

三维可视化显示心外膜电生理参数的方法

邵毅¹, 展庆波¹, 童唐骥¹, 陈颖¹, Martyn P NASH²

1. 南京大学生物医学电子学研究所, 南京 210093
2. 奥克兰大学工程学与生物工程学院, Private Bag 92019, 新西兰

摘要 利用一种三维可视化显示心外膜电生理参数的方法, 巧妙地将空间三维曲面变换到平面上并用 Delaunay 三角剖分进行图像处理, 用重心坐标系进行插值, 从而重建出一个较光滑的心外膜模型及其上的电生理参数分布。此方法提供了心外膜电生理参数直观且快速的显示方法。

关键词 三维重建与显示; Delaunay 三角剖分; 重心坐标系; 心外膜

中图分类号 R318.11

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)12-0051-04

A Method to Display 3D Visualization of Cardiac Electrophysiologic Parameters

SHAO Yi¹, ZHAN Qingbo¹, TONG Tangji¹,
CHEN Ying¹, NASH Martyn P.²

1. Institute for Biomedical Engineering Nanjing University
Nanjing 210093, China
2. Engineering Science and Bioengineering Institute, University
of Auckland, Private Bag 92019, New Zealand

Abstract This paper proposes a method to display 3D visualization of cardiac electrophysiologic parameters. In this method, a 3D surface is transformed with Delaunay triangulation to a plane. The values are interpolated in the barycentric coordinate system. Then a smooth epicardial model is reconstructed with a distribution of electrophysiological parameters on its surface. This method provides an intuitive and fast way to display epicardial electrophysiologic parameters.

Keywords 3D reconstruction and display; Delaunay triangulation; barycentric coordinate system; epicardium

0 引言

测量心电图时, 一般会将许多电极固定在心外膜胸前投影区上而得到心电图数据, 那么这些固定的电极的位置可用空间三

维坐标表示, 在这些电极所采到的电压序列中可以测量到一些电生理数据^[1-2], 比如激活恢复间期 (Activation Repolarization Interval, ARI) 等等。本研究工作是根据一些有限的电极坐标来重建出一个较光滑的心外膜模型, 并在模型上显示 (可以用颜色表示数据的大小) 电压和 ARI 等电生理参数数据, 为医学领域提供了一种心外膜电生理参数直观且快速的显示方法。

1991 年, 黄泽奇等^[3]提出电子计算机三维重建心脏在医学领域具有广泛的应用。在方祖祥等^[4]研究心外膜的工作中, 曾经在二维平面中进行处理, 这样损失了很多的结构信息。刘清^[5]在研究心脏外膜电势传播过程时运用了一系列的投影旋转等变换方法来显示心外膜图像, 杨翠微等^[6]在研究三维心外膜模型中时用的是 B 样条插值法, 郭小玫等^[7]在研究心房颤动时心外膜电活动时运用了波动图。但是这些关于重建心外膜的工作都没有真正将三维的心外膜模型以及上面的电生理参数直观地显示出来。本文用一种较简单的计算方法, 将表面先进行 Delaunay 三角剖分, 再在三角形中进行插值, 然后通过 Matlab 进行图像处理, 从而得到更加直观地心外膜电极坐标及电生理参数三维显示。三维模型不仅可以使得人们对心脏以及它的电生理参数有个感性的认识, 而且作为科研工作的基础, 提供了电生理参数直观的显示方法。

1 方法

1.1 算法的概述

本研究的算法中已知的是心外膜上若干电极的空间坐标和它们的电生理参数, 由这些坐标重建出一个表面光滑并且能显示表面上各电极电生理参数的心外膜模型。

收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60701002)

作者简介: 邵毅, 研究方向为生物医学电子学, 电子信箱: shaoyi200618@yahoo.com.cn; 陈颖 (通信作者), 副教授, 研究方向为医学信号处理、生物医学电子学, 电子信箱: chenying.nju@gmail.com

电极坐标的获得方法参见文献[8-9],85%的电极坐标利用记录位置和方向的超声探头 FARO 数字化机械臂和计算机断层衍生技术获得,其余背面坐标可以通过背面电极地形和邻近的电极坐标插值得到。通过计算机成像和三维超声心动图图像得到心外膜表面的数字化图像。

由于心脏表面不是一个凸面体,将各个电极的位置直接投影到二维平面上可能存在多值映射,如果直接将测得的电极坐标在三维空间中做 Delaunay 三角剖分,将得不到一个面上的三角剖分,因此通过坐标变换方法将三维坐标映射到平

面上再进行剖分。具体做法是:首先将空间的各点坐标一一对应地变换到一个稍大的半球面上,再映射到一个平面上,然后在此平面上对各点做 Delaunay 三角剖分,从而建立此平面上各个点坐标的空间关系。由于一一对应的关系,原来空间中各点也对应地由各个 Delaunay 三角形连成一个曲面。将所得到的一个曲面用网格细分,通过重心坐标系在 Delaunay 三角形中进行插值,求出其平滑的三维心外膜坐标及电生理参数。最终在 Matlab 中将得到的心外膜表面和电参数光滑地显示出来。图 1 是算法实现的过程图。

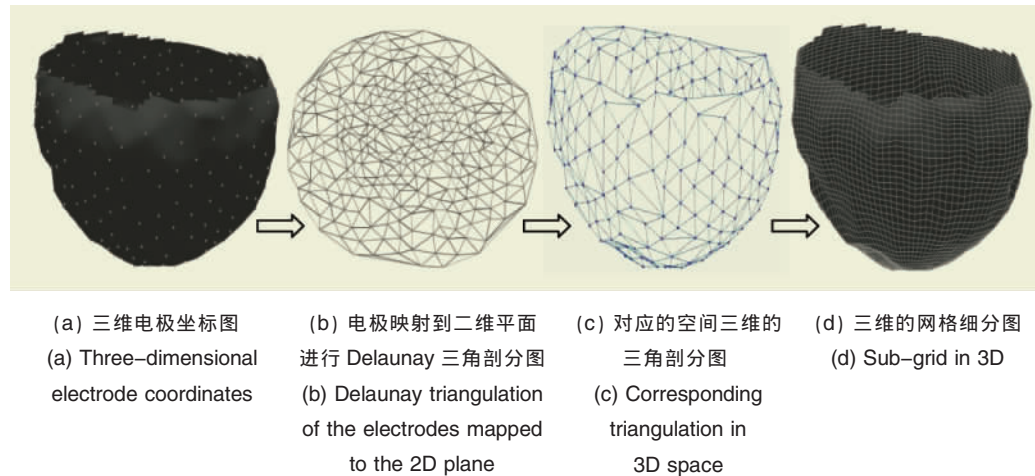


图 1 算法实现过程图

Fig. 1 The implementation of the algorithm

1.2 算法的实现

1.2.1 变换方法

已知空间电极(设为 $A_1, A_2, \dots, A_n$)在笛卡尔坐标系中的坐标,在它们的上方取一个点 O ,将点 O 与空间各点相连,以其中最大的距离为半径,以点 O 为球心做出一个半球面, OA_i ($i=1, 2, \dots, n$)的延长线必然与球面相交在 n 个点上,设其为 $B_1, B_2, \dots, B_n$,将这些点垂直投影到 $x-y$ 平面上,得到 n 个投影点,设其为 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 。

由上面的关系可知, A_i, B_i, C_i 之间有着对应的关系,这时在 $x-y$ 平面上对 C_i 做 Delaunay 三角剖分,那么三维空间中的 A_i 和 B_i 也对应地分别进行了 Delaunay 三角剖分, A_i 被三角形剖分成一个碗状的平面, B_i 则仍是一个半球形表面。

1.2.2 插值与重建

对上文中得到的半球表面进行网格细分,这里的网格细分是在上述得到的半球面上进行的,只需要对方位角和高度角进行细分。细分后需要判断通过划分得到的点是否在上文中半球表面上的 Delaunay 三角形中,如果不在,则将其剔除;如果在则需要将其对应到 A_i 表面的某个 Delaunay 三角形中并进行插值。

本算法中是用重心坐标系来实现插值的^[10],重心坐标系是一种与三角形表面相关联且独立于三角形所在的 3D 坐标

系的坐标系。三角形所在平面的任意点都能表示为顶点的加权平均值,这个权就称作对应点在重心坐标系下的坐标。

现在假设点 P 是网格划分后对应到 A_i 表面的某个 Delaunay 三角形中的点,设此三角形的 3 个顶点为 A_i, A_m, A_n 。那么点 P 与 $\triangle A_i A_m A_n$ 的对应关系如图 2。

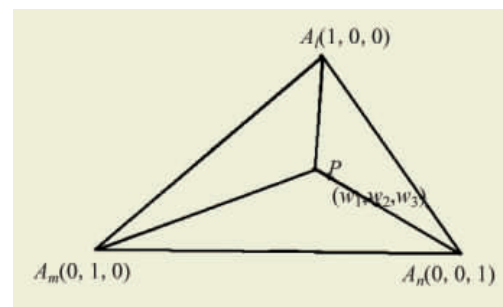


图 2 点 P 与 $\triangle A_i A_m A_n$ 的位置图

Fig. 2 P and $\triangle A_i A_m A_n$

图 2 中,在重心坐标系下,三角形三个顶点的坐标分别为 $(1,0,0)$ 、 $(0,1,0)$ 、 $(0,0,1)$,点 P 的坐标设为 (w_1, w_2, w_3) ,则有 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。我们知道的是 3 个顶点和点 P 的笛卡尔坐标,分别设为 $A_i(x_i, y_i, z_i), A_m(x_m, y_m, z_m), A_n(x_n, y_n, z_n), P(p_x, p_y, p_z)$,则有

$$\begin{cases} p_x = w_1 x_l + w_2 x_m + w_3 x_n \\ p_y = w_1 y_l + w_2 y_m + w_3 y_n \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} w_1 = \frac{(p_y - y_n)(x_m - x_n) + (y_m - y_n)(x_n - p_x)}{(y_l - y_n)(x_m - x_n) + (y_m - y_n)(x_n - x_l)} \\ w_2 = \frac{(p_x - x_l)(x_n - x_l) + (y_n - y_l)(x_l - p_x)}{(y_l - y_n)(x_m - x_n) + (y_m - y_n)(x_n - x_l)} \\ w_3 = \frac{(p_x - x_m)(x_l - x_m) + (y_l - y_m)(x_m - p_x)}{(y_l - y_n)(x_m - x_n) + (y_m - y_n)(x_n - x_l)} \end{cases}$$

解得

$$p_z = w_1 z_l + w_2 z_m + w_3 z_n \quad (1)$$

这里坐标的 z 分量可以表示很多关系, 比如笛卡尔坐标系中的高度分量或者心脏电生理参数(电压、ARI 等)。

当计算遍布所有的插值点后, 将所有插值点的重心坐标系下的坐标存放在一个系数矩阵 $W=[W_1, W_2, W_3]$, 又由于知道每一个插值点所在的 Delaunay 三角形的 3 个顶点的 z 分量, 则分别根据公式(1)就可以得到所有插值点的 z 分量。此时即可得到心外膜表面上许多插值点的位置和它们的电生理参数, 并且将表面上的点的坐标和它们的值对应起来存在矩阵

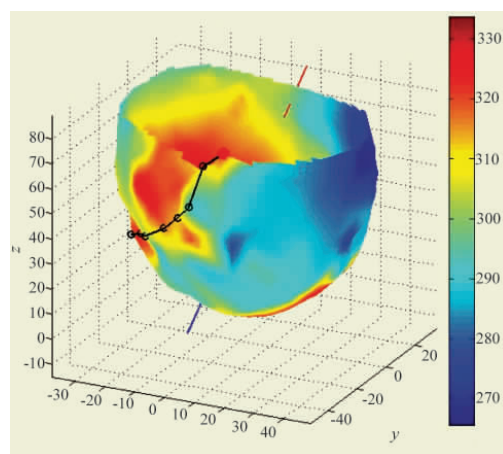
当中, 从而可以方便地显示出来。

由于模型第一遍计算时需要计算系数矩阵 W , 时间会比较长。但是由于模型及插值点坐标不变, 所以当需要进行新电生理参数插值的时候, 只需每个插值点分别重复公式(1), 改变其中的 z 分量就可以实现快速地显示三维分布图。

2 实验

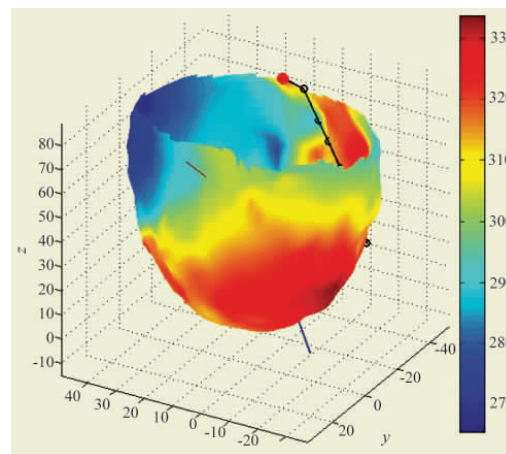
以短时缺血-再灌注动物模型为例: 实验和信号采集由 Martyn P. Nash 和 David J. Paterson 完成, 实验动物为体重 28~36 kg 的 5 头家猪。测量和记录其心室外膜上 303 个电极的电压信号 (Map), 并记录每个电极的空间坐标。具体的实验措施参见文献[5]。分析所用的数据都来自其中一头动物的实验数据。

将心脏正常时刻和最大缺血时刻的三维心外膜模型做了一个对比, 如图 3。从图中可以看出, 通过比较图 3(a), (b)



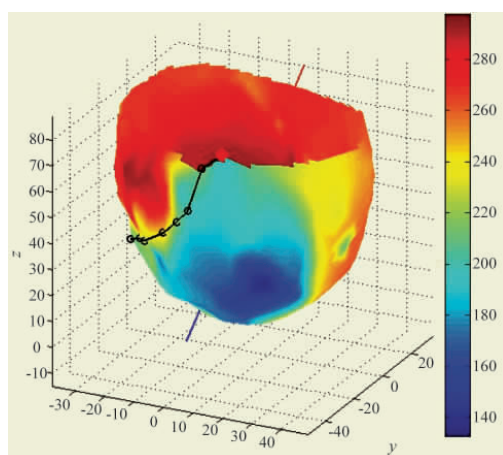
(a) 心脏正常时刻时心外膜正面的 ARI 分布图

(a) ARI distribution of the frontal of epicardium when heart is in normal condition



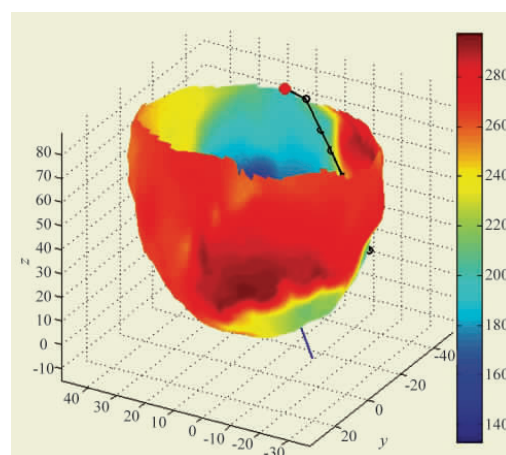
(b) 心脏正常时刻时心外膜背面的 ARI 分布图

(b) ARI distribution of the rear of epicardium when heart is in normal condition



(c) 心脏最大缺血时刻时心外膜正面的 ARI 分布图

(c) ARI distribution of the frontal of epicardium when heart is in condition extremely lack of blood



(d) 心脏最大缺血时刻时心外膜背面的 ARI 分布图

(d) ARI distribution of the rear of epicardium when heart is in condition extremely lack of blood

图 3 心脏正常时刻和最大缺血时刻的三维心外膜模型对比

Fig. 3 Comparison of the 3D visualization of smooth epicardial model for heart in normal condition and in condition extremely lack of blood

和(c),(d)上ARI数值的范围(图中颜色代表数值的大小,红色数值大,蓝色数值小),可判断哪个是心脏正常时刻,哪个是最大缺血时刻,也就是说心脏正常时刻的ARI较长,而心脏缺血时刻的ARI较小。

3 结论

本文主要介绍了一种三维可视化显示心脏电生理参数的方法,经过测试,通过得到的心外膜的三维图像,可直观地看到心脏正常时刻和缺血时刻心外膜表面电生理参数(如ARI)分布的实时状况。

以往三维重建法(如利用CT体绘制重建等)虽也能精确地重建出心外膜曲面图像,但是计算量较大,无法快速显示。本文算法将一些简易的算法结合起来,运算量较小,可以较完善地重建出三维心外膜图像,并且建模后插值速度很快。因此本文算法可作为一种快速的三维重建心外膜模型的方法,在科研工作中有一定的应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 陈颖, Nash M P, 宁新宝, 等. 缺血时三维心室外膜 Map 多重分形的变化[J]. 科学通报, 2005, 50(22): 2479-2483.
Chen Ying, Nash M P, Ning Xinbao, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(22): 2479-2483.
- [2] Chen Ying, Nash M P, Ning Xinbao, et al. Multifractal ECG mapping of ventricular epicardium during regional ischemia in the pig [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2006, 53(10): 1920-1925.
- [3] 黄泽奇, 左焕琛, 刘卫名, 等. 人心计算机三维重建和显示的研究[J]. 解剖学杂志, 1991, 14(4): 318-321.

- Huang Zeqi, Zuo Huanchen, et al. *Chinese Journal of Anatomy*, 1991, 14 (4): 318-321.
- [4] 方祖祥, 邬小玫, 杨翠微, 等. 心外膜电位的动态标测心电图学进展[M]. 北京: 北京医科大学出版社, 2000.
Fang Zuxiang, Yang Cuiwei, et al. The dynamic progress of cardiac electrical of epicardial potential mapping [M]. Beijing: Beijing Medical University Press, 2000.
- [5] 刘清. 心脏外膜电势传播过程的三维立体显示[J]. 北京生物医学工程, 1989, 8(4): 197-200.
Liu Qing. *Beijing Biomedical Engineering*, 1989, 8(4): 197-200.
- [6] 楼安琪, 杨翠微, 方祖祥. B 样条在三维心外膜动态标测模型仿真中的应用[J]. 中国医疗器械杂志, 2005, 29(6): 396-398.
Lou Anqi, Yang Cuiwei, Fang Zuxiang. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2005, 29(6): 396-398.
- [7] 邬小玫, 方祖祥, 杨翠微. 心房颤动时心外膜电活动波动图的记录与分析[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2004, 18(2): 148-150.
Wu Xiaomei, Fang Zuxiang, Yang Cuiwei. *Chinese Journal of Cardiac Pacing and Electrophysiology*, 2004, 18(2): 148-150.
- [8] Nash M P, Bradley C P, Paterson D J. Imaging electrocardiographic dispersion of depolarization and repolarization during ischemia simultaneous body surface and epicardial mapping[J]. *Circulation*, 2003, 107: 2257-2263.
- [9] Nash M P, Mourad A, Clayton R H, et al. Evidence for multiple mechanisms in human ventricular fibrillation[J]. *Circulation*, 2006, 114: 536-542.
- [10] Akenine-Moller T, Haines E. 实时计算机图形学 [M]. 普建涛 译. 北京: 北京大学出版社, 2004.
Akenine-Moller T, Haines E. Real-time rendering[M]. Pu Jiantao trans. Beijing: Beijing University Press, 2004.

(责任编辑 王芷)

·学术动态·



“中国化学会第 11 届全国应用化学年会”征文

“中国化学会第 11 届全国应用化学年会”定于 2009 年 10 月 13-16 日在桂林市召开,会议期间拟进行应用化学重大、前沿领域的专题研讨和分公司相关业务推介活动。此次会议主题是“应用化学的科学发展”。

会议征文包括:精细化学品,天然产物的研究与开发,应用能源化学,应用材料化学,应用药物化学,应用电化学,应用环境化学,清洁生产与绿色化学,应用化学学科的发展与人才培养,应用化学研究成果的快速产业化转化,应用化学可持续发展战略的实践。投稿邮箱:yyhxn@ciac.jl.cn,截稿日期:2009 年 8 月 30 日。

联系方式:

长春市人民大街 5625 号中国科学院长春应用化学研究所《应用化学》编辑部 (130022) 孙智权; 联系电话:0431-85262016, 传真:0431-85685653; 电子信箱:yyhxn@ciac.jl.cn

桂林市育才路 15 号广西师范大学化学化工学院 (541004) 李庆余, 王红强, 彭桂花; 电话:0773-3310900, 传真:0773-5854077; 电子信箱:13975808173@126.com