

基于分类体数据的四面体网格剖分算法

杨晓松 申皓 唐泽圣

(清华大学计算机科学与技术系软件所, 北京 100084)

摘要 虚拟内窥镜手术是以真实病人的 CT 或者 MRI 扫描数据为基础, 首先通过组织分割, 在计算机内部建立起三维模型, 然后通过虚拟现实技术来模拟内窥镜手术全过程的一项技术。其中, 人体器官的三维网格建模是该技术中一个十分重要的部分。为了准确地进行人体器官三维网格建模, 在对二维体数据进行组织分割的基础上, 提出了一种由分类体数据直接建立三维四面体网格的方法。由于 Delaunay 三角剖分所产生的网格质量比较高, 所以该方法沿用逐点插入算法的思想, 以特征点的提取和 Steiner 布点为基础来生成四面体网格, 并通过组织边界的判定准则和利用 flip 操作来恢复组织边界。实践证明, 该方法所生成的网格具有自适应的网格密度。

关键词 四面体剖分 Delaunay 三角剖分

中图分类号: TP391.41. R445-39 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)09-0865-06

Segmented Volume Based Tetrahedralization Algorithm

YANG Xiao-shong, SHENG Hao, TANG Zhe-seng

(Dept. of Computer Science and Technology Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Virtual endoscopy is a new method of diagnosis using computer processing of 3D image datasets (such as CT or MRI scans) to provide simulated visualization. In order to obtain a physically realistic surgery simulation, it is needed to generate the accurate 3D human organ meshes for finite element analysis (FEA) to simulate serials of actions in the surgery. In this paper, a new algorithm is proposed to create the tetrahedral mesh directly from the segmented volume. Because Delaunay triangulation guarantees the well-shape of the final mesh. We follow the idea and classify our method as an incremental insertion algorithm in Delaunay triangulation category. It is composed of three phases: placements of mesh vertices, Delaunay triangulation and restore of tissue boundary. The tissue boundary contained in the original dataset is kept accurately by the featured point selection. An automatic self-adaptive method is presented to vary the density of mesh nodes according to local features of the segmented volume. The adaptive model generated has the attributes of accurate, small scale and well-shaped which is very suitable for complete 3D finite element solvers.

Keywords Tetrahedralization, Delaunay triangulation

0 引言

虚拟内窥镜手术的数据来源于真实病人的 CT 或者 MRI 扫描切片图象, 而这些互相平行的扫描切片图象组成了一个长方体形状的体数据, 而且不论是在二维扫描图象上面或者直接三维体数据中进行组织分割, 最终得到的也是一个标示了不同组织属性的体数据。图 1 给出了一个简单的分类体数据的

二维切片图象, 其中只包含了两种不同的组织。

在分类体数据上面建立四面体网格通常有两种方法, 其中, Interval volume tetrahedralization^[1]属于第 1 种方法, 该方法是将每一个体素按照等值面分割成许多小的四面体, 因为四面体的尺寸小于体素, 其产生的网格通常都非常大, 难于满足有限元计算的要求, 所以通常都需要通过后处理来简化网格; 另一种方法^[2]是首先在每个体素中生成等值面, 然后把该等值面作为三维 Delaunay 四面体剖分的约束

面,最后采用带约束的 Delaunay 剖分方法来生成三维四面体网格,图2给出了在上述分类体数据中生成等值面的二维切面图,这种方法的优点是组织边界得到了准确的保留,但由于等值面过于细碎,因此通常在四面体剖分之前需要对面片数据进行简化.可是对于相邻组织的边界紧贴在一起的情况,面片简化则往往会造成边界面的相交或分离,而且在3种组织交界的体素中,Marching Cube 算法无法生成正确的等值面,为此,本文提出了一种基于分类体数据的四面体网格剖分方法.

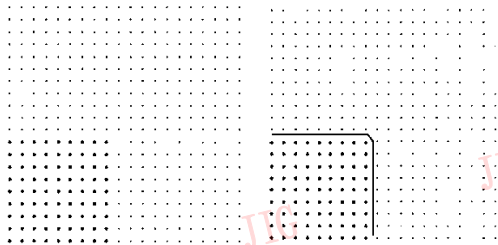


图1 分类体数据的二维切层 图2 分类体数据中等值面的二维切面图

(图中不同灰度的点分别代表不同组织)

本文所提出的方法与上述两种方法都不同,但是它同第2种方法一样,能很好地保留组织边界.

1 基于分类体数据的四面体网格剖分算法

由于 Delaunay 方法产生的网格在网格质量上优于其他方法,所以本文仍然沿用 Delaunay 方法的思路,以逐点插入法为核心来建立四面体网格.该方法主要分为以下几个步骤:

(1) 网格点的选取 如果网格的布点工作做得比较好,那么后面的四面体剖分工作就会变得比较容易.通常情况下,布点有以下几种方法:①由规则化网格的顶点构成;②采用 Advancing front 方法由外表面一层一层逐步向内部布点;③按照一定的分布密度布点.由于布点结果的好坏直接影响最终生成的网格质量,比如说,网格密度的自适应分布,以及网格对组织边界的保持等等,因此本文主要通过粗略的规则化网格节点、特征点的选取以及组织内部 steiner 点的选取 3 步来完成布点工作.

(2) Delaunay 网格剖分 基于三维点集的 Delaunay 四面体剖分算法的核心是空球准则,即每

个单元的外接球都不包含其他节点. Delaunay 剖分方法自从 20 世纪 80 年代开始研究以来,至今已经有了很大的发展,目前比较行之有效的 Delaunay 剖分方法有逐点插入法、边交换方法等等.其中,逐点插入法的实施过程是,先将一个节点插入到先前已经产生的三角化网格中,然后删除外接球中包含插入点的单元,以便形成空腔,最后将空腔的边界与新插入的节点相连,以形成新的单元;另一种比较常见的方法为边交换法,它是先从输入点集的任意四面体剖分开始,然后通过单元边的交换,以得到满足 Delaunay 准则的网格.本文首先采用逐点插入法来进行输入点集的 Delaunay 剖分,再通过边交换来恢复组织边界.

(3) 恢复组织边界以及设置单元组织属性 由于基于空洞原则形成的四面体网格,并不能够保证蕴藏在分类体数据中的组织边界,因此本文主要通过 3 种基本的交换操作来恢复组织边界;对于每个单元的组织属性,特别是当单元位于不同组织边界时,是很难加以判断的,而本文则是通过计算单元形心的属性来加以判断.

1.1 布点

在进行四面体网格剖分时,所采用的输入点集主要分为特征点、steiner 点和规则化网格节点 3 类.

其中,特征点包含了那些代表不同组织几何形状的体素边界节点,这种特征点主要用于使生成的网格与组织边界相匹配;Steiner 点位于组织内部,主要是负责网格密度的自适应变化;规则化网格节点主要是用来解决在体数据比较庞大时,易产生插点错误的问题.

1.1.1 特征点

本文算法中最重要的概念就是特征点.所谓特征点是具有以下属性的点:

- (1) 位于体数据网格的边界上;
- (2) 在邻域内没有相同的梯度值.

图3给出了图1所示分类体数据中的特征点.通常情况下,特征点正是那些经过简化之后的等值面的边界顶点.虽然基于这些特征点,采用 Delaunay 的逐点插入法就可以生成一个简单的四面体网格,但是这样生成的四面体网格的质量通常都不是很好,特别是在那些与特征点相邻比较近的区域,往往会生成比较细长的四面体.

特征点的选取需要经过以下 3 步操作:

- (1) 计算所有体素边界中点的梯度值;
- (2) 在邻域内,比较是否有相同的梯度值存在;

(3) 基于误差估计的特征点简化.

在分类体数据中,有 $x+0.5, y+0.5, z+0.5$ 3 类边界的中点,由于它们分别位于与 x, y 和 z 坐标轴相平行的体素边界上,因此可以通过相邻两个体素顶点的线性插值来求出边界的中点梯度值.为了得到位于体数据边界面上的特征点,可将体数据在

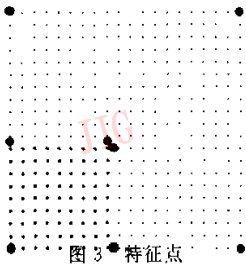
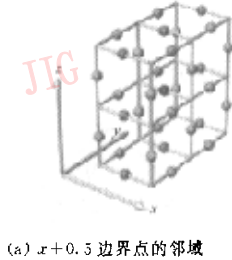
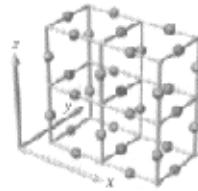


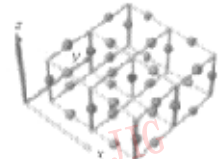
图 3 特征点



(a) $x+0.5$ 边界点的邻域



(b) $y+0.5$ 边界点的邻域



(c) $z+0.5$ 边界点的邻域

图 4 边界的中点所要比较的邻域点

在等值面简化时,通常都需要定义一个误差范围.这里通过定义一个全局误差上限来限定特征点的简化.如果两个特征点具有如下属性,则这两个点可以合并为一个点:

- (1) 两个点在图 4 所示的邻域之内;
- (2) 两个点所标志的是相同的两种组织的边界;
- (3) 两个点的梯度差值在误差范围之内.

1.1.2 Steiner 点的布置

一般,四面体网格可以首先直接用上述的特征点来生成,然后用一定的网格优化算法来提高网格的质量,但是通常情况下,由于这样生成的网格质量非常差(图 5),因此需要经过多次操作来不断地提高网格质量,以达到满意的标准,但是由于这样很难控制网格密度的自适应变化,因此本文提出一种在组织内部布点的方法,以便得到一个比较好的布点效果.

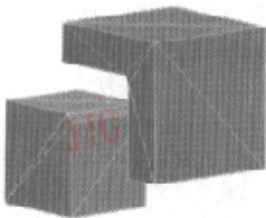


图 5 基于特征点的 Delaunay 剖分

同时应在整个体数据中定义一个全局的密度函数.这个函数是以离散的方式存在于每个体素顶点和特征点上面.本文采用离散点的插值方法来求得各个体素顶点的密度值,即首先为每一个特征点定义一个密度值,且该值与其到最近特征点的距离成

每个边界面上向外延伸一层.该层的组织属性设定为一个不存在的组织标号.

在邻域内,比较边界的中点梯度值时,应该比较所有相关的边界中点,如图 4 所示.如果一个边界的中点在邻域内没有相同的梯度值,则将点取为特征点.

正比,而对于其他所有的体素顶点 P ,则可以根据下式来求得该点的密度值:

$$D(x, y, z) = \sum_{k=1}^n D_k \cdot \frac{\prod_{j \neq k} d_j(x, y, z)}{\sum_{k=1}^n \prod_{j \neq k} d_j(x, y, z)} \quad (1)$$

其中, D_k 为 P 点邻域内各点的密度值; d_j 为邻域内各点到 P 点的距离.

为了在组织边界上不产生比较狭长的单元, steiner 点的布置应该采用以下顺序进行:

- (1) 12 个体数据边界棱;
- (2) 位于 6 个体数据边界面上的组织边界;
- (3) 位于 6 个体数据边界面上的其他区域;
- (4) 内部的组织边界;
- (5) 体数据中的其他部分.

对于每一个体素顶点,如果以该点为球心,以该点的密度为半径的球内没有其他点存在,则该点被选出,并加入顶点队列,作为下一步生成四面体网格的输入点集.

图 6 给出了在如图 1 所示的分类体数据上布点的过程.图中只给出了二维切面上的布点过程.

1.2 恢复组织边界

虽然逐点插入法生成的网格质量比较好,但是该方法无法保证蕴涵于体数据中的组织边界在四面体网格中依然存在.为了解决这个问题,提出了一种基于单元边的检验准则以及边界的恢复算法.

1.2.1 单元边跨越边界的检验标准

可以根据坐标,将所有顶点分为如下两类:

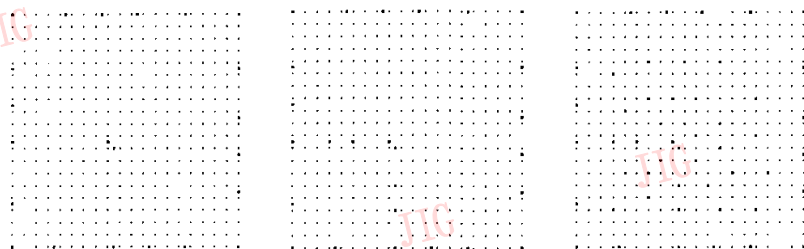


图 6 在二维切面上布点的过程

(1) 边界顶点(BP) 在这些顶点的坐标中,存在非整数项;

(2) 体素顶点(VP) 顶点的坐标全为整数.

根据顶点的标记,可将所有单元边分为如下 2 类:

(1) VP-VP 在这种情况下,只需要检查两个顶点在原分类数据中的组织属性是否相同,如果不同,则该边跨越组织边界.

(2) BP-VP 和 BP-BP 在这种情况下,实际上很难判断该边是否跨越了组织边界,但是由于特征点和 Steiner 点的布点原则,致使组织边界上的密度要高于组织内部,所以通常情况下,这种单元边是不会跨越组织边界的.

1.2.2 组织边界恢复

组织边界的恢复方法采用的是与边交换相同的思想,只是这里共有边界边单元的数目往往要多于 3 个. 边界恢复可以采用如下 3 个步骤:

(1) 找出所有包含边界边的单元;

(2) 在上述单元中,分离出构成新单元的顶点和面;

(3) 对剩下的顶点和面进行重新连接,以构成新的单元.

图 7 给出了恢复组织边界的过程,其中,跨越组织边界的单元边为 P_1P_2 .

但是当图 7 所示的截面多边形是凹多边形时,上述的方法并不能生成正确的网格,而图 7 仅仅给出了凸多边形的情况.

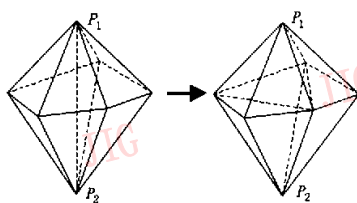


图 7 组织边界的恢复过程

为了解决这个问题,给出了基于 flip23, flip32, flip4Diagonal (如图 8 所示) 3 种基本交换操作的边界恢复方法.

但具体采用哪一种方法,主要取决于共有单元边的单元数目:

(1) 当共有单元边为 3 个单元时,则采用 flip32 来去掉边界边;

(2) 当共有单元边为 4 个单元时,则采用 flip4Diagonal 来将中间对角线边翻转过来;

(3) 当共有单元边多于 4 个单元时,对于周围的单元则通过递归调用 flip23 和 flip4Diagonal 操作,以减少围绕单元的数目,直至剩下的单元数目为 4 个或者 3 个为止.

图 9 给出了单元边跨越组织边界的示例;图 10 给出了恢复组织边界后的四面体网格.

1.3 设置单元组织属性

当所有组织边界得到恢复之后,则每一个单元的组织属性可以采用如下方法设置:

(1) 当单元中至少有一个顶点是体素顶点时,

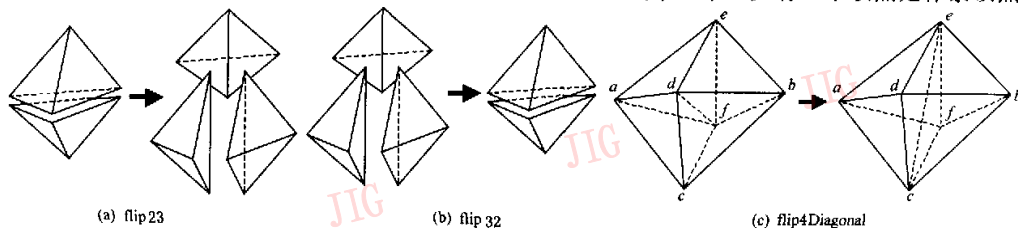


图 8 恢复组织边界的 3 种基本交换操作

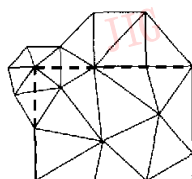


图 9 单元边跨越组织边界的示例

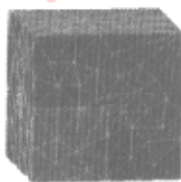
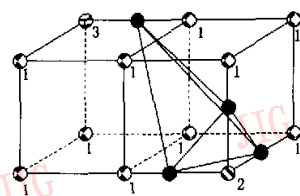


图 10 恢复边界之后的四面体网格

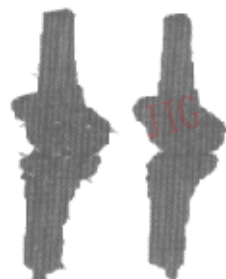
则单元的组织属性可设置为该体素顶点在原分类数据中的组织属性;

(2) 当所有单元顶点都在组织边界上时,则在单元形心所在的体素中,采用三线性插值来计算形心处的组织属性,以确定单元的组织属性.

图 11(a)所示单元的 4 个顶点都在组织边界上.如果采用 0 阶插值来选择离形心最近的体素顶点的组织属性,那么图中所示单元的组织就会被错误地设置为 2;这样在最终的四面体网格中,就会出现如图 11(b)所示的尖刺情况;如果采用高阶插值,则可准确求出形心处的组织属性,就会得到正确的结果,图 11(c)就是采用三线性插值得到的结果图象.



(a) 单元顶点位置



(b) 0 阶插值得到的四面体网格 (c) 三线性插值得到的四面体网格

图 11 设置单元属性时存在的问题

2 实验结果

本文算法已经在膝关节内窥镜手术模拟系统中得到了实现. 对于一个 1mm 间距的分类体数据(共有 $297 \times 341 \times 180 = 18\,229\,860$ 个体素),其生成的四面体网格有 94 953 个节点、490 409 个单元(如图 12 所示).

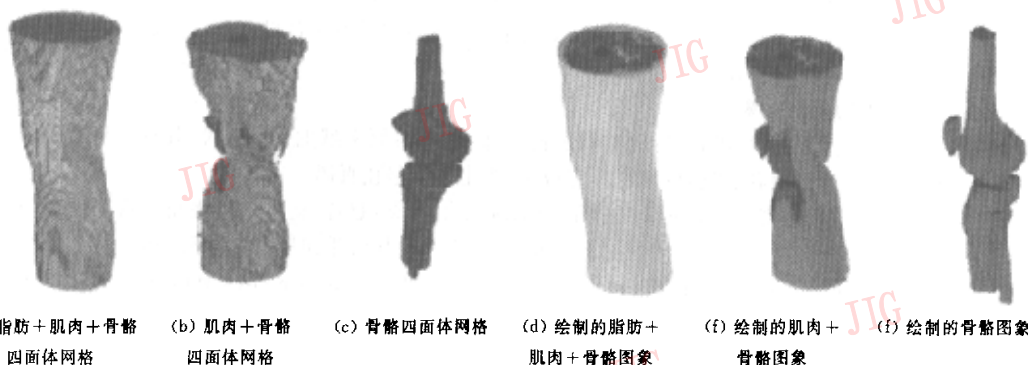


图 12 膝关节内窥镜手术模拟系统中的四面体网格模型及绘制的图象

3 结论

本文提出了一种新的四面体剖分算法. 它可以在分类体数据中,直接生成四面体网格,而且该算法可以很好自动调整网格的密度. 本文算法已经在膝关节内窥镜手术模拟系统中得到了很好的验证.

参考文献

1 Nielson G M, Junwon Sung. Interval volume tetrahedrization [A]. In: Proceedings of the 8th IEEE Visualization '97

Conference[C], Phoenix, AZ, USA, 1997:221~228.
 2 Sullivan John M, Jr, Wu Ziji *et al.* Three-dimensional finite-element mesh generation of anatomically accurate organs using surface geometries created from the visible human dataset[A]. In: The Third Visible Human Project Conference[C], Bethesda, Maryland, USA, October 5 & 6, 2000.



杨晓松 1971 年生,2000 年获工学博士学位,现在清华大学计算机科学与技术系软件所从事博士后研究工作. 研究领域为计算机图形学.



申皓 1977年生,现为清华大学计算机系博士研究生.主要研究领域为计算机图形学.



唐泽圣 1932年生,清华大学计算机系教授,博士生导师.研究领域为计算机图形学与可视化技术.

《中国图象图形学报》文后参考文献编排格式

1. 专著、论文集、学位论文、报告

[序号]主要责任者.文献题名[文献类型标识].出版地:出版者(或存放单位),出版年.起止页码.

- 1 刘国钧,陈绍业,王凤.图书馆目录[M].北京:高等教育出版社,1957:15~18.
- 2 张筑生.微分半动力系统的不变集[D].北京:北京大学数学系数学研究所,1983.

2. 期刊文章

[序号]主要责任者.文献题名[J].刊名,年,卷(期):起止页码.

- 1 金显贺,王昌长,王忠东等.一种用于在线检测局部放电的数字滤波技术[J].清华大学学报(自然科学版),1993,33(4):62~67.

3. 论文集集中的析出文章

[序号]析出文献主要责任者.析出文献题名[A].见(In):原文献主要责任者(任选).原文献题名[C].出版地:出版者(或会议地点),出版年:析出文献起止页码.

- 1 钟文发.非线性规划在可燃毒物配置中的应用[A].见:赵玮.运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集[C].西安:西安电子科技大学出版社,1996:468~471.
- 2 Middleton V, Owen M J, Elliman D G *et al.* Development in non-axisymmetric filament winding[A]. In:Proceedings of 2nd International Conference on Automated Composite'88 Noordwijkerhout[C], the Netherlands, 1988:324~335.

参考文献类型及标识

参考文献类型	专著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P

电子文献类型参考文献标识

电子参考文献类型	数据库	计算机程序	电子公告
电子文献类型标识	DB	CP	EB

载体类型标识

载体类型	联机网络	磁带	光盘	磁盘
载体标识	OL	MT	CD	DK