

基于纹理映射与 Phong 光照模型的 体绘制加速算法

张尤赛 陈福民

(同济大学计算中心, 上海 200092) (华东船舶工业学院电子与信息系, 江苏镇江 212003)

摘要 为了提高体绘制速度, 提出了一种基于纹理映射、具有 Phong 光照效果的体绘制加速算法. 该算法是根据 Phong 光照模型, 利用一单位球面来仿真相同光照绘制条件下的每一个体素的反射光强, 首先形成一个以法线矢量为索引值的反射光强查寻表, 再应用窗值变换的加速算法来计算体素的不透明度; 然后采用纹理映射的方法将体素光强值与由不透明度组成的 3D 数据集从物体空间投射到观察空间, 再沿视方向融合为 3D 图象. 实验表明, 这种 3D 旋转的明暗修正保证了体绘制中 3D 旋转几何变换的多视角观察的交互速度. 由于该算法综合了体绘制软件算法数据处理与纹理映射硬件加速的优点, 并用 2D 纹理映射与融合的方法实现了体数据的 3D 重建, 因而不仅降低了对计算机硬件与软件环境的要求, 而且在目前通用个人计算机上即可获得近似实时的交互绘制速度和良好的 3D 图象品质. 据研究, 该算法同样适用于 3D 纹理映射的体绘制方法.

关键词 计算机图形学(520·6030) 体数据 体绘制 纹理映射 Phong 光照模型 窗值变换

中图法分类号: TP391 TP445-39 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)09-1048-07

Accelerated Volume Rendering Using Texture Mapping with Phong Shading

ZHANG You-sai, CHEN Fu-min

(Center of Computer, Tongji University, Shanghai 200092)

(Department of Electronic Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang Jiangsu 212003)

Abstract An accelerated algorithm of volume rendering with Phong shading based on textures mapping and blending is presented. In the light of Phong illumination model, an unit spherical surface under the same shading environment as the actual volume rendering is employed to emulate the real reflectional light of per-voxel, and a look-up table of voxels' reflectional lights indexed in their normal N is made, on which the illumination of per-voxel may be quickly ascertained. Volumetric Data window transform modulated by voxel's gradients is used to compute per-voxel opacity. The data set composed of all voxels' illuminations (RGB) and opacities is projected from object space into view space by textures mapping, and is blended from back to front along view direction into 2D image with 3D vision effect. Matrix transform of degree rotation of 3D object is used in observing in different viewing directions, and a fast equivalent method of shading correction about it is brought forward to improve its interaction speed in volume rendering process. The excellence of data processing software and texture mapping hardware of volume rendering is colligated in the algorithm. It is experimented by using 2D textures mapping and blending in general personal computers. High-quality images may be produced at nearly interactive speeds. The algorithm may be also applicable for volume rendering based on 3D texture mapping.

Keywords Volumetric data, Volume rendering, Textures mapping, Phong illumination model, Window transform

基金项目: 上海市科学技术发展基金项目资助(015115045)

收稿日期: 2003-01-27; 改回日期: 2003-04-21

0 引言

由于体绘制通常需要遍历体数据(Volumetric Data)场中的每一个体素(Voxel),这不仅数据处理量巨大,而且在改变外部光照参数或视角时,还意味着几乎需要对所有数据进行重新计算,因此,绘制速度一直是体绘制方法中所面临的一个最主要的问题.长期以来,体绘制技术的研究都是在生成图象质量、绘制速度以及系统性价比之间寻求优化方案.目前,绘制速度接近或达到实时性的体绘制技术主要有高度优化的软件算法、3D 纹理映射硬件(3D Textures Mapping Hardware)加速技术和设计专业的体绘制硬件系统等3种实现途径.

其中,高度优化的软件算法通常是以牺牲一定的图象质量为代价来换取绘制速度的,而且需要预先进行数据计算和额外的数据存储.尽管剪切-曲变(Shear-warp)算法是当前最快的体绘制软件算法之一,它在150MHz的R4400单处理器上经过65s的数据预处理后,其绘制 $256 \times 256 \times 225$ 体数据可以达到1.1Hz的绘制速度,但是这种数据预处理,在需要动态改变光照参数或体数据时,将会阻碍绘制的实时性.

3D 纹理映射的硬件加速技术是先将体数据转换为3D纹理,然后利用平面纹理重采样的方法来抽取平行于像平面的纹理平面,再通过融合来生成3D图象.但是直到目前为止,这种方法仍受限于具有3D纹理硬件支持的图形图象工作站、多处理器并行计算机,以及专业图象图形卡的性能(包括纹理的融合与插值精度、纹理显存空间)等硬件指标和开发软件的功能.

体绘制专业硬件系统的设计是近年来提出的新技术^[5],由于它涉及到软件算法的硬件实现以及超大规模集成电路设计与制造等技术工艺,因此目前真正得以实现的实际体绘制系统并不多,而且在通用性上也有一定的限制.

本文提出一种基于纹理映射与融合、具有Phong光照效果的体绘制加速算法,该算法综合了体绘制软件算法数据处理与纹理映射硬件加速的优点,并利用2D纹理映射与融合的方法实现了体数据的3D重建,其不仅降低了对硬件与软件环境的要求,而且在目前通用个人计算机(PC)上,即可以以近似实时交互的绘制速度重建出高品质的3D图象.该算法由于采用了Phong光照模型,因此可以

任意设置外部环境光、漫射光、镜面光的光强,以及光源方向、视角和材质镜面指数等参数;而据此设计的Phong明暗处理加速算法,由于运用依据视角和光源方向的多分辨率球面反射光查寻表,因而有效地提高了3D明暗渲染速度,该方法还可以任意地旋转重建的3D物体,并可作明暗修正处理,以便进行各种角度的观察、3D解剖与缩放.

1 基于纹理映射的体绘制流程

基于纹理映射的体绘制流程如图1所示.

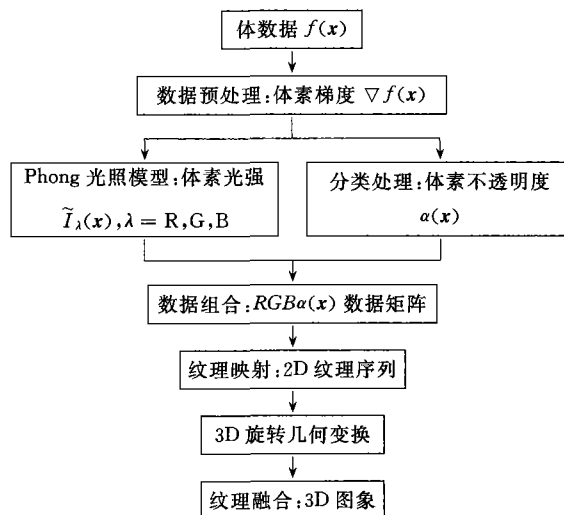


图1 基于纹理映射的体绘制流程

首先对体数据进行预处理,求出每一个体素的梯度矢量 $\nabla f(x)$,该步骤在整个体绘制过程中只需进行一次,可以采用离线的方法预先计算,并可作为体数据的一部分用于加速绘制;接着将该部分的输出梯度矢量矩阵作为Phong光照模型的输入来产生所有体素的光强 $\tilde{I}_\lambda(x)$, $\lambda=R,G,B$;与之并行的另一个步骤是通过对体数据进行简单分类来获得每个体素的不透明度(Opacity) $\alpha(x)$;然后将由这两个步骤生成的体素光强与不透明度合成为 $RGB\alpha(x)$ 格式的图象数据矩阵,再映射为2D纹理序列,并投射到观察空间;最后利用体绘制的光学模型式(1)^[6],以正交于视的像平面,按从后向前的次序将2D纹理序列融合为3D图象.

$$I_z(D) = I_{\text{Back}} \exp \left(- \int_0^D \tau(t) dt \right) + \int_0^D \tilde{I}_\lambda(s) \exp \left(- \int_0^s \tau(t) dt \right) ds \quad (1)$$

$$T(s) = \exp\left(-\int_0^s \tau(t) dt\right) \quad (2)$$

$$\alpha(s) = 1 - T(s) \quad (3)$$

式中, $I_s(D)$ 为视线上从背景到 D 处所有遍历的体素融合后的综合光强, D 为在视方向上与背景的正交距离, I_{Back} 为背景光强, $\tau(t)$ 为视线行程 t 处体素的光吸收系数, $\tilde{I}_\lambda(s)$ 为为视线行程 s 处体素的光强度, $T(s)$ 为视线行程上从 0 到 s 区间内体素的透明度, $\alpha(s)$ 则为视线行程上从 0 到 s 区间内体素的不透明度。

2 体绘制的 Phong 明暗处理

从式(1)可以看出, 体绘制需要考虑视线上所有体素的反射光 $\tilde{I}_\lambda(s)$ 对整幅 3D 图象的贡献. 本文采用 Phong 光照模型对每一个体素进行明暗渲染.

2.1 Phong 光照模型

Phong 光照模型是将表面某点的反射光分解为环境光、漫射光和镜面光等 3 种光反射分量. 单光源的 Phong 光照模型可表示为

$$\tilde{I}_\lambda(x) = k_{\text{Amb}} I_{\text{Amb}} + k_{\text{Diff}} I_{\text{Diff}} (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_{\text{Spec}} I_{\text{Spec}} (\mathbf{V} \cdot \mathbf{P})^m \quad (4)$$

$$\mathbf{P} = 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})\mathbf{N} - \mathbf{L} \quad (5)$$

式中, k_{Amb} 、 k_{Diff} 和 k_{Spec} 分别为 x 点的环境光、漫射光和镜面光的反射系数, I_{Amb} 、 I_{Diff} 和 I_{Spec} 分别为光源的环境光、漫散光和镜面光光强, \mathbf{N} 为 x 点表面的单位法线矢量, \mathbf{L} 为 x 点指向光源的单位矢量, \mathbf{V} 为 x 点指向视点的单位矢量, \mathbf{P} 为 x 点镜面反射方向单位矢量, m 为 x 点的镜面指数, $\tilde{I}_\lambda(x)$ 为 x 点的反射光强, 符号“ \cdot ”代表矢量的内积运算.

对于方向光源, 由于矢量 \mathbf{L} 与 x 点的位置无关, 因此在体绘制的视角(矢量 \mathbf{V})已确定时, 式(4)可以写成关于点 x 法线矢量 \mathbf{N} 的方程:

$$\tilde{I}_\lambda(\mathbf{N}) = \tilde{I}_{\text{Amb}}(\mathbf{N}) + \tilde{I}_{\text{Diff}}(\mathbf{N}) + \tilde{I}_{\text{Spec}}(\mathbf{N}) \quad (6)$$

式中, $\tilde{I}_{\text{Amb}}(\mathbf{N})$ 、 $\tilde{I}_{\text{Diff}}(\mathbf{N})$ 和 $\tilde{I}_{\text{Spec}}(\mathbf{N})$ 分别对应于式(4)中 x 点的环境反射光、漫射反射光和镜面反射光分量, 即 $\tilde{I}_{\text{Amb}} = I_{\text{Amb}} \cdot k_{\text{Amb}}$. 这里, 单位法线矢量 \mathbf{N} 可以近似地用该点的体数据的梯度矢量 $\nabla f(x_i)$ 来表示

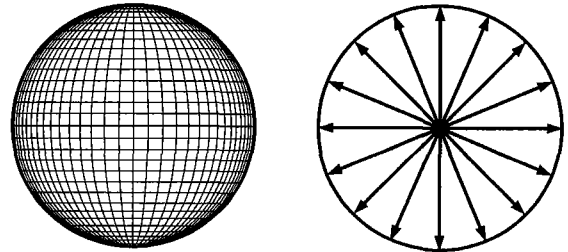
$$\mathbf{N}(x_i) \approx \frac{\nabla f(x_i)}{\|\nabla f(x_i)\|} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \nabla f(x_i) \approx & [f(x_{i-1}, y_j, z_k) - f(x_{i+1}, y_j, z_k), \\ & f(x_i, y_{j-1}, z_k) - f(x_i, y_{j+1}, z_k), \\ & f(x_i, y_j, z_{k-1}) - f(x_i, y_j, z_{k+1}),] \end{aligned} \quad (8)$$

这里, $x_i = [x_i, y_i, z_i]$, 下标 i 为整数, 其增减表示 x_i 点依次在 x 、 y 、 z 轴方向上的相邻点.

2.2 体绘制 Phong 明暗处理的加速算法

从式(6)可以看出, 在平行光源和视角确定的情况下, 体素的光强度可由其单位法线矢量 \mathbf{N} 确定, 但是, 如果在实际绘制时, 每一个体素的光强均按式(6)进行一次计算, 则会严重降低绘制的速度. 为此, 这里提出了一种基于球面体反射光强度查寻表的明暗加速算法, 该算法的设计思想是使用一单位球面体在相同光源和视角的绘制条件来仿真体数据法线矢量集所产生的反射光强, 以形成一个以单位法线矢量 \mathbf{N} 为索引值, 且综合了光源的环境光、漫射光和镜面光的反射光强查寻表(Look-up Table, LUT). 在实际体绘制时, 每一个体素均以其单位法线矢量 \mathbf{N} 为索引, 通过查寻该表来直接获得其反射光的强度. 这里, 单位球面体可根据指定的法线矢量的精度(如角度分辨率), 按经纬度的形式分割成若干小的矩形面片, 其球心与每个矩形角的连线即为该点的法线矢量, 如图 2 所示.



(a) 分割为若干矩形面片的球面体 (b) 剖示球面体的法线示意图

图 2 用球面体仿真体素反射光强

利用球面坐标(见图 3), 法线 $\mathbf{N} = [N_x, N_y, N_z]$ 可表示为

$$\begin{cases} N_x = \cos\theta \cdot \sin\varphi \\ N_y = \sin\theta \\ N_z = \cos\varphi \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(N_y) & \theta \in [-\pi/2, \pi/2] \\ \varphi = \arctan(N_x/N_z) & \varphi \in [-\pi, \pi] \end{cases} \quad (10)$$

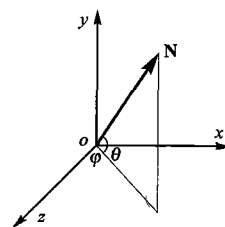


图 3 球面坐标示意图

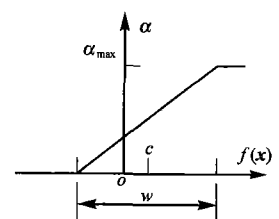


图 4 体数据与不透明度的关系

在法线矢量的角度分辨率 β 确定后,反射光强查寻表数组 $\bar{I}(m,n)$ 的寻址空间可表示为

$$\begin{cases} m = (\varphi + \pi)/\beta & m \in [0, 2\pi/\beta] \\ n = (\theta + \pi/2)/\beta & n \in [0, \pi/\beta] \end{cases} \quad (11)$$

在法线矢量角度分辨率 $\beta = 0.5^\circ$ 的情况下,对于 $256 \times 256 \times 113$ 的体数据,采用该加速算法,可以使式(6)的明暗计算量减少大约 28.6 倍.且随着体数据量的增大,该算法的加速效果愈加明显.

3 体数据的分类

体数据的分类处理是为了给每一个体素确定一个不透明度,以使体数据可以用式(1)融合为具有 3D 视觉效果 2D 图象,以便最终显示在屏幕上.体数据分类处理的方法很多,如利用各种图象分割算法,或干脆不进行分类处理(即为所有的体素指定相同的不透明度)而直接进行绘制等.

通常,由于不同物体或其内部的不同结构,其密度是不相同的,而体数据的值与体素的密度则存在正比或反比的关系,如 DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine)医学体数据,因此,可以依据该体数据值来对体素进行简单的分类.依此原理,还可以采用下述窗值变换的方法来计算每个体素的不透明度.

3.1 体数据的窗值变换

所谓窗值变换是指通过设定数据观察窗口,将窗口区域内的体数据线性地变换到不透明度的值域内,而对低于或高于窗口上下限的体数据则分别设置为最小或最大的不透明度值.图 4 为窗值变换的体数据值与不透明度的关系图,式(12)为窗值变换公式,符号 $f(x)$ 为体数据值, α 为不透明度, α_{\max} 为不透明度的最大值, w 为窗宽, c 为窗位.

$$\alpha(x) = \begin{cases} 0 & f(x) < c - \frac{w}{2} \\ \frac{\alpha_{\max}}{w} \left(f(x) + \frac{w}{2} - c \right) & c - \frac{w}{2} \leq f(x) \leq c + \frac{w}{2} \\ \alpha_{\max} & f(x) > c + \frac{w}{2} \end{cases} \quad (12)$$

3.2 窗值变换的加速算法

窗值变换的加速算法是根据体数据的极值以及窗值变换的窗值按式(12)来构造一张体素不透明度查寻表,如图 5 所示,表中不透明度设为 0~255 级(0 表示完全透明,255 表示完全不透明).查寻前,首先将查寻表的数据指针指向表中对应于体数据值为零

的表格,这样每个体素的不透明度可将其体数据值作为查寻表数据指针的偏移量,然后即可采用直接查表的方法获得.利用该算法,可以将式(12)的计算范围从整个体数据集缩小到体数据的值域内,每个体素的不透明度只需一次指针取数操作即可获得.

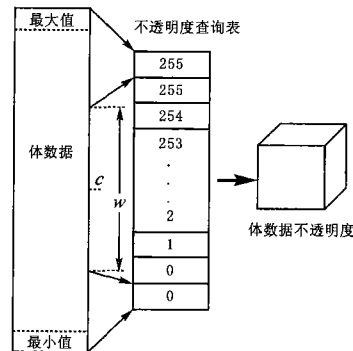


图 5 窗值变换加速算法示意图

另外,为了增强面的绘制效果,还可以用体素的梯度 $\nabla f(x)$ 来对式(12)进行调制,最终即得到每个体素的不透明度:

$$\alpha(x) = \begin{cases} \|\nabla f(x)\| \cdot \alpha(f(x)) & \text{作梯度调制} \\ \alpha(f(x)) & \text{无梯度调制} \end{cases} \quad (13)$$

4 3D 旋转几何变换

4.1 3D 旋转矩阵

为了从不同的角度对 3D 物体进行观察,特别是体数据的初始方向不适合作为 3D 重建的视角时,需要对重建的 3D 物体作 3D 旋转几何变换.这种 3D 旋转的几何变换可等效为物体绕过原点的某一单位矢量轴作一定角度的旋转.设该单位矢量轴用 w 表示,且沿矢量正方向观察时顺时针旋转的角度为 φ ,则 3D 旋转的几何变换可以采用下述 3 个步骤来完成:

- (1) 使用旋转矩阵作 $R_{w,z}$ 几何旋转,使得矢量轴 w 与 z 轴重合;
- (2) 使用矩阵 $R_z(\varphi)$ 完成绕 z 轴的 φ 角旋转;
- (3) 作步骤(1)的逆旋转,使矢量轴回到其原始位置.

为了得到旋转矩阵 $R_{w,z}$,可以利用任意 3D 旋转的复合矩阵 R 的正交性质^[7].设

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & 0 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & 0 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

此矩阵右上角的 3×3 子矩阵为正交阵, 其行元素形成的列矢量可由矩阵 R 分别映射为 x 、 y 和 z 轴上的单位矢量组

$$R \cdot \begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{1,2} \\ r_{1,3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, R \cdot \begin{bmatrix} r_{2,1} \\ r_{2,2} \\ r_{2,3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, R \cdot \begin{bmatrix} r_{3,1} \\ r_{3,2} \\ r_{3,3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

利用上述 3D 旋转复合矩阵 R 的正交性质, 可以考察由单位矢量轴 w 定义的局部坐标系(如图 6 所示), 并建立下列正交单位矢量组:

$$\begin{cases} w = [w_x, w_y, w_z]^T, w_x = [w_x, 0, 0]^T \\ v = \frac{w \times w_x}{|w \times w_x|} = [v_x, v_y, v_z]^T \\ u = v \times w = [u_x, u_y, u_z]^T \end{cases} \quad (16)$$

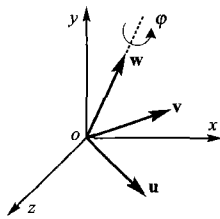


图 6 w 矢量定义的局部坐标系

利用式(16)中的 3 个正交矢量可以构成旋转矩阵 $R_{w,z}$, 如式(17)所示. 因为该矩阵将单位矢量 u 、 v 和 w 分别映射到 x 、 y 和 z 轴上, 所以矢量 w 与 z 轴对齐.

$$R_{w,z} = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z & 0 \\ v_x & v_y & v_z & 0 \\ w_x & w_y & w_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

绕 z 轴作 φ 角的顺时针旋转可以由矩阵 $R_z(\varphi)$ 完成.

$$R_z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

最后还需将矢量轴变回到原来的位置, 这可用旋转矩阵 $R_{w,z}$ 的逆矩阵 $R_{w,z}^{-1}$ 来完成. 至此, 就可以得到绕 w 轴作 φ 角顺时针 3D 旋转的矩阵

$$R_w(\varphi) = R_{w,z}^{-1} R_z(\varphi) R_{w,z} \quad (19)$$

4.2 3D 旋转的明暗修正

由式(7)、式(8)可知, 体数据的单位法线矢量 N 是按体数据的初始方向(Original Orientation)来计

算的. 由于 3D 重建物体作 3D 旋转以后, 其重建物体的每一个体素的实际单位法线矢量也作了相应的旋转, 因此, 为了对 3D 重建物体进行正确的明暗渲染, 必须对体数据的初始方向上的单位法线矢量 N 也作相同的旋转操作. 但是, 其庞大的体数据法线矢量集, 将使式(19)的矩阵计算难以满足实时绘制的要求.

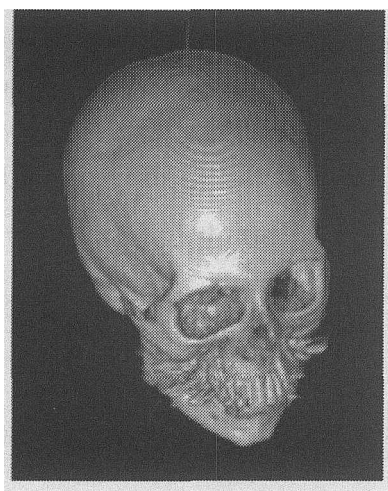
考察光照模型式(4)、式(5)可以发现, 由于漫反射光和镜面反射光本质上是分别与光源矢量和法线矢量、视矢量和镜面反射方向矢量的夹角的余弦有关, 因此, 可以采取保持体数据单位法线矢量 N 不变(在第一次打开体数据文件时计算一次), 而采用仅对光源矢量 L 和视矢量 V 作相反的角度旋转的方法来等效对体数据法线矢量集进行式(19)的矩阵计算. 由于只需对 L 、 V 两个矢量进行式(19)的逆运算, 因此不仅大大简化了 3D 旋转后的明暗处理, 而且提高了交互的速度. 此时的矩阵计算可用式(19)的逆矩阵来表示

$$R_w^{-1}(\varphi) = R_{w,z}^{-1} R_z^{-1}(\varphi) R_{w,z} = R_{w,z}^{-1} R_z(-\varphi) R_{w,z} \quad (20)$$

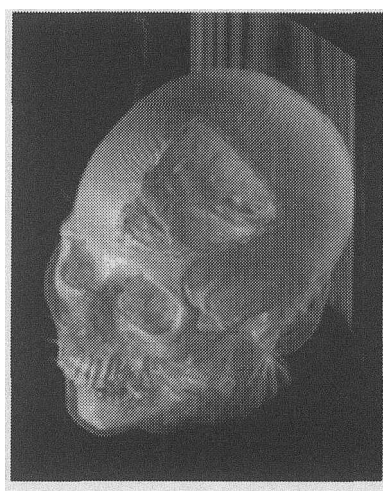
5 绘制实例分析

这里, 将文中提出的体绘制加速算法应用于计算机 X 射线断层投影(Computer Tomography, CT)、核磁共振(Magnetic Resonance, MR)医学体数据的 3D 重建. 图 7 是用本文算法重建的人体头部 CT 序列 3D 图象, 图 7(a)、(b)是在不同的窗值(窗位, 窗宽)、观察视角和光源参数下(最大光强值为 255), 由人体头部的不同组织构成的 3D 图象, 从图 7(b)绘制的人的面部中, 可以清楚地看出半透明的绘制效果, 另外, 同时还采用纹理切割的方法对头部的左前额进行了 3D 解剖; 图 8 是 MR 体数据的 3D 重建图象, 图 8(b)是图 8(a)的 3D 解剖图象. 通过对上述两图的观察可以发现, 在重建图象(图 7)人的头顶部位和图 8 人脸的侧面存在着圆型或树纹型的条纹, 这是由 CT、MR 扫描方向上图象序列的层间距(这种层间距通常比层内像素距离要大得多)在人体曲率较大的部位引起的几何失真所造成的, 而减小这种几何失真的一种方法是在体绘制前对体数据进行层间插值.

表 1 给出了用本文体绘制算法进行 3D 重建的时间数据. 表中的梯度计算, 由于只需在打开体数据文件时计算一次, 其常可作为体数据 3D 信息的一部分, 因此这里未计入 3D 重建时间内; 表中的 3D

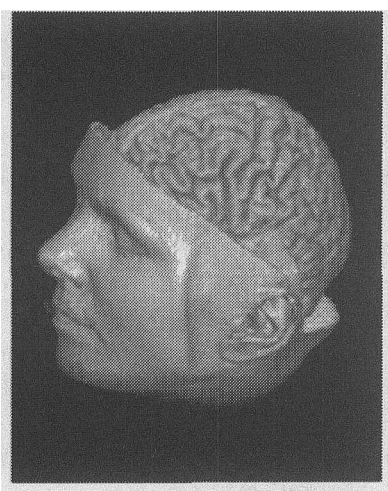


(a) 窗值(1600,1000),视角 30° ,法线角度分辨率 0.352° ,光源的环境光强20,漫射光强150,镜面光强120,镜面指数10.

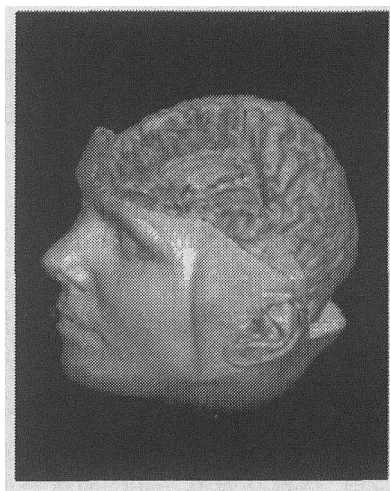


(b) 窗值(1700,1000),视角 -60° ,法线角度分辨率 0.352° ,光源的环境光强20,漫射光强150,镜面光强80,镜面指数10.

图7 利用本文算法在不同窗值,不同视角和光源参数下重建的CT序列头部3D图象



(a) 窗值(30700,3750),视角 25° ,法线角度分辨率 0.352° ,光源的环境光强20,漫射光强150,镜面光强250,镜面指数10.



(b) 图8(a)的解剖图象

图8 利用本文算法重建的MR序列大脑3D图象

表1 数据处理与3D绘制时间

体数据	尺寸(体素)	梯度计算 时间	3D重建时间		
			明暗	分类	绘制
CThead	$256^2 \times 113$	4.67	0.630	0.820	0.110
MRbrain	$256^2 \times 109$	4.88	0.625	0.990	0.110

单位:s

实验环境:P4 2G/GeForce2/64M, VC++6.0/OpenGL1.0;
测试参数:3D图象绘制尺寸 655×655 pixels,梯度角度分辨率 0.352° .

重建时间主要包括基于 Phong 光照模型的明暗渲染(计算体素的光强)、体数据的分类处理(计算体素不透明度)、3D 旋转几何变换以及纹理的映射与融合等绘制步骤的时间. 尽管体素的光强与不透明度

可以并行计算(如图1所示),但在本实验的个人计算机上并未具体实现,表中的时间测量数据可以作为并行处理效果的参考. 从表中统计的3D重建时间数据可以看出,体数据的分类占用了相对较长的时间,这是由于在式(13)中要对每一个体素作梯度调制(作一次乘法)的原因.

实验表明,本文提出的体绘制加速算法具有以下优点:

(1) 算法简洁,可以达到近似实时交互的绘制速度. 利用单位球面体来仿真体素的反射光和体数据的窗值变换等加速算法,使得可以简单快捷地获得每一个体素的反射光强与不透明度.

(2) 3D 重建的图象逼真、质量高. 由于在利用 Phong 光照模型时, 同时考虑了光源的环境光、漫射光、镜面光成分和材质属性等因素, 因此使光照的明暗效果逼真、富有层次感;

(3) 观察方便、灵活. 利用 3D 旋转几何变换, 不仅可以方便地旋转 3D 重建物体, 即可以以任意视角和光照参数进行观察, 而且还可以任意设定法线矢量的角度分辨率, 以使用不同分辨率的球面体仿真体素的反射光强来进行不同精度的体绘制;

(4) 适应性强. 由于充分利用了现有显卡 2D 纹理映射硬件的加速性能, 因此可以在当前通用个人计算机上实现文中的体绘制性能. 实验结果表明, 该算法的适应性强, 可以直接移植到基于 3D 纹理映射的体绘制方法中.

6 结束语

目前, 体绘制技术在医学、地球物理、原子结构分析和流体动力学等方面已得到了很多的应用, 特别是在现代医学领域, 由于利用体绘制技术进行的医学图象的三维重建, 可以直观地显示出人体及其内部组织的三维信息, 因此在医疗诊断、放射治疗和外科手术等方面具有重要价值. 然而, 目前医学图象的 3D 重建大多局限于 CT、MR 等医疗影像设备的专用图象图形工作站上, 而基于 PC 的体绘制技术实现则很少见诸报道. 可以预见, 随着 PACS (Picture Archiving and Communication System) 系统的推广应用, 必然会对基于 PC 的体绘制技术提出各种实际应用需求.

实验表明, 本文提出的基于纹理映射与 Phong 光照模型的体绘制加速算法, 较好地满足了这种应用要求. 由于该算法兼顾了体绘制软件算法数据处理与纹理映射硬件加速的优点, 因而不仅降低了对硬件与软件环境的要求, 而且在目前个人通用计算机上可以以近似实时交互的速度重建出高品质的 3D 图象. 可以预见, 随着计算机软硬件技术的发展, 体绘制技术达到真正的实时绘制的要求已为时不远, 并将得到更加广泛的应用.

此外, 将图象分割应用于体绘制中, 还可以对物体不同的组织结构进行三维重建. 由于图象分割本身仍是一个尚未完全解决的问题, 因此, 如何将两者有机地结合起来, 以达到理想的三维重建效果, 将是一个很有应用前景的课题, 值得作进一步的研究.

参考文献

- 1 Lacroute P, Levoy M. Fast volume rendering using a shear-warp factorization of the viewing transformation[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH' 94[C], Orlando, Florida, USA, 1994: 451~458.
- 2 Lacroute P. Analysis of a parallel volume rendering system based on the shear-warp factorization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1996, 2(3): 218~231.
- 3 Cabral B, Cam N, Foran J. Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware [A]. In: Proceedings of 1994 Workshop on Volum Visualization [C], Washington, DC, USA, 1994: 91~98.
- 4 Dachille F, Kreeger K, Chen B *et al.* High quality volume rendering using texture mapping hardware[A]. In: Proceedings of 1998 Eurographics/ SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware[C], Lisbon, Portugal, 1998: 69~76.
- 5 Pfister H, Hardenbergh J, Knitte J *et al.* The VolumePro real-time ray-casting system[A]. In: Proceedings of 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1999: 251~260.
- 6 Max N. Optical models for direct volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995, 1 (2): 99~108.
- 7 Hearn D, Baker P M. 著, 蔡士杰等译. 计算机图形学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 305~312.



张尤赛 1959 年生, 1991 年获东南大学信号、电路与系统专业硕士学位, 现为华东船舶工业学院电子与信息系副教授, 硕士生导师, 同济大学计算机应用技术专业在职博士生. 主要研究方向为计算机图象处理与三维可视化.

陈福民 1944 年生, 同济大学计算机系教授, 博士生导师, 上海多媒体行业协会会长. 主要研究方向为虚拟现实、网络多媒体、计算机图象处理与三维可视化.