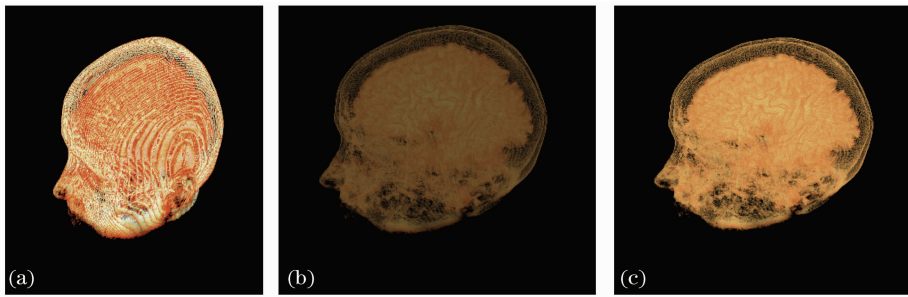


图 5 MRI 数据直接体绘制结果 (a) 传统光照模型 (b) 散射率较低的改进光照模型 (c) 散射率较高的改进光照模型

Fig. 5 samples of direct volume rendering with MRI data (a) traditional light model

(b) reformed light model with a lower diffusion rate (c) reformed light model with a higher diffusion rate

由于我们采用的体绘制方式是基于三维纹理的,这种方法的部分插值计算是利用显卡硬件实现的,所以能显著地提高绘制速度。我们在实验中对光学模型改进前后的体绘制速度进行了测定,发现改进后的绘制速度有所降低,见表 1,这是因为我们为了更好地显示兴趣区细节,加入了对分界面信息(梯度算子)以及散射光(介质本身的发光及衰减)计算的缘故

### 参 考 文 献

- 1 Yao Hongbin, He Anzhi, Wu Yinchuan *et al.*. Three-dimensional tomography of incomplete data with fusion of virtual and real experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 480~484
- 姚红兵, 贺安之, 吴颖川 等. 虚拟和真实实验相融合的三维非完全数据层析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 480~484
- 2 Marc Levoy. Efficient ray tracing of volume data[J]. *ACM Transactions on Graphics*, July, 1990, **9**(3): 245~261
- 3 Parker PS, Parker PM, Livnat PY. Interactive ray tracing for volume visualization[C]. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 2005, 1~13
- 4 Peng Yanjun, Shi Jiaoying. A method of display hide interfaces in volume rendering and its realization[J]. *Journal of Software*, 2002, **13**(9): 1887~1892
- 彭延军, 石教英. 体绘制中显示隐含分界面的一种方法及其实现[J]. *软件学报*, 2002, **13**(9): 1887~1892
- 5 Nelson, M. Optical models for direct volume rendering [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1995, **1**(2): 99~108
- 6 Joe. Kniss, S. Premoze, C. Hansen *et al.*. A model for volume lighting and modeling[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2003, **9**(2): 150~162
- 7 Williams Peter L, Max N L. A volume density optical model [A]. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH Workshop on Volume Visualization*[C]. Boston, 1992. 61~68
- 8 Krueger, W. The application of transport theory to visualization

- of 3D scalar data fields [J]. *Computers in physics*, 1991, 397~406
- 9 Brian Cabral, Nancy Cam. Jim foran accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware[C]. *ACM Symposium on Volume Visualization*, 1996. 91~98
- 10 Xiao Yongfei, Fu Yili, Wang Shuguo. An interactive optical transfer-function model for volume rendering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1503~1507
- 肖永飞, 付宜利, 王树国. 一种可交互的体绘制光学传递函数模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1503~1507
- 11 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[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1004~1010
- 12 Wittenbrink C, Malzbender T, Goss M. Opacity-weighted Color Interpolation for Volume Sampling [A]. In: Arie Kaufman, Proc. of. *ACM Symposium on Volume Visualization 1998*[C]. Research Triangle Park, NC. New York: ACM Press, 1998, 135~142
- 13 Cai Wenli, Shi Jiaoying. Composed volume rendering model based on transfer equation [J]. *Chinese J. Computers*. 1995, **18**(5): 330~338
- 蔡文立, 石教英. 基于输运方程的混合式体绘制模型[J]. *计算机学报*, 1995, **18**(5): 330~338
- 14 Gordon Kindlmann, James Durkin. Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering [C]. *IEEE Symposium on Volume Visualization*, 1998, p79~86
- 15 Joe Kniss, Gordon Kindlmann, Charles Hansen. Multidimensional transfer functions for interactive volume rendering[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2002, **8**(3): 270~285
- 16 U. Cullip, U. Neumann. Accelerated Volume Reconstruction with 3D Texture Hardware[R], UNCTech Report TR93-0027 (1993)
- 17 Steven Bergner, Torsten Moller, Mark S. Drew. *et al.*. Interactive spectral volume rendering[J]. *IEEE visualization*, 2002, 101~108