

# 面向心脏表面断层数据的三角网格重构方法<sup>①</sup>

黄芳 史振华 张峰 (中南大学 信息科学与工程学院 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 针对不同轮廓线提取方法对心脏断层图像提取的心脏表面轮廓线数据产生的格式不同, 研究并设计了一种通用的心脏表面三角网格重构方法。利用心脏形态和断层数据的基本特点, 将余弦值旋转排列和缓排序的方法融入三次剖分三角网格生成方法中, 实现了同步进行轮廓线点间关系的恢复与心脏表面的三角网格重建。详细阐述了其基本原理、实现策略和算法设计, 并以实验验证了方法的有效性。

**关键词:** 三角网格重构; 心脏断层数据; 三次剖分; 余弦值旋转

## Triangulation Mesh Reconstruction for Heart Surface Slice Data

HUANG Fang, SHI Zhen-Hua, ZHANG Feng

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In this paper, a general method of heart surface triangulation mesh reconstruction is studied and designed for different contour data formats from various contour extraction methods in the heart slice images process. Through utilizing the basic characteristics of the heart shape and slice data, both Cosine rotating and postponed sorting are combined with the three-subdivisions. The recovering of the relationship among contour points and reconstructing the triangular mesh is implemented simultaneously. This paper describes the basic principle, implementation strategy and algorithm design. The experiment verifies the effectiveness of the proposed approach.

**Keywords:** triangular mesh reconstruction; heart slice; three-subdivision; Cosine rotating

## 1 引言

随着计算机断层成像、核磁共振等医疗影像技术的使用和发展, 给疾病的诊断与治疗带来了巨大的变革, 这些技术为医生提供了更加丰富准确的器官组织断层图像, 断层图像三维可视化技术成为近年来一个研究热点, 也有许多成果<sup>[1-3]</sup>。在医学图像的可视化研究中, 心脏作为人体最重要的器官尤其受到重视, 在心脏医学断层图像的可视化中, 最常用的方法为切片级重构<sup>[4]</sup>, 即利用图像分割技术, 从医学图像中提取目标物体轮廓线, 然后使用三角面片拼接轮廓线, 求得物体表面的近似模拟。这种方法运算速度快, 在轮廓线间距较小时, 重构效果也较好, 因而受到广泛

应用。这类方法一般都基于对断层图像轮廓线数据集进行重构, 即所有采样点都是分层次有序排列的, 可以从其中一点直接找到在轮廓线上与之相邻的下一点。这一条件往往通过在提取轮廓线时即按一定数据结构顺序存储采样点的方法给予保证。但在实际中, 不同轮廓提取方法提取的轮廓线数据点的格式是不同的, 轮廓线数据点可能是无序存储的, 不能直接判断两点之间是否有相邻关系。因而一般的切片级重构方法不能直接有效的处理这种情况。而如果采用针对空间离散点的三角网格重构等算法<sup>[5]</sup>, 则丢弃了断层数据的可供利用的拓扑特性, 大大增加了运算量。本文针对心脏表面断层轮廓线数据, 利用最短距离的三次

① 基金项目:湖南省自然科学基金(05JJ40130);湖南省科技计划(2007FJ3069)

收稿时间:2010-01-03;收到修改稿时间:2010-02-01

剖分方法, 结合心脏本身在形态特点, 采用逐点搜索的方法, 对无序截面轮廓线数据点重构心脏表面三角网格。

## 2 相邻轮廓线三次剖分方法

三次剖分方法是一种基于最短对角线思想的轮廓线剖分方法<sup>[6]</sup>, 但它避免了不同层上数据点数需相同的限制, 可实现对任意采样点数的断层轮廓线进行表面三角网格重构, 其基本过程是: 首先选取两相邻轮廓线中数据点数较多的一条, 并依次为其中各点在另一条轮廓线上选择与之距离最短的对应点, 相互连接成剖分线段并按顺序保存, 作为第一次剖分, 如图 1 所示; 然后依次遍历第一次剖分得到的剖分线段, 按最短对角线原则在相邻且相互间无共同顶点的两剖分线段间增加新剖分线段, 作为第二次剖分, 如图 2 实线部分所示; 最后对于数据点数较少的一条轮廓线上可能存在的未参与组成剖分线段的点, 按距离最短的原则, 比较与之前后相邻的两个已处理点所在的剖分线段, 将其纳入剖分线段, 即为第三次剖分, 如图 3 实线部分所示。经过以上三次剖分, 相邻轮廓线上所有点均已参与剖分线段, 只需按顺序连接相邻剖分线段即可构成三角面网格表面。

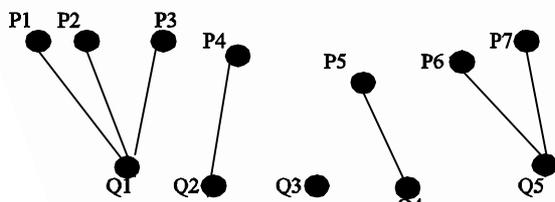


图 1 第一次剖分

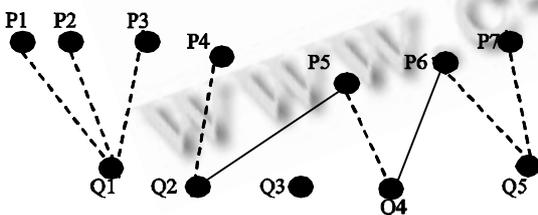


图 2 第二次剖分

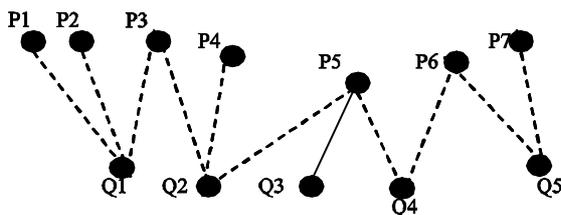


图 3 第三次剖分

采用以上三次剖分方法可以对任意点数轮廓线进行三角剖分, 但是在剖分过程中仍须满足先得同一轮廓线上各点间的邻接关系的条件。而我们为了适应不同轮廓提取方法产生的心脏断层图像轮廓线数据点格式, 三角面网格生成方法应适应于无序断层轮廓线数据点集。为此, 三次剖分方法能够在剖分的同时依据隐含的点关系搜索当前点的下一邻接点, 逐次处理, 最终完成整个轮廓线的复原和剖分。

## 3 心脏表面断层数据的特点

根据轮廓线具有很大随意性的物体的截面无序数据逐个寻找相邻点, 最终恢复原物体轮廓线形态特征较为困难, 但心脏作为人体共有的重要器官, 在形态上具有一些基本的特点, 这些特点可作为搜寻相邻点和重建其轮廓的基本依据。同时, 取得医学截面图像的获取方式自身的特点也为分析无序数据点的原有形态提供了方便。

### 3.1 心脏断层图像轮廓线

观察心脏断层图像, 可以发现心脏断层图像轮廓线具有三个基本特点: (1)轮廓线较为均匀的分布于一个矩形区域内; (2)轮廓线在整体上呈现较为平滑的曲线; (3)在局部有凹凸现象, 但凹凸部分一般较为平缓, 极少有尖锐的凹凸部。在搜索一点的邻接点时, 考虑这些特征会在准确性和效率上带来明显效益。同时, 由于医学图像截面数据均来自 CT 等采集手段, 因而数据点在某一方向上的坐标应呈现一定聚集性, 可以以此作为数据分层的依据。

### 3.2 点数据的分层及层间的关系

本文中讨论的断层图像数据点集是无序的, 必须先将其按层次分离并依层次顺序排序, 才可进行之后的处理。医学断层图像数据在某一轴方向上按层次排列, 可以直接检查所有数据点的各个坐标值, 根据坐标在轴方向上的聚集性即可获得分层的点数据, 之后按轴向坐标值的大小即可得到按相邻层顺序排列的数据点集。

## 4 心脏表面断层轮廓数据的三角网格重构

综合考虑心脏表面断层数据的特征, 在三次剖分过程中, 将表面重构和无序轮廓线数据点的重排融合起来, 实现边搜索数据点边进行三角剖分。

### 4.1 轮廓数据点排序方法

现欲对一组同层心脏截面上的无序数据点，按一定方向逐个搜索得到相邻数据点，最终将所有点重新排序，由数据点逆向还原出轮廓线形态。鉴于心脏轮廓线及数据具有的特点，考虑从一整体平滑轮廓线上按顺序提取采样点的情形，从坐标原点引一射线，从零度角开始按逆（或顺）时针旋转一周，每次与轮廓线所得交点序列即为一相互邻接的点序列，如图4所示，点P1、P2...P11即为所得轮廓线上有序点列。用此逆过程即将无序的点集按余弦值排列，则可获得基本符合原轮廓线形态的两两相邻的点的序列。

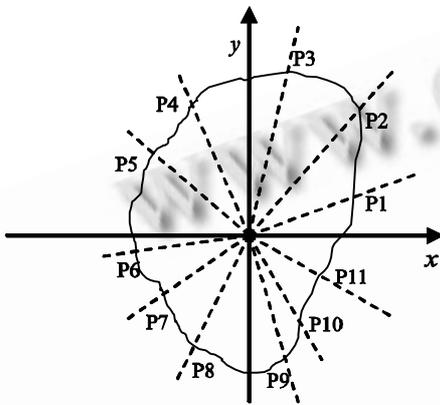


图4 按点的余弦值逆时针旋转得到点的序列

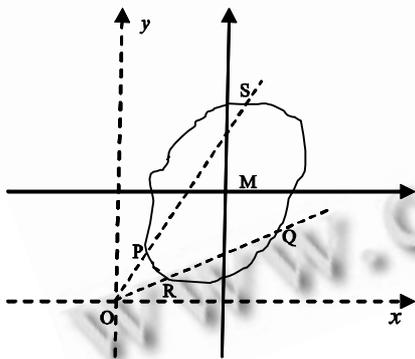


图5 所有点分布于同一象限的轮廓线和平移后的轮廓线

由于轮廓线上点的坐标来源于图像采集时的一个随机的坐标系，因此不能保证原有同一层轮廓上的点均匀的分布于坐标系四个象限中，甚至有可能整个轮廓线均处在同一象限中，此时将有数个相距很远的点相对于原点的旋转角度（余弦值）相同或相近，而事实上它们间又不存在相邻关系。如图5所示，在虚线

表示的坐标系中，P点和Q点，R点和S点都分别拥有相同余弦值，按前述方法，则P与Q，R与S将作为相邻的数据点被处理，但是由图中明显可见，由于整个轮廓线都在第一象限，实际上它们之间相差甚远，不能作为有相邻关系的点。必须先做处理，使轮廓线分布于四个象限，否则最初设想的方法不能解决问题。

平移坐标系可解决此问题，将同层数据点移动到一个新的坐标系内，使其在新坐标系内分布与四个象限中。新坐标系的原点可以取为同层数据点的闭包多边形质心。不失一般性，假设分层后同层内数据点z坐标相同，则可只考虑点的x和y坐标。于是，对轮廓线上点Pi (xi, yi)，则轮廓线质心坐标M(x,y)为

$$\begin{cases} \bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) / n \\ \bar{y} = (\sum_{i=1}^n y_i) / n \end{cases} \quad (1)$$

以M点为新坐标系原点，坐标平移后数据点Pi在新坐标系下的坐标Pi(x',y')为

$$\begin{cases} x' = x - \bar{x} \\ y' = y - \bar{y} \end{cases} \quad (2)$$

经过坐标平移后的新坐标系x'My'如图5实线部分所示，在该坐标系中，轮廓线在各象限分别较为均匀。依据以上原理，按余弦值旋转对无序数据点排序方法过程为：计算一层轮廓线上各数据点在平移坐标后相对于新坐标原点的余弦值，按其值的大小及坐标特性分别存储到代表四个象限的缓存区，并在四个缓存区中分别排序，最后按象限顺序和余弦值变化规律，对第一、第三象限数据按降序，第二、第四象限数据按升序，依次从四个缓存区输出数据，即得到按余弦值旋转排列的坐标点列。

### 4.2 凹凸部数据点排序修正方法

文中所述基本方法可以大致获得数据点间的次序关系，但是在轮廓线成在明显凹凸性时，如果仅仅利用余弦值作为判断点间相邻关系的依据，则会出现点的余弦特征与点间相邻关系不匹配的情况。而心脏轮廓线虽然在总体上大致平滑，但在局部仍然会有较平缓但明显的凹凸部分，如而不加处理，则得到的点序列可能出现与实际不符的往复的折线。如图6所示，图中P点和R点具有相同的余弦值，而Q点余弦值小于P和R，如果仅按照余弦值排序，则将产生如轮廓线段PRQ这样的折线段，这是不合理的。

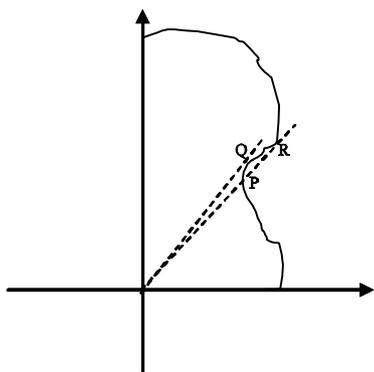


图 6 角度相同或相近的点不是相邻点

为消除这种现象造成的偏差，考虑采用一种“缓冲排序”的方法，在以余弦值作为判定值对点间顺序排序后，不直接取下一点作为邻接点，而是在此基础上考虑点间的距离关系，设置一大小固定缓冲区，用该点之后邻近的若干个填充缓冲区，从这些点中，选择距离该点最近的一个作为下一个相邻点，再将该点从缓冲区中删除。之后每次搜索，都在原缓冲区基础上将其重新填充至满，继续从缓冲区中取最近点。直至所有点都曾进入或正处于缓冲区中，则仍按距上一点最近的原则将缓冲区内所有点依次选出。仍以图 6 中情况为例，虽然点 Q 的余弦值小于 R，在开始的排序阶段将位于 R 点之后，但 R 点没有直接输出到 P 点之后，而是进入了缓存区，在之后的 Q 点等将缓存区填满之后，经过计算，得到 Q 点与 P 点距离最小，于是，不输出 R 点而输出 Q 点为 P 点的相邻点，从而纠正了原排序方法所得的错误排序结果。经多次实验也证明，在缓冲区大小适当的情况下，采用这种方法可以较好的解决局部呈较平缓凹凸时出现的点的顺序错乱问题。

综合上述由无序点集推知轮廓线上点间顺序的方法以及三次剖分方法，将剖分过程与搜索邻近点并复原轮廓线的过程同步进行，可得到一种基于基于无序心脏断层数据点的表面重构方法。

### 4.3 轮廓线数据结构

在进行心脏表面重构时将使用以下数据结构：

轮廓数据链表：为一循环链表，每个节点为该层轮廓线上一点数据点，相邻节点对应应在轮廓线上相邻关系的点。其结构如图 7 所示。

剖分线段链表：为一循环链表，每个节点为一条剖分线段。剖分线段按其端点在轮廓线上次序排列。

结构与轮廓数据链表类似。

剖分三角形链表：为一链表，其中每一节点为两条相邻剖分线段与一段轮廓线组成的剖分三角形。

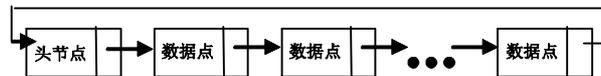


图 7 轮廓数据链表

### 4.4 心脏表面断层轮廓数据三角网格重构算法

综上所述，对无序断层数据点进行心脏表面重构，即要以三次剖分为基本方法，在第一次剖分过程中获得一组基本剖分线段，同时由无序点集获得轮廓线数据的有序点列，再利用第一步获得的结果进行第二次和第三次剖分，补充剖分线段，直至将所有点纳入剖分线段，最终得到表面三角网格。该重构方法的主要过程在于同步进行第一次剖分和对心脏轮廓线点的排序整理。为描述方便起见只考虑相邻两层轮廓线 P、Q，并假定 P 上点数多于 Q，则这一算法过程如下图 8 所示：

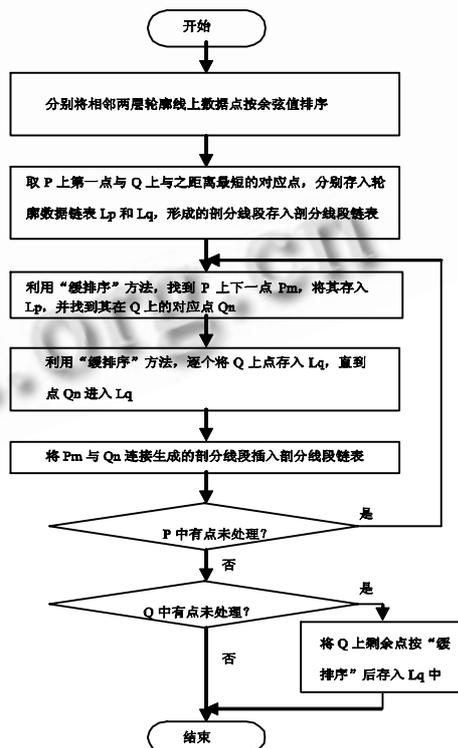


图 8 第一次剖分和对心脏轮廓线点的排序整理算法

在图 8 所示过程中，完成了三次剖分的第一次剖分，同时从原本无序的轮廓线数据点得到按邻接顺序存储的轮廓线数据链表。这一算法中为两条轮廓线各设置

一个缓存区,首先从点数较多一条轮廓线  $P$  开始,从上取得第一个点作为起点并搜索其在另一轮廓线  $Q$  上对应点,获得第一条剖分线段,而后利用缓存区,依据“缓排序”方法,在一个恰当的区间中逐个搜索下一相邻点及其在  $Q$  上对应点,同时构建轮廓线数据链表,当  $P$  上点处理完时, $Q$  上可能存在尚未得到处理的点,则继续将这些剩余的点逐个排序进入轮廓线数据点链表。算法结束时,获得一个经过一次剖分的剖分线段链表和对应于两条轮廓线的两个轮廓数据链表。

在之后的第二次和第三次剖分过程中,可以直接利用已得到的剖分线段链表和轮廓数据链表,按后两次剖分的基本方法,即能获得最终的相邻两轮廓线间的三角剖分集合。

## 5 实验

我们在 windows XP 操作系统下,以 c# 为编程语言,将一组 18 层心脏左心室 CT 断层图像的 3690 个轮廓数据点为实验对象,如图 9 所示。利用上文所述方法,重新建立点间拓扑关系,恢复出 18 条心脏外壁轮廓线,并对相邻轮廓逐次采取三角剖分,重构三角网格表面,最终建立基本三角面片 7446 个,重构结果如图 7 所示。由图 10 可见,利用本文方法,可以由无序的左心室断层截面数据点,较好的重构出左心室表面三角网格。



图 9 无序数据点的分布情况

## 6 结束语

一般来说,利用截面数据进行物体表面重建,往往要求轮廓线上数据点依照原轮廓线的拓扑特征按顺序排列,才能进行处理,对于无序的数据点,则没有针对性的方法。本文针对心脏的形态特点,尝试采用逐点搜索相邻点,同步进行三次剖分的方法重构心脏

表面,获得了预想的较满意的效果。但是,这种方法只能适用于表面轮廓较平滑,没有十分尖锐边缘的心脏等物体的轮廓复原与表面重建,如何利用无序断层数据其他的隐含拓扑特性,更广泛的适用于各类物体,需要进一步深入的研究;同时,在各层上数据点数相差较多时,出现了较明显的剖分线段束现象,可以考虑在剖分过程中同步进行插值算法进行优化,这些都是今后需作的工作。

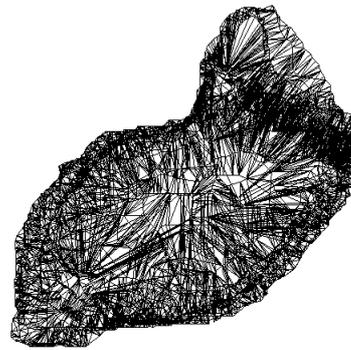
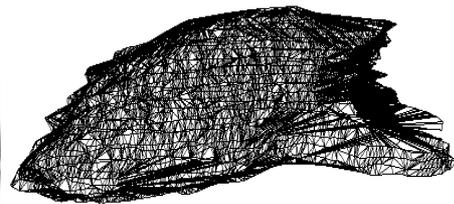


图 10 重构后的三角网格表面

## 参考文献

- 1 张泉,丁辉,王广志.基于人体断层图像的三维建模与网格剖分优化.清华大学学报,2007,47(12):2200-2203.
- 2 张宗华,彭翔等.基于 CT 的头颅骨三维表面重建.中国生物医学工程学报,2004,23(5):392-396.
- 3 毕金龙,周明全.采用 CT 切片的三角片曲面重构方法.微机发展,2005,15(12):61-62.
- 4 管伟光.体视化技术及其应用.北京:电子工业出版社,1998.
- 5 Floater MS, Reimers M. Meshless parameterization and surface reconstruction. Computer Aided Geometric Design,2001,18(2):77-92.
- 6 林志浩,姜晓峰,王鹏远.截面数据重构三角网格面算法的研究.微电子学与计算机,2007,24(3):130-132.