# 心内膜散乱点云边界点检测算法研究\*

周学礼<sup>1,2</sup>,万旺根<sup>1†</sup>

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 常熟理工学院 物理与电子工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘 要:针对心内膜散乱点云预处理中的边界点检测,利用截线云理论将散乱点云进行等间隔区域分层,将点 云投影至点云切片,得到切片的散乱点集,同时建立链表结构分区存储点云数据;由平面上点的二维坐标定位, 提出区域"十"字算法进行切片数据边界点提取,获取切片数据的最外层点,将检测到的边界点存回原始三维数 据源,完成预处理过程。实验结果证明,该算法对边界点具有较强的识别能力,能够在快速、有效地简化点云数 据的同时保持原始特征的信息,可以提高后续三维建模的精度和速度。 关键词:散乱点云;边界点;"十"字算法;点云切片 中图分类号:TP391.41 文献标志码:A 文章编号:1001-3695(2012)10-3942-03 doi;10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.091

# Efficient boundary points extraction method for scattered point cloud of endocardium

ZHOU Xue-li<sup>1,2</sup>, WAN Wang-gen<sup>1†</sup>

(1. School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. School of Physics & Electronic Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu Jiangsu 215500, China)

**Abstract**: In order to extract boundary points in the preprocessing for scattered point cloud of endocardium, this paper cut the point cloud based on slicing method to obtain the slice data and stored the slice data with list structure. In 2D space, used approximate nearest neighbor(ANN) to represent the spatial topology relationship of the scattered point cloud and to calculate the k-approximate-nearest neighbours for each data point, then it presented the crisscross-shape algorithm to locate the boundary points, and then mapped the boundary points to the corresponding boundary points in 3D space for the next processing of endocardial three-dimensional mapping system. The experimental results show that this approach has a strong ability for distinguishing boundary points, and can reduce data directly and effectively while keeping the original features, which can increase the accuracy and speed of the subsequent three-dimensional model construction.

Key words: scattered point cloud; boundary points; crisscross-shape algorithm; point cloud slicing

近几年来,在各种心律失常病例中房颤占相当的比例,病 源庞大,治疗房颤已是各大医院心内科发展的重点<sup>[1]</sup>。导管 射频消融手术能够成为当今房颤治疗的主流技术,不仅取决于 临床学者对房颤机制的研究,还取决于新型的医疗器械。它拓 展了医生的视野,使医生不通过开刀就可以看到人体内的病变 部位。世界上治疗房颤的两大主流设备有美国圣犹达公司的 Ensite<sup>[2,3]</sup>和 Biosense Webster(美国强生公司)的 Carto<sup>[4,5]</sup>。

心内膜三维标测技术集心电标测和心内膜三维模型表面 重建为一体,其最大的特点是导管接触性导航三维标测,为医 生真实直观地提供心腔三维结构图,实时显示立体心腔解剖图 及心肌活动时序;并能为医生在最短的时间内发现、消融靶点 导航,大大地缩短了医生和患者在 x 射线下暴露的时间,同时 也降低了手术复杂性和并发症,提高了手术成功率<sup>[6]</sup>。

当前国内也有相关的研究,但对于医学软件的开发大多是 基于医学图像处理和分析,只有少数研究单位开展了射频消融 手术软件的开发研究工作<sup>[7-10]</sup>,且目前并无适用于临床的系 统,对心内膜三维标测系统关键技术进行研究,具有一定的社 会意义和经济效益。

# 1 系统原理

本文是基于一个实时三维心内膜电极定位标测系统。在 患者体表贴三对电极片,每对电极片之间通过 5.68 kHz 的低 频电流,形成 X、Y、Z 三维正交电场<sup>[11]</sup>。以腔内或体表电极作 为位置参考,据此感知及定位电场内任意电极的位置以及消融 导管顶端位置、弯曲程度和运动方向并经计算机工作站处理后 显示出来。

基于电场的定位系统可以感知任何电极,包括消融导管、 普通电生理导管、冷冻消融导管等可感知电场的材质。因电场 相对封闭,受体外干扰较小,定位精度可达0.6 mm<sup>[12]</sup>。系统 会自动记录导管电极位置的数据,并由计算机利用这些数据 将心腔的几何轮廓显示出来。

医师操纵导管,使导管在被测心腔内沿着心腔壁移动, 系统则以100 Hz 左右的频率采集电压定位信号,获得导管电 极在心腔内的位置信息,当采集的心内膜位点数据足够多时, 就可用计算机重建心内膜的三维模型。一旦得到心内膜三维 模型,消融导管或标测在心腔内的三维空间位置也就可以显示

收稿日期: 2012-02-21; 修回日期: 2012-03-27 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61103076);上海市教委"电路与系统"重点学科 建设项目(J50104)

作者简介:周学礼(1979-),男,河南南阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向为计算机图形学、医学图像处理、嵌入式系统设计(zhouxueli008@ 163.com);万旺根,男(通信作者),教授,博导,博士,主要研究方向为虚拟现实、数据挖掘、多媒体信号处理.

出来,从而指导导管射频消融过程。心内膜三维标测系统如图 1 所示。



心内膜散乱点云密集而无序,不同于常规点云数据,除了 边界特征点外,内部存在大量的冗余数据,给后续的数据处理 工作带来困难。为此本文主要研究心脏散乱点云边界点检测, 在保留边界点的基础上,删除内部冗余数据进行精简,以便于 后续的三维建模。

平面散乱点云的特点是数量巨大,因此对求散乱点云边界 算法的要求是快速、准确。提取散乱点云边界点的方法,常见 有以下两种思路:a)寻找到点的近似切平面后,在切平面内提 取点云的边界;b)找到点的合适局部曲面,在局部曲面内计算 点的曲率,曲率极值点为点云的边界点。国内外很多学者在边 界提取方面进行了研究,如 Shapiro 等人<sup>[13]</sup>提出了如何产生树 状或带物体的边界;Eberlein<sup>[14]</sup>根据局部梯度的方向信息来提 取图象的边界;Xia 等人<sup>[15]</sup>提出利用对象的反向 K-近邻来检 测边界点;邱保志等人<sup>[16]</sup>提出的基于网格梯度的边界点检测 算法可以在含有任意形状、大规模数据集上快速有效地检测出 聚类的边界点。

由于心内膜点云的的特殊性,无法采用以上两种思路,本 文参考逆向工程理论,基于截线云理论将原始散乱点云进行分 层,在二维平面内提出一种边界点检测方法提取心内膜点云的 最外层边界点。

# 2 心内膜散乱点云切片分层

在三维图像处理过程中,通过对点云平行切割取得的截 线,就称之为截线云。理论上截线云只要取得足够密集,它就 能提供重构曲面的精确信息,但是在实际应用中,只要根据曲 面的凹凸性或者曲率变化情况按照一定间隔取线就能满足精 度要求。平行切割取截线云不但使以后的点云排序时间大大 减少,而且通过取截线云可以使得三维空间的处理变成共面的 处理,为以后构造曲线带来巨大方便,避免了三维调节曲线的 复杂性。

目前计算切片的方法有投影法和求交法。投影法获取的 切片数据为具有一定宽度的点云带,存在大量冗余数据,且切 片数据之间没有明显的拓扑邻近关系,在保留截面特征数据点 的同时对其进行精简与排序,实现切片数据的优化,以适用于 参数曲线与曲面重构<sup>[17]</sup>。求交法是由用户指定一定数量的平 行平面,所有的点将落在距离指定距离的平面的两边,一条虚 拟的直线将此平面两边最近的点连接起来,此虚拟直线与平面 的交点集就是要求的点云束。

理想的切片方法是首先找到方向矢量,沿着方向矢量的最 大值和最小值进行切片处理。在工程实际应用中,只需对散乱 点云数据进行整体坐标转换,一定可以将其方向矢量转换到与 某个坐标轴一致,因此只要沿坐标轴进行切片处理就可以满足 工程上的需求,所以本文获取切片的步骤如下(以沿 X 轴切片 为例):

a) 遍历所有点云, 求点云沿 X 轴的坐标最小值 X<sub>min</sub>和最大 值 X<sub>max</sub>。

b)由程序定义切片数目 S<sub>count</sub>,利用式(1)求相邻切片层间 距 dis,并根据切片数目建立 S<sub>count</sub>个数据结构,用于存放每层切 片数据。

$$dis = \frac{X_{max} - X_{min}}{S_{count} - 1}$$
(1)

c)利用式(2)遍历所有散乱点云,将散乱点云数据放入相应的切片数据结构,完成散乱点云分层。

$$\operatorname{fix}((p(i,1) - X_{\min}) / \operatorname{dis} + 1)$$
(2)

其中: $S_p$  表示当前点云所属的切片层; fix 表示对后面公式取整; p(i,1)表示点 p 的 X 坐标值。

## 3 切片层内检测最外层边界点

 $S_P =$ 

对于散乱点云数据,数据点P的k邻域内点的分布如果偏向一侧,则可以认为点P为边界特征点;反之,如果数据点围绕P均匀分布,则可以认为P是内部点。本文基于该思想利用散乱点云数据点及其周围点的分布均匀性来进行边界点检测。

## 3.1 数据点邻域检索

散乱点云没有明显的几何分布特征,即没有规律性,都 呈散乱无序状态,因此必须建立数据点之间的空间拓扑关系 才有利于查找每个点的 k-近邻。目前建立数据点之间拓扑关 系的常见方法有八叉树、空间单元格和 kd-tree 法三种。本文 采用基于 kd-tree 改进优化的 ANN 建立数据点之间的拓扑关 系,从而找出各数据点的 k 个近似最近邻,通过邻近点的位置 反映出待重建曲面在该测点处的形状信息。

Kd-tree<sup>[18]</sup>是 Friedman 等人于 1977 年提出的一种高维二 叉树,可实现对给定目标点的快速最近邻查找。本文基于 Mount 等人<sup>[19]</sup>提出的 ANN 库搜索特征。近似最近邻居搜索问 题可以描述为:对一个包含  $n \land R^d$  空间中点的集合 S 以及查 询点  $q \in R^d$ ,给定  $\varepsilon > 0$ ,如满足式(3),称  $p \in S$  是 q 的  $1 + \varepsilon$  最 近邻居:

$$\operatorname{dist}(p,q) \leq (1+\varepsilon)\operatorname{dist}(p^*,q) \tag{3}$$

其中: $p^*$ 是 q 的真实最近邻居。

ANN 算法使用了 BBD(balanced box-decomposition tree)tree 来保存搜索集。BBD-tree 是 kd-tree 的一种优化改进,为了 优化搜索效率,在划分特征空间时对区域长宽比例进行约束, 该数据结构保证每个节点内部的点集在非均匀分布时也能随 着划分次数增加而指数级下降,同时点集的 k 维包围盒大小也 随着划分而指数级下降。这些功能 kd-tree 是所做不到的。

对于 ANN 算法中的查找环节,本文使用优先搜索算法。 使用优先级搜索可以去除许多不必要的搜索,从而进一步提高 搜索速度。算法思想如图 2 所示。

先定位查询点 q 所在的盒子,然后再按距离递增的顺序依次访问盒中的各个点,直到遇到点 p,满足式(4)

$$dist(q, p_{leaf}) \leq dist(q, p) / (1 + \varepsilon)$$
(4)

此时搜索停止,因为后续查找的点与q的距离将超过(1+ ε)距离比。通过使用优先级队列对盒内的点进行预排序。

#### 3.2 凸包算法

在二维平面上,求边界的一个常用方法就是利用凸包算法,凸包问题是计算几何中的一个基本问题,许多问题最终都可以归结为凸包问题,如 Delaunay 三角剖分、功率图,Voronoi 图等。一个点集的凸包就是包含该点集的最小凸集,图3表示了一个平面点集凸包的概念,可以想象成用一根橡皮圈套住该集合中的所有点,当橡皮圈收缩时形成的图形就是这平面点集的凸包。



对于一个点集*S*,*S*的凸包是一个面积最小包含*S*所有点的凸多边形或多面体,凸包的详细定义如下:

**定义**1 设*V*是*n*维欧氏空间的点集,*S*⊂*V*,若 $\forall x_1, x_2 \in S, t \in [0,1]$ ,均有*X* =  $tx_1 + (1-t)x_2 \in S$ ,则称*S*为凸集。

定义 2 若  $\psi_i \in V, \lambda_i \ge 0, i = 1, \dots, k, \prod_{i=1}^{k} \lambda_i = 1, 则称点$  $\psi = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \psi_i \end{pmatrix} \psi_1, \dots, \psi_k$  的凸组合。

**定义3** 设 $S \subset V, V$ 中所有包含S的凸子集的交集称为S的凸包(convex hull)。

在很多场合,凸包方法是十分有效的,但它经常把某些特 征数据点当做冗余数据剔除,不能保证数据信息的完整性,特 别对于凹陷区域的特征点。

#### 3.3 区域"十"字算法

由于凸包算法本身的缺陷性,本文提出区域"十"字算法 解决凸包不能处理凹陷区域特征点的问题。黄文明等人<sup>[20]</sup>认 为如果数据点 P<sub>i</sub> 的 k 邻近点偏向一侧,则 P<sub>i</sub> 就为边界点。以 此为依据,利用区域"十"字算法提取出点云的边界数据,并保 留所有边界点。算法思想是:以散乱点云 P 为坐标轴中心将 其近似最邻域内的 k 个点按逆时针分为四个区,如图 4 所示, 若其中有一个或多个区域内没有离散点(或称为空白区),根 据文献[20]的理论,就可认为当前点为边界点。编程思路如 下,本算法可以很好地识别凹陷区域特征点,实验结果验证了 这一点。



a)在获得的切片散乱点云数据集中选取一点 Q 为查询 点,以 Q 为中心点构建"十"字形,坐标轴的长度取决于点云坐 标的极值。

b)利用 ANN 算法求出其 k 个近似最近邻点,分布在查询 点 Q 四周的"十"字形区域。

c)对于查询点 Q 的四个区域,逐一进行查询分析,如有一 个或一个以上的区域内没有近似最近邻数据点分布,则标记查 询点 Q 为边界点并保留;否则删除该点。

d) 遍历当前切片数据集所有二维散乱点, 可以求出当前 切片内所有边界点。

# 4 实验结果与分析

利用上述边界点检测算法来对心内膜散乱点云进行实验分析,实现边界点提取。本文算法运用 MATLAB 仿真工具实现,计算程序采用 MATLAB R2009 在 P4 2.39 GHz、内存2 GB 的计算机上仿真实现。实验步骤如下:

a)利用本文第2章点云切片分层方法沿对称轴X轴对散 乱点云分层;

b)在二维切片内基于 ANN 算法进行 K 近似最近邻域 搜索;

c)利用3.3节中的区域"十"字算法在二维平面内检测出 最外层边界点,并删除非边界点;

d)遍历所有切片层,从而提取出每层边界点,存在相应的 数据结构中;

e)将查找到的最外层点存回心内膜点云数据源,完成心 内膜散乱点云边界点检测。

实验结果如图5 所示:(a)为心内膜散乱点云,包含78 376 点;(b)为点云分为100 层后第65 层的点云数据,包含2 378 个点;(c)为基于经典凸包算法实现的边界点提取,包含13 个 数据点;(d)为基于本文提出的散乱点云边界点检测算法实验 结果,包含93 个数据点。对比(c)(d)可知,基于切片方法与 "十"字算法检测边界点方法虽然提取的边界点数比凸包方法 多,但本文方法避免了凸包方法对模型凹陷处理效果不好的情 况,保留了原始点云特征信息,并删除了冗余点云。



# 5 结束语

本文提出的基于 ANN 理论的区域"十"字算法能解决心 内膜散乱点云边界点提取,完成心内膜三维标测系统的预处 理。算法先对点云进行切片分层,再对分层后的点云进行定位 最外层点。实验结果证明,本方法相对凸包算法可以很好地处 理凹陷区域,滤除了大量冗余的信息,能大大提高后续重建的 速度和精度。该算法高效、稳定、易于实现,可为心内膜三维标 测系统整体实现奠定基础。(下转第 3996 页) (上接第3944页)

#### 参考文献:

- [1] 黄从新. 心房颤动研究的现状及前景,2009—2010 心律学科年度
   进展报告[R].2010.
- [2] SRA J, NARAYAN G, KRUM D, et al. Registration of 3D computed tomographic images with interventional systems: implications for catheter ablation of atrial fibrillation [J]. J Interv Card Electrophysiol, 2006,16(3):141-148.
- [3] PAGELLA F, MATTI E, BEMARDI F D, et al. Paranasal sinus fungus ball:diagnosis and management [J]. Mycoses, 2007, 50 (6):451-456.
- [4] TOPS L F, BAX J J, ZEPPENFELD K, et al. Fusion of multislice computed tomography imaging with three-dimensional electronatomic mapping to guide radiofrequency[J]. Heart Rhythm, 2005, 2(10):1076-1081.
- [5] SRA J,KRUM D,MALLOY A, et al. Registration of three-dimensional left atrial computed tomographic images with projection images obtained using fluoroscopy [J]. Circulation, 2005, 112 (24): 3763-3768.
- [6] 张国栋,秦伟,辛在海.三维心内膜电生理标测导航技术的原理与 应用[J]. 医疗装备,2007,2(2):16.
- [7] 张勇,沈海东,徐丹红,等. 心内膜三维导航系统和导航方法:中国,101147676[P]. 2008-03-26.
- [8] 程煜,薛奋,周继勇,等.心脏导管三维标测系统:中国,201033076
   [P]. 2008-03-12.
- [9] 卫小兵. 心内膜多腔三维重建及定位精度的基础研究[D]. 苏州: 苏州大学,2009.

- [10] 乔海峰. 心内导管三维定位导航软件系统设计及关键技术研究
   [D]. 郑州:郑州大学,2011.
- [11] 曹克将,朱莉. EnSite 3000 标测系统及其临床应用[J]. 中国心脏 起搏与心电生理杂志,2001,15(4):217-220.
- [12] 张勇,徐丹红,沈海东.心内膜三维电生理标准设备关键技术分析
   [J].上海生物医学工程,2007,28(1):19-23.
- [13] SHAPIRO B, PISA J, SKLANSKY J. Skeleton generation from x, y boundary sequences[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 15(2):136-153.
- [14] EBERLEIN R B. An iterative gradient edge detection algorithm [J].
   Computer Graphics and Image Processing, 1976, 5 (2): 245-253.
- [15] XIA Chen-yi, HSU W, LEE M L, et al. BORDER: efficient computation of boundary points [J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2006, 18(2):289-303.
- [16] 邱保志,余田.基于网格梯度的边界点检测算法的研究[J]. 微电 子学与计算机,2008,25(3):77-80.
- [17] 刘云峰,柯映林.反求工程中切片数据处理及断面特征曲线全局 优化技术[J].中国机械工程,2006,42(3):124-129.
- [18] FRIEDMAN J K, BENTLEY J L, FINKEL R A. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time [J]. ACM Trans on Mathematical Software, 1977, 3(3):209-226.
- [19] MOUNT D M. ANN programming manual. version 1. 1. 1 [EB/OL].
  (2006). http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary? doi = 10.
  1. 1. 37. 3027.
- [20] 黄文明,肖朝霞,温佩芝,等.保留边界的点云简化方法[J]. 计算 机应用,2010,30(2):348-349.