

基于MC的医学三维等值面的平滑与归并

谢小棉 李树祥 江贵平 周猛

(第一军医大学医学图像处理全军重点实验室, 广州 510515)

摘要 为了提高医学三维图象的重建效果和速度, 在对用于构造等值面的MC(Marching Cubes)算法进行分析的基础上, 提出了对等值面进行三维空间方向平滑和多边形法向归并的方法. 等值面方向平滑的方法就是将等值面分解为一个三维坐标场和一个法向矢量场, 然后对其法向矢量场作矢量平滑处理; 而等值面的多边形法向归并则是根据适当的门限值, 将原来由大量小三角面片构成的等值面归并成由较少的多边形面片构成的等值面. 实验结果表明, 该方法能显著改善三维重建的效果, 并能提高三维绘制的速度.

关键词 MC算法 等值面 方向平滑 多边形法向归并

中图分类号: TP391.41 R445-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)08-0806-04

Smoothing and Merging of Medical Isosurface Based on MC Algorithm

XIE Xiao-mian, LI Shu-xiang, JIANG Gui-ping, ZHOU Meng

(PLA key lab for medical imaging, The first military medical university, Guangzhou 510515)

Abstract Based on the detailed analysis of MC(Marching Cubes)algorithm which is widely used for extracting Iso-surface from volume data filed, this paper presents a new method for 3D reconstruction and visualization: directional smoothing and polygonal merging on the extracted iso-surface. The directional smoothing method decomposes the Iso-surface into a 3D coordinate field and a vector field, and then performs a smoothing process in this vector field. By vector field smoothing, the reconstructed results and the rendered anatomical details are greatly improved. The method of Iso-surface merging is analyzed in this paper. According to correct merging principles and threshold value, this method transforms the triangle-composed iso-surface into polygon-composed iso-surface, and it can greatly speed up the 3D rendering process without impairing reconstruction fidelity and anatomical details. A modified approach of 3D reconstruction and rendering is presented in this paper, which can improve the results of 3D reconstruction, and at the same time, speed up the 3D rendering process.

Keywords MC, Isosurface, Directional smoothing, Polygonal merging

0 引言

三维重建与显示技术(3D Reconstruction)在医学领域有着重要的应用价值,也是实现颅脑、脊柱等外科手术可视化的基础,因此,人们一直在寻求更好的方法和途径,使其既能提高人体解剖结构三维重建的效果,又能提高在微机上进行三维旋转等交互显示的速度.由于医学可视化在很多情况下,更关心的是解剖结构和病灶部位的外形轮廓特征,所以,以

MC算法为代表的面绘制技术在医学上有着广泛应用. MC算法是由 Lorensen 和 Cline 于 1987 年提出的一种移动立方体(Marching cubes)算法^[1]. 采用 MC 算法,可以在给定阈值的情况下较好地提取任意三维体数据场的等值面,尤其适合医学体数据场的情形,但此时的三维重建与显示过程有两个缺点:①由于构成等值面的三角面片的位置与方向容易受体数据场的噪声影响,因此三维显示图象的可视性较差,而且容易产生伪象;②三角面片的数量过多,其中,包含了大量冗余信息,从而三维绘制的时间过

基金项目:国家自然科学基金资助(No. 39970918)

收稿日期:2000-03-21; 改回日期:2000-08-30

长,所以,用传统的MC算法进行三维重建与交互显示,其结果仍不能满足医学应用所要求的重建效果和交互速度.本文在MC算法的基础上,在基于体数据场的三维重建与显示过程中,采用了等值面的方向平滑与多边形法向归并的方法,从而显著改善了三维重建的效果,并提高了三维绘制的速度.

1 MC算法简介

MC算法是一种进行等值面构造与显示的方法,它适用于任意不规则、非线性体数据场.此算法以体数据场中由相邻最近的8个体元所构成的立方体为最小等值面搜索单元,并根据每个立方体单元各个顶点的情况来决定该立方体单元内部等值面的构造形式,同时,MC算法还用三角形面片作为等值面的最小构成单位,来逼近等值面的真实情形.

MC算法的准则是:对体数据场任意两个相邻的体元,如果其中一个体元的体数据值大于或等于等值面阈值,同时另一个体元的体数据值小于等值面阈值,那么这两个相邻体元之间必定有等值面通过;反之,它们之间无等值面通过.

MC算法适用于同一立方体单元内部有多个等值面通过时的情形.如图1所示,图1(a)为体数据场中任取的一个立方体单元,用小圆球表示的顶点体数据值大于或等于等值面的阈值,其余顶点的体数据值小于等值面的阈值;图1(b)为此立方体单元内用三角形面片逼近等值面的情形(其中有两个等值面通过).根据实际验证,虽然不同的立方体单元在构造等值面时是彼此独立进行的,但实际上所产生的等值面是统一的、关联的.

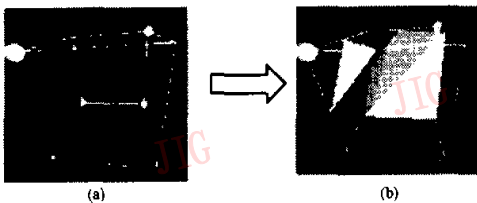


图1 MC算法在一个立方体单元内构造等值面的情形

2 等值面的方向平滑

2.1 等值面的法向量计算

采用MC算法从体数据场中提取给定阈值的

等值面,得到初始的等值面为 $\Omega_0: \{(t_i, N_{t_i}) \mid i=1, 2, \dots, N\}$,其中, N 为构造等值面的三角面片总数; N_{t_i} 为三角面片 t_i 的单位法向量.设 P_i 为等值面上由任意三角面片 t_i 的3个顶点矢量 a, b, c 构成的三维坐标阵

$$P_i = \begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \\ y_a & y_b & y_c \\ z_a & z_b & z_c \end{bmatrix}$$

设 $R(P_i)$ 为三角面片 t_i 到其单位法矢量的变换函数,则三角面片 t_i 的单位法向量为

$$N_i = R(P_i) = \frac{(b-a) \times (c-a)}{\|(b-a) \times (c-a)\|} \quad (1)$$

2.2 等值面的矢量场平滑

由MC算法重建出图象,其三维显示结果可视性和清晰度往往不够理想.对于任意立方体单元,其内部的三角形面片的位置与方向极容易受到体数据场中噪声的干扰,从而导致三维显示结果出现“鳞状效应”.为了得到理想的等值面平滑效果,应将等值面分解为一个三维坐标场和一个法向矢量场,通过对等值面法向矢量场的矢量进行平滑处理,得到了满意的平滑效果与平滑速度^[2].

按照OpenGL三维图形库的浓淡绘制的光照模式^[3,4],得

$$Color(t) = E_{\text{物质}} + A_{\text{光源}} \times A_{\text{物质}} + \sum_{i=0}^m \alpha_i [A_{\text{光}} \times A_{\text{物质}} + (L_i \cdot N_i) \times D_{\text{光}} \times D_{\text{物质}}] \quad (2)$$

其中, E 为自身发光因子, A 为环境光因子, D 为漫反射光因子, L_i 为三角面片 t_i 到光源的位移单位矢量, N_i 为三角面片 t_i 的法向单位矢量.考虑到三维重建与显示的实际效果,这里忽略了镜面反射光因子的影响.对于等值面上的任一三角面片 t_i ,当光照参数不变时,就可以得到它的三维绘制结果 $Color(t)$,它是关于 L_i 与 N_i 的函数.

将原等值面 $\Omega_0: \{(t_i, N_{t_i}) \mid i=1, 2, \dots, N\}$ 分解为一个等值面的三维坐标场 $M(\Omega_0): \{t_i \mid i=1, 2, \dots, N\}$ 和一个等值面的法向矢量场 $V(\Omega_0): \{N_{t_i} \mid i=1, 2, \dots, N\}$.根据光照模式(式(1)),对等值面上的法向矢量场 $V(\Omega_0)$ 作平滑处理.假设搜索出的任意三角面片 t_0 在其等值面邻域里的三角面片分别为 t_1, t_2, \dots, t_n ,它们对应的法向矢量为 $N_{t_1}, N_{t_2}, \dots, N_{t_n}$,对 $N_{t_0}, N_{t_1}, \dots, N_{t_n}$ 求矢量均值 N'_{t_0}

$$N'_{t_0} = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n N_{t_k} = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n R(P_{t_k})$$

$$= \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n \frac{\langle \mathbf{b}_{ik} - \mathbf{a}_{ik} \rangle \times \langle \mathbf{c}_{ik} - \mathbf{a}_{ik} \rangle}{\| \langle \mathbf{b}_{ik} - \mathbf{a}_{ik} \rangle \times \langle \mathbf{c}_{ik} - \mathbf{a}_{ik} \rangle \|} \quad (3)$$

按上述方法遍历等值面上原法向矢量场 $V(\Omega_0)$ 的所有元素,得到平滑后的等值面法向矢量场 $V'(\Omega_0): \{N'_i | i=1, 2, \dots, N\}$, 则原等值面 Ω_0 就变为 $\Omega_1: \{(t, N'_i) | i=1, 2, \dots, N\}$. 等值面方向平滑方法并不改变原等值面上三角面片的坐标位置,而是根据光照模型的浓淡绘制原理,通过提高等值面上三角面片法向矢量之间的连续性与相关性来取得三维绘制的平滑效果。



图2 等值面方向平滑前后的绘制结果对照

3 等值面的多边形归并

对等值面的方向平滑完成后,下一步就可对平滑后得到的等值面 Ω_1 进行多边形法向归并处理,其基本步骤如下:

(1)确定最佳归并门限值 T ,使其符合以下要求:能够最大程度地减少等值面的冗余信息;将不损失三维绘制的轮廓细节。

(2)对平滑后的等值面 Ω_1 作多边形归并处理,将等值面上的三角面片 t_i 归并到与其相邻接的多边形面片 p 的条件是:

$$F(N_p, N_{t_i}) = \|N_p - N_{t_i}\| < T \quad (4)$$

(3)遍历等值面 Ω_1 的所有元素,得到最后符合要求的等值面 $\Omega_2: \{(p_i, N'_{p_i}) | i=1, 2, \dots, M\}$, 其中, p_i 为归并后等值面上的多边形面片, M 为多边形面片的数量,且 M 远小于 N .

采用多边形归并方法后,等值面的三维绘制以归并后的多边形面片为最小绘制单位,绘制的多边形面片数量将大大少于原来的三角面片的数量,从而提高了三维绘制的速度(表1)。另外,由于多边形归并在算法上以相邻接的三角面片的法向矢量差作为归并考虑因素,其在适当选取归并门限值 T 的情况下,可以较好地保留原等值面上方向变化较大的轮廓细节,因而在显著加快绘制速度的同时,又具有较好的三维绘制效果。

表1 $T=0.015$ 时,等值面多边形法向归并前后数据对照 (在 P I 233 微机上实现)

体部	体数据	CT扫描层厚 (mm)	解剖结构	归并前		归并后	
				三角形面片数量	绘制时间(s)	三角形面片数量	绘制时间(s)
颅脑	93×256×256	2	骨骼	565 580	6.2	535 28	0.42
			皮肤	764 022	6.5	622 53	0.49
骨盆	103×264×227	2.5	骨骼	336 328	4.3	266 75	0.23

4 改进后的三维重建与交互显示模式

将以上前处理过程中最后得到的等值面 $\Omega_2: \{(p_i, N'_{p_i}) | i=1, 2, \dots, M\}$ 传递给交互显示过程。因为交互显示过程中的每次三维绘制都是对 Ω_2 进行的操作,所以等值面的平滑与归并过程是在前处理过程中一次完成的。交互显示过程中的每次三维绘制过程不再进行等值面的平滑与归并处理。改进后的三维图象重建与交互显示模式如图3所示。

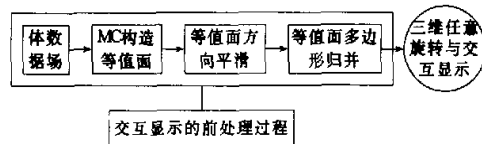


图3 改进的三维图象重建与交互显示模式

5 实验结果与分析

本文在 P I 233 微机上,用 Visual C 语言和

OpenGL 三维图形库,对人体颅脑与盆骨两组体数据进行了编程实验.图 4 是从系统交互中提取的部分三维显示结果.从实验结果可见,采用等值面的方向平滑和多边形法向归并方法对 CT 扫描断层序列

图象进行三维重建的效果得到了显著改善,并较好地去除了噪声和伪象,细节清晰度与真实感明显提高,同时加快了交互显示的速度.



图 4 用本文方法重建的三维图象

参 考 文 献

- 1 Lorensen William E, Cline H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm. *Computer Graphics*, 1987, 21(4):163~169.
- 2 Xu Chenyang, Pham Dzung L, Rettmann Maryam E *et al.* Reconstruction of the human cerebral cortex from MRI. *IEEE, Transactions on Medical Imaging* 1999, 18(6):467~479.
- 3 Donald Hearn, Baker M Pauline. *Computer Graphics*. 北京:清华大学出版社, 1997.
- 4 Woo Mason, Neider Jackie, Davis Tom *et al.* *OpenGL programming guide*. USA: Addison-Wesey Developers Press, 1997.



李树祥 教授,博士生导师.1963 年毕业于哈尔滨工业大学,1982~1985 年留学美国,现任全国医学图象学会理事长,曾获国家科技二等奖及国家发明奖多项.主要研究领域为医学图象技术与生物医学工程.



江费平 第一军医大学医学图象处理全军重点实验室助理研究员,主要研究方向为计算机辅助外科.



谢小棉 1972 年生,1993 年获第一军医大学学士学位,现为第一军医大学医学图象处理全军重点实验室博士研究生.主要研究方向为医学图象处理与外科手术可视化.



周 猛 副教授,主要从事模式识别与科学计算可视化方面的研究.