

中图法分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-1038-07

论文索引信息: 陈胜勇, 管秋. 人体心脏的4维图像建模和参数分析[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1038-1044

# 人体心脏的4维图像建模和参数分析

陈胜勇, 管秋

(浙江工业大学计算机学院, 杭州 310023)

**摘要:** 研究一种基于4维医学图像的活动形状模型方法,用于构建人类心脏的3维柔性模型并进行自动化参数分析,以得到心脏各方位的量化功能指标。首先,通过造影技术获取心脏周期内各时刻的立体图像,根据时间序列形成一组4维图像。在大量医学图像的基础上,用统计方法分析得到心脏的一般形状,局部的变化范围和分布概率密度,为人类心脏建立一个数字化的计算模型。在此基础上,针对具体病人进行图像分割和形状拟合以计算其心脏静态和动态形状参数,然后分析得到与心脏功能相关的一些重要参数。研究内容包括心脏模型的建立,心脏静态参数分析,心脏动态功能分析,疾病分析等,对病人心脏在特定时刻的每组图像生成其3维结构模型,为医生提供丰富有力的诊断和治疗依据。

**关键词:** 心脏; 4维医学图像; 活动形状模型; 柔性建模法; 图像处理

## Heart modeling and parametric analysis from four-dimensional images

Chen Shengyong, Guan Qiu

(College of Computer Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023 China)

**Abstract:** This paper investigates automatic construction of a three-dimensional (3D) heart model from 4D medical images. It provides reliable functional analysis of human hearts for diagnosis and treatment for cardiovascular diseases. Firstly, a 4D image is constructed from a set of medical images that are obtained at a sequence of time points. Then, based on a statistical shape model trained from thousands of patient image sets, a geometrical and statistical heart model is generated. With this model, for a new case, an adaptive segmentation and fitting scheme is used to obtain its 3D flexible shape which is interpreted as the deformable surfaces of the patient heart. Finally, functional evaluation of the cardiac ventricles can be followed by quantitative analysis of some important parameters, such as volumetric measurements, myocardial dynamics, and disease analysis. Experiments are carried out to demonstrate the proposed method. The study provides an important means of diagnosis and treatment for heart diseases.

**Keywords:** heart; 4D image; ASM; flexible model; image processing

## 0 引言

统计资料显示,2006年有18万人死于战争,56万人死于暴力、120万人死于交通事故,然而更多的

是1700万人死于心血管疾病。目前,心脏血管病是全世界发病率和死亡率最高的疾病,大约占总体的三分之一左右,对生命健康构成严重威胁。根据世界卫生组织2009年度报告,死于心血管病的人数在逐年上升,预计到2020年将达两千万<sup>[1]</sup>。在经济

收稿日期:2009-12-22;修回日期:2010-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(60870002, 60802087);新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0762);浙江省科技厅计划项目(2010R10006, R1110679, 2010C33095)。

第一作者简介:陈胜勇(1973—),教授,博士生导师。2003年获香港城市大学机器视觉专业博士学位,主要研究方向为计算机视觉、图像处理、机器人,在国际期刊和会议上发表论文100余篇,SCI收录40篇。E-mail:sy@ieee.org, http://sychen.com.nu。

发达国家和地区的比例较高,其死亡率在 40% 左右<sup>[2]</sup>。据最近报道,我国近年来心血管疾病发病率更呈明显上升的趋势。而且随着生活方式的改变,近年来我国冠心病患病年龄还呈年轻化趋势。因此,利用计算机对心脏功能进行深入研究分析,对于心脏疾病的预防和治疗有极其重要的意义<sup>[3-5]</sup>。

用于心血管疾病临床诊断的医学成像技术在过去的 10 年中有了飞速的发展,新的方法层出不穷,已有成像系统的性能也在不断提高。从平面到立体、从局部到整体、从静态到动态、从形态到功能已成为医学图像的重要趋势。2 维医学图像已成为临床诊断和医学研究中的重要依据,它有效地提高了诊断的准确性和治疗的有效性。但是,由于人体脏器结构是 3 维空间分布的,仅仅依靠一幅或几幅 2 维图像来理解 3 维结构有一定的局限性。为了给医生提供真正的 3 维结构显示图,自 20 世纪 70 年代开始就有人着手研究医学 3 维成像方法。早期的 3 维成像曾采用全息摄影等方法,随着计算机技术的发展及计算机图形学的成熟应用,医学 3 维成像在近年来有了很大的发展,并在临床应用中发挥着越来越重要的作用。

将 3 维图像随时间变化的序列图像叫做 4 维图像。可以想象,当医生在显示屏上看到了一颗立体的跳动的的心脏,就好像看到了一个活生生的人。这样的动态图像无疑会对诊断和治疗大有帮助,正因为如此它将在未来一段时间内成为一个研究热点。在过去的几年中,专家们提出了许多方法来分析和提取心脏外形和功能的具体参数,特别是提出的基于统计模型的 3 维建模(主要用于人体左心室的疾病诊断)<sup>[6-7]</sup>,引起了极大的关注。心脏内部和心外膜表面片段的精确数据的获得,使得整个心室的梯状结构和壁厚等信息能以间隔时间(心脏相位)内被描述。通过电波可以很清楚地反映出在有压力和休息状态下病人的数据的变化。该方法实现了高度的自动化和比较令人满意的诊断结果。这几年国内一些专家提出了自己的方法,其中的多参数成像也引起了关注<sup>[3-5, 8-11]</sup>。然而,目前国际上对于通过 4 维图像进行病人心脏建模和自动化功能分析的研究才刚刚起步。

从理论上,通过最新医学成像技术和软件分析技术,自动对病人心脏的评估手段不仅为医生提供更多的判断线索,而且相应的治疗也可能会更加丰富有效,特别是对于那些没有数字化定量分析情况

下非常难以诊断心脏早期疾病。目前,人们已经在相关问题的工作上取得了一定的进展,譬如医学成像设备、图像处理、特征增强和提取、心脏边缘分割、参量计算、功能形式化、疾病评估等<sup>[3-14]</sup>。研究人员尝试了相当多的方法来解决这些问题,具体可以从文献<sup>[9-11, 14]</sup>中深入了解。典型地, Yamamuro 等人研究了一种 2 维心脏图像处理的方法<sup>[13]</sup>。他们评估心脏功能是以多排 CT 为手段,并与单光子发射计算机断层成像、心超、核磁共振等成像方法进行比较。各种左心室(LV)的功能参量被计算后与其他图像进行关联分析。关于单光束发射计算机断层摄影的图像研究,已经也相当多年,例如 Germano 等人开发了一种定量计算左心室射血分数的算法<sup>[13]</sup>。就现有方法而论,已经有相当多的自动图像分割和左心室外形建模的实验报告,但是大部分研究都有一定的局限性,特别是难以做到心脏形状的完整性、正确性或正常性,以及拟合的可靠性。

建立一个基于医学图像的人体心脏 3 维模型,是为了给医生诊断和治疗提供更详细全面的数据,如:心脏的 3 维形状和局部情形、心室容积、血液流通状况,以及心肌可能有病变部位等。

使用柔性建模法建立心脏的通用计算模型(主要是左心室),并用于病人图像的分割拟合以分析其心脏功能状况。在建立模型时,首先把图像数据库进行形体提取、姿态配准、特征对齐、统计计算等过程而得到一个活动形状模型(ASM)。而对于一组新的病人图像,此模型将被用于完整的图像分割和形状拟合。最后,该研究给出了对于左心室的典型定量功能分析。

## 1 柔性建模法建立心脏模型

基于统计的柔性建模法包括 3 个内容:1)以医院里现有病人图像数据库为基础建立一个能反映人类心脏一般形状的活动形状模型,这一步需要统计分析技术和医生经验知识。目前,我们与若干合作医院共同建立了人类心脏的活动形状模型。所采用的柔性建模法是基于 Cootes 等人提出的活动形状模型<sup>[15]</sup>。2)实现一种基于活动形状模型的图像分割和形状拟合方法,这种方法能够把医学图像中的心脏轮廓从较佳的位置进行分割和拟合,并较好地反映其解剖学意义上的边界位置(而不是仅仅依据图像的边缘强度或者梯度变化)。3)在一个新病例

图像中拟合具体的心脏形状后,可以通过计算一些特征参数来判断患者的心脏功能状况,这一步也需要用统计手段来评估心脏形状和功能参数的偏差情况。

为了建立人体心脏通用 3 维模型及其表达方法,通过活动形状建模方法,建立一个统计学意义上的点分布模型<sup>[16]</sup>和用于解释解剖学心脏边界的局部组织结构。其具体步骤是:首先勾勒出训练集图像中心脏的轮廓形状(这一步需要由经验丰富的医生根据其临床经验进行指导);然后,在计算机中判定这些用于描述轮廓的点(被称为标志点)是否较好地拟合了被描述的轮廓,若不完备,则需沿着轮廓插入新的标志点以提高其描述精度。假设在 2 维图像上,用一个向量  $X_i$  来表示标志点组成的轮廓(设共有  $n$  个点):

$$X_i = (x_{i1}, y_{i1}, \dots, x_{in}, y_{in})^T \quad (1)$$

在这个样本  $X_i$  的集合中,标志点坐标为  $(x_{ij}, y_{ij})$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。在训练集中的每一幅图都有这样一组点,也都以类似的向量进行描述。假定训练集中有  $m$  幅图,就可以得到  $m$  个向量  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )。对它们进行配准,然后取平均得到向量  $\hat{X}$ 。在此基础上如果产生一个新的形状,可以由下式计算生成:

$$X = \hat{X} + \Phi b \quad (2)$$

式中,  $b$  是模型的形变参数,  $\Phi$  是一个矩阵。这条公式就是对象物体点分布模型的数学描述。当描述轮廓的点集很大,维数很高,在建模过程中要进行的计算量就很大。为了减少计算量,提高计算速度和精度,需要降低向量的维数,采用主元分析法来构造  $\Phi$ ,降低矩阵  $\Phi$  维数。此时  $\Phi$  的列向量是协方差矩阵

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X})(X_i - \hat{X})^T \quad (3)$$

的主要元素。设  $\phi_i$  是  $S$  矩阵的特征向量,  $\lambda_i$  是  $S$  的特征值(并且满足  $\lambda_i \geq \lambda_{i+1}$ ),则  $\Phi$  可以取  $S$  的  $t$  个大于 0 的特征值所对应的特征向量的组合,也即  $\Phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_t)$ 。 $t$  的数值可参考标准 ASM 方法的推荐值。此时的  $b$  应该为  $t$  维的向量。

在建立心脏通用模型的过程中,首先要将从不同角度拍摄的医学图像经过旋转、平移、缩放,配准到同一个坐标系下,然后将经专家勾勒的心脏医学图像转化为心脏点分布轮廓图,建立训练集。

由于心脏医学图像是 3 维的,每个标志点都落在某个位置的成像平面上,可设其坐标为  $(x_{ij}, y_{ij},$

$z_{ij})$ 。可以按照 ASM 模型的步骤建立每个成像平面的点分布模型,然后沿纵轴方向平滑连接得到立体模型,也即基于统计的平均心脏模型。而模型的通用数学描述仍然依据式(2)。

在研究中,图 1 所示的是训练集中的部分心脏图像,在心脏的边界上已经根据临床经验给出了分界位置。这一步也可以通过开发软件工具来实现交互式手工描绘心脏轮廓。我们在分析心脏图像的基础上,通过对心脏图像的训练,建立了约 100 个心脏舒张末期的 3 维形状,并以它们建立通用点分布模型(图 2)。

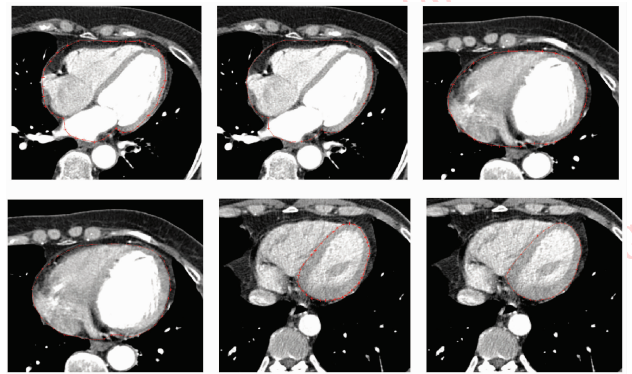


图 1 训练集中的部分心脏图像

Fig. 1 Some examples of heart images in the training set

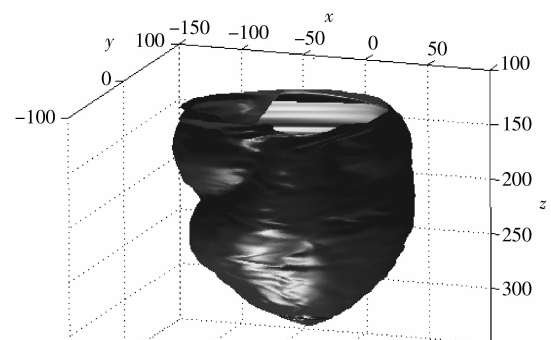


图 2 基于统计的心脏点分布通用模型

Fig. 2 The point distribution model of the heart created by statistics

## 2 基于活动形状模型的心脏拟合

通用模型的建立仅为构建具体病人的 3 维心脏模型提供了原型,还需要对具体病人的医学图像进行自动分割,并将分割得到的数据作为原型的拟合

目标,然后对模型轮廓进行修正,才能逼近到具体病人的最佳 3 维心脏形状。这里主要是针对心室模型(尤其是左心室,因为它集中了一些最重要的心脏功能并向全身供血),从医学图像中获得可靠的心室位置并分割出心室形体轮廓<sup>[17-20]</sup>。在目前备受关注的图像分割方法中,如分类法、全局搜索法、活动轮廓模型(snake)、水平集(level-set),以及特征面法和特征块法等,虽然这些方法在一定应用领域的图像分割中取得了较好的效果,但在生物组织的医学图像分割中效果往往并不理想<sup>[21-22]</sup>。例如,有时 snake 方法分割得到的不是人体组织在解剖意义上的真实边界。特征块的方法要求被分割的图像形状是固定的(或者说刚性的),而心脏的形状是随着个体和心跳而变化的。这就需要寻求一种分割技术不仅可以得到心脏的解剖学意义上的形状,同时能给出形状的变化趋势和变化范围。基于统计的心脏活动形状建模方法恰好能同时满足这两个条件。

在基于统计的心脏活动形状建模方法中,首先对大量的心脏图像进行分析,建立一个基于统计的通用心脏立体模型,然后将该模型与实际病人的图像进行拟合,经过多次迭代,把通用模型进行解释得到具体病人的实际心脏模型。因此,在上一节的基础上,这里将把通用模型与一组新的图像进行迭代匹配。

当出现新病人的心脏医学图像时,要再现这个病人心脏的 3 维型体并进行参数化分析。在进行分割拟合前,首先要把模型建立时的坐标系经过几何变换转换到实际的图像坐标中。这一步可以根据模型方位和成像参数的关系进行估计,有一定的误差一般也不影响最终的结果。然后将通用模型在待分割图像中寻找轮廓目标位置。如图 3 所示,带绿点曲线表示已建立的通用模型的一部分轮廓线,绿点是轮廓上的标记点,图中背景是待拟合的实际图像的一部分。

在拟合过程中,在模型标志点处作轮廓法线,然后沿着法线去拟合实际的图像轮廓(这里要根据解剖意义上组织匹配)。具体过程分为以下 4 步:

1) 沿着模型标志点作形状轮廓的法线,在实际图像中重采样,并根据组织的解剖学匹配关系找到对应点(如图 3 中红点所示)。当然,并非每个标志点都能找到与之对应的目标点,但是局部匹配失败并不影响心脏的整体匹配。

2) 计算出所有有效的目标点坐标,构成向量  $\mathbf{X}$ ,如式(1)所定义。

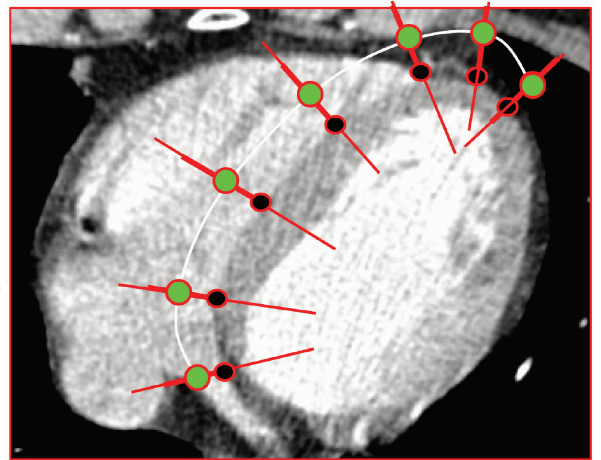


图 3 活动模型与实际图像的匹配拟合过程

Fig. 3 The process to match the model with image instances

### 3) 构造优化函数

$$f = | \mathbf{X} - T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b}) |^2 =$$

$$f(\mathbf{b}, X_c, Y_c, Z_c, s, \alpha, \beta, \gamma) = | \mathbf{X} -$$

$$T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b}; X_c, Y_c, Z_c, s, \alpha, \beta, \gamma) |^2 \quad (4)$$

式中,  $T$  表示平移、旋转、缩放等几何图形变换,包括平移量  $X_c, Y_c$  和  $Z_c$ , 缩放比例  $s$ , 3 轴旋转角度  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$ 。这些参数的初始值可以根据图像与模型的相对方位给出估计值,然后进行非线性迭代计算最优解。

4) 将模型轮廓上的标志点沿法线向目标点移动,使函数式(4)达到极小值。

值得注意的是,有时医学图像的最强梯度边界不一定是待拟合图像的真实边界,因为要根据解剖意义上的组织位置来定义(这也是多数现有方法不能很好用于心脏分割的原因之一)。如图 4 所示,图中的真实边界是法线与白色圆弧的交点,为了避免误判,就需要结合模型标志点的统计变化规律来进行定位。在拟合过程中轮廓标志点的统计变化规律的建立是关键。这需要医师的临床经验作依据,并把相关的规律加入上述的活动形状模型中以指导图像中的目标点匹配。图 4 表示一种图像最强梯度位置并不是组织器官真实解剖边界的例子。图 4 (b) 对应于 (a) 图像中某轮廓标志点的法线方向的灰度变化及其梯度变化,由于周围的情况比较复杂,梯度并不适合作为组织边界的判断。因此,较好的方法是根据图 4 (b) 中下方的梯度结构进行匹配,即我们边界分割是依据每个标志点附近的组织结构进行的。

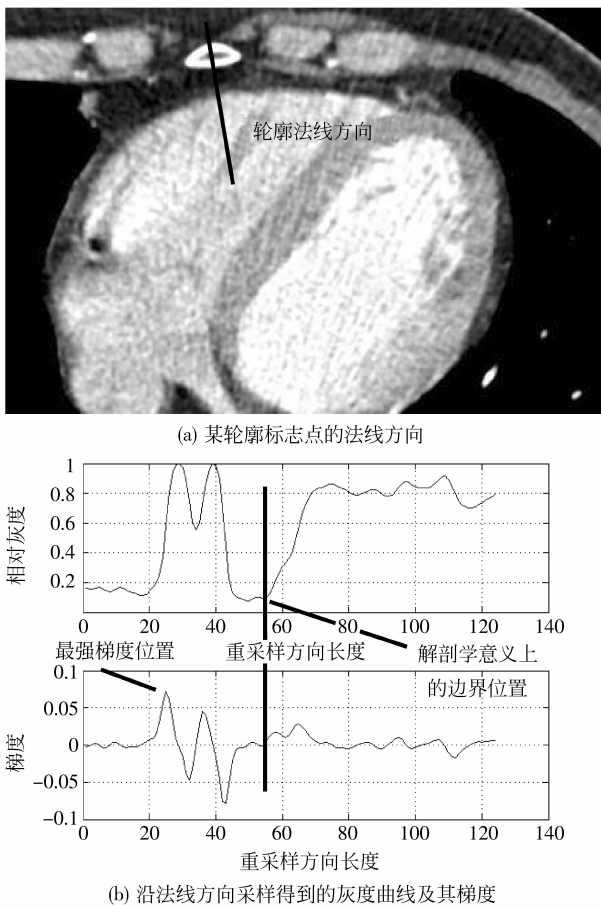


图 4 建立局部组织模型并加入到活动形状模型中进行目标匹配

Fig. 4 For the case that the strongest edge position is not the true boundary of the organ, we need to model the local structure for target matching

### 3 心脏功能参数分析

把心脏的功能参数分为静态参数和动态参数。那些通过单次医学成像就能够获得的的心脏功能指标称为静态指标,典型的有左心室容量( $V_{LV}$ )、心肌灌注强度图、左心室质量( $M_{LV}$ )、左外心膜容积( $L_{EPI}$ )、左心室壁厚(WT)及分布、舒张末期容量( $V_{ED}$ )、收缩末期容量( $V_{ES}$ )、心肌纤维断面圆周等。而必须通过多幅医学图像(通常是一个心脏周期的多个相位)计算得到的功能指标称为动态指标,主要有左心室的每搏输出量( $S_V$ )、射血分数( $E_F$ )、心输出量( $C_0$ )、心肌运动及变形、心肌应力和应变等。建立具体病人的心脏模型是为了从模型中计算出以上表征心脏功能

的参数,以结合临床经验进行心脏功能分析。

在得到病人的心脏 3 维模型后,可以建立模型与心脏功能之间的关系,并计算出表征心脏功能的一些重要指标。限于篇幅,本文只介绍少数几个典型的参数指标,其他参数的计算方法可以进行类似演算。

例如,左心室质量( $M_{LV}$ )主要由两个因素决定:心室腔体的体积和心室的壁厚。假定心肌隔膜是左心室的一部分,同时左心室心肌的体积  $V_m$  等于心外膜在内的总体积  $V_t$  (epi) 减去心室内腔的体积  $V_c$  (endo)。这样可以将心肌密度( $1.05 \text{ g/cm}^3$ )乘以心室的体积估计出左心室质量( $M_{LV}$ ),具体的计算如下:

$$V_m = V_t(\text{epi}) - V_c(\text{endo}), M_{LV} = 1.05V_m \quad (5)$$

临床上认为  $M_{LV}$  是与人的体表面积或体重成正比, $M_{LV}$  的正常范围是  $2.4 \pm 0.3 \text{ g/kg}$ 。可以通过所建立的活动形状模型计算出  $V_m$ ,然后进一步把得到  $M_{LV}$  与正常的范围作比较。

同样,可以通过模型计算出心脏舒张末期容积( $V_{ED}$ )和收缩末期容积( $V_{ES}$ ),将  $V_{ED}$  减去  $V_{ES}$  得到心脏的每搏输出量( $S_V$ )。

$$S_V = V_{ED} - V_{ES} \quad (6)$$

临床上认为,正常情况下  $S_V$  是与人的体表面积成比例的,可以采用搏指数  $I_{SV}$  (单位表面积的每搏输出量)作为衡量健康的指标。正常人的指标范围是  $45 \pm 8 \text{ ml/m}^2$ 。

计算出  $S_V$  和  $V_{ED}$  后,还可以更有效地得到表征左心室泵功能的心肌收缩指数,即射血分数( $\gamma_{EF}$ )

$$\gamma_{EF} = \frac{S_V}{V_{ED}} = \frac{V_{ED} - V_{ES}}{V_{ED}} \times 100\% \quad (7)$$

从心血管造影图像分析得到的  $\gamma_{EF}$  正常范围为  $67 \pm 5\%$ 。总之,可以通过分析这些影响心脏功能的参数指标,为医生和病人自动生成具体的心脏状况报告。

在研究中,利用 VTK、ITK、OPENCV 等开发工具软件,并编写 C++ 程序,实现了通过模型计算心脏的部分功能指标的软件系统。该软件可以自动计算左心室容积、左心室心肌质量、右心室容积、心肌灌注强度图、心脏整体容积和质量等参数,以及进行心肌动力学分析。这里仅说明 3 个功能分析报告:心室靶心图、多相位  $V_L$  容量分析曲线和心肌动力学分析图。

图 5 左边是一个自动生成的心室靶心图,用来表示左心室的灌注密度(反映血液流通情况)。根据统计的方法,可以据此评估出该心室的病变情况

(如图 5 右所示)。图 6 是其相应的 3 维分布图,医生和病人都可以更直观地了解其所在的部位。图 7 则是一个从多相位心脏图像分析得到的心室容量变化曲线图,表示容积随时间变化的过程,可以反映心脏的一些动态功能。图中可以方便地看出该病例的心室最大容积为 99 ml,每搏输出量为 50 ml (即 99 - 49),射血分数为 51% (即 50/99) 等。图 8 是根据 4 维图像来进行心肌动力学分析,从心室上各标记点随时间的运动,可以计算心脏特定区域的

心肌活动能力,从而能够对一些早期心脏病进行预测(例如冠状动脉局部不畅而导致区域内供血不良引起心肌活动能力减弱)。

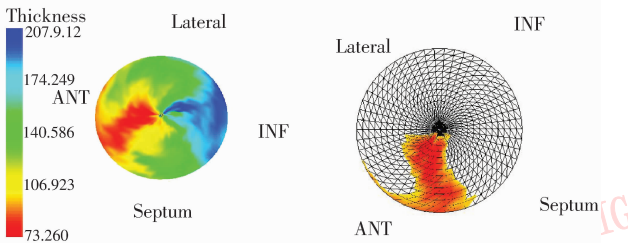


图 5 左心室灌注密度图和病变状况图

Fig. 5 The perfusion density and abnormality of left ventricles

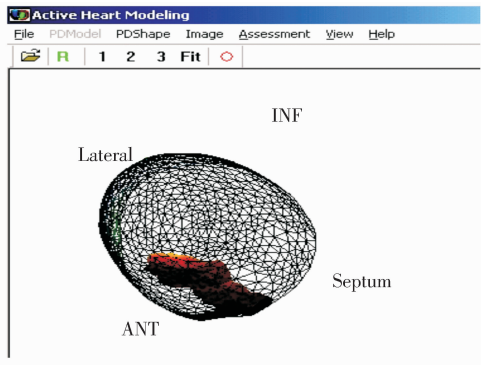


图 6 左心室灌注密度病变预测图(3 维)

Fig. 6 The illustration in 3D for ventricle perfusion density and abnormality

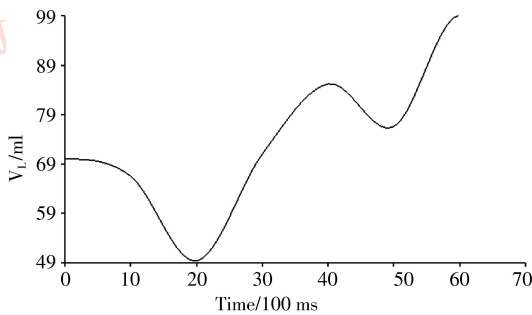


图 7 从 4 维图像中分析左心室容积在一个心脏周期内的变化曲线

Fig. 7 The volumetric curve of left ventricle in a heart cycle

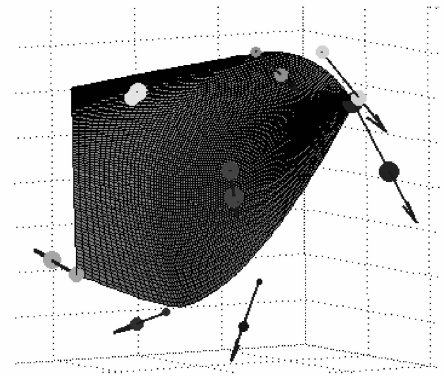


图 8 从 4 维图像中分析心肌的运动特征

Fig. 8 The myocardium motion characteristics analyzed from the 4D images

## 4 结 论

为了从 4 维医学图像中拟合出人体心脏的 3 维模型,研究实现了一种可靠的柔性建模法以表达心脏的静态和动态特征,并通过模型来计算心脏的功能指标。文中运用了一种新的图像分割思想,不仅可以得到心脏解剖学意义上的形状,同时还能给出形状的变化范围和概率分布密度,从而克服了传统图像分割方法不能可靠地确定组织的真实边界的问题。由于现有的建模技术很难实现形状随时间变化的图形分割,本文的活动形状建模法能可靠地和完整地不确定形体进行模型拟合。这种方法因此比较适合于心脏和其他人体组织的 3 维模型描述和分析。实验中,该研究演示了自动对病人图像进行静态分析和多相位动态分析,并从建立的模型计算出表征心脏功能的临床参数指标,不仅可以辅助医生更好地分析心脏的功能,进行疾病预防和治疗,更可能帮助对早期心脏疾病进行发现和诊治。

志谢 作者曾得到西班牙科技部资助并在萨拉戈萨大学图像计算实验室工作,后又得到德国洪堡基金资助在汉堡大学从事相关研究,期间得到了 A. Frangi 教授、S. Ordas 博士和 J. Zhang 教授等在相关方面的重要帮助。另外还有许多研究人员对论文涉及的内容进行了一定的实验工作和方法讨论。

## 参考文献 (References)

- [1] World Health Organization. Atlas of Heart Disease and Stroke [EB/OL]. (2009-09-01)[2010-01-16]. <http://www.who.int/>.
- [2] Writing group members of american heart association. Heart disease and stroke statistics—2009 update [J]. *Circulation*, 2009, 119(3), e21-e184.
- [3] Qin An, Feng Qianjin, Chen Wufan. A new associated scheme for segmentation and tracking of endocardium and epicardium from MR cardiac image sequences [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(1):80-88. [秦安, 冯前进, 陈武凡. MR 心脏序列图像左心室内外壁联合分割和时序追踪新方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(1):80-88.]
- [4] Wang Yuanquan, Jia Yunde. Method for segmentation of the endocardium and epicardium of the left ventricle in cardiac magnetic resonance images [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(5):1176-1184. [王元全, 贾云得. 一种心脏核磁共振图像左室壁内、外膜分割方法 [J]. *软件学报*, 2009, 20(5):1176-1184.]
- [5] Xiao Pengfei, Huang Fang, Li Xianliang. Heart modeling of finite element based on rapid generation of tetrahedral mesh [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(9):223-227. [肖鹏飞, 黄芳, 李显良. 基于快速建立四面体网格的有限元心脏建模 [J]. *计算机仿真*, 2008, 25(9):223-227.]
- [6] Sharma N, Okere I C, Duda M K, et al. Potential impact of carbohydrate and fat intake on pathological left ventricular hypertrophy [J]. *Cardiovascular Research*, 2007, 73(2):257-268.
- [7] Slomka P J, Fieno D, Thomson L, et al. Automatic detection and size quantification of infarcts by myocardial perfusion SPECT: clinical validation by delayed-enhancement MRI [J]. *Journal of Nuclear Medicine*, 2005, 46(5):728-735.
- [8] Yang Liu, Rao Li, Zheng Changqiong, et al. Quantitative functional evaluation on right ventricle with auto-segmentation and three-dimensional reconstruction [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2008, 25(2):285-290. [杨柳, 饶莉, 郑昌琼, 等. 用自动分割和动态三维重建实现右心室功能定量评价 [J]. *生物医学工程学报*, 2008, 25(2):285-290.]
- [9] You Jianjie, Wang Ping'an, Xia Deshen. Tagged cardiac magnetic resonance images segmentation using texture information [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(9):1621-1626. [尤建洁 王平安 夏德深. 利用纹理信息的带标记线心脏核磁共振图像分割 [J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(9):1621-1626.]
- [10] Chen Qiang, Zhou Zeming, Wang Ping'an, et al. Automatic segmentation of tagged left ventricle MR images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(6):666-673. [陈强, 周则明, 王平安, 等. 带标记线左心室 MR 图像的自动分割 [J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(6):666-673.]
- [11] Wang Cheng, Zhang Jiange, Jiang Xufeng, et al. Knowledge-based automatic extraction of left-ventricular myocardial region from 3D nuclear medicine image [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2007, 26(01):19-23, 34. [王成, 张剑戈, 江旭峰, 等. 基于知识的三维核医学图像左心室心肌区的提取 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2007, 26(01):19-23, 34.]
- [12] Yamamuro M, Tadamura E, Kubo S, et al. Cardiac functional analysis with multi-detector row CT and segmental reconstruction algorithm: comparison with echocardiography, SPECT, and MR imaging [J]. *Radiology*, 2005, 234(2):381-390.
- [13] Germano G, Kiat H, Kavanagh P B, et al. Automatic quantification of ejection fraction from gated myocardial perfusion SPECT [J]. *Journal of Nuclear Medicine*, 1995, 36(11):2138-2147.
- [14] Liu Fuchang, Zhu Jin, Yang Yafang, et al. Graph cuts and shape statistics based cardiac MR image segmentation using active contours model [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2009, 22(2):275-281. [刘复昌, 朱进, 杨亚芳, 等. 基于图划分的形状统计主动轮廓模型心脏 MR 图像分割 [J]. *模式识别与人工智能*, 2009, 22(2):275-281.]
- [15] Zhang Jianhua, Chen Shengyong, Liu Sheng, et al. Active detection and correction of shape distortions based on moment invariants for active shape models [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(9):1886-1894. [张剑华, 陈胜勇, 刘盛, 等. ASM 中基于不变矩图形畸变主动检测与修正 [J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(9):1886-1894.]
- [16] Chen Shengyong. Computing a middle time-point model from multiple point distribution models [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(5):871-878. [陈胜勇. 柔性体点分布模型的时变插值算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(5):871-878.]
- [17] Zhang Ning, Feng Qianjin, Qin An, et al. Wavelet-based multiscale DDGVF snake model for cardiac magnetic resonance images segmentation [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2009, 28(2):183-188. [张宁, 冯前进, 秦安, 等. 小波多尺度动态方向梯度矢量流与心脏核磁共振图像分割 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2009, 28(2):183-188.]
- [18] Jeetley P, Burden L, Stoykova B, et al. Clinical and economic impact of stress echocardiography compared with exercise electrocardiography in patients with suspected acute coronary syndrome but negative troponin: a prospective randomized controlled study [J]. *European Heart Journal*, 2007, 28:204-211.
- [19] Kistler P M, Earley M J, Harris S, et al. Validation of three-dimensional cardiac image integration: use of integrated CT image into electroanatomic mapping system to perform catheter ablation of atrial fibrillation [J]. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 2006, 17(4):341-348.
- [20] Martin T N, Groenning B A, Dargie H J. Diagnosing acute myocarditis using cardiac MRI [J]. *European Heart Journal*, 2006, 27(4):468.
- [21] Wang Minqin, Han Guoqiang, Tu Yongqiu. Survey of medical image segmentation based on deformable models [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2009, 30(2):37-39. [王敏琴, 韩国强, 涂泳秋. 基于形变模型的医学图像分割综述 [J]. *医疗卫生装备*, 2009, 30(2):37-39.]
- [22] Gong Yongyi, Luo Xiaonan, Jia Weijia, et al. Medical image registration based on modified spring-mass model [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(7):1224-1233. [龚永义, 罗笑南, 贾维嘉, 等. 基于改进的弹簧质子模型的医学图像配准 [J]. *计算机学报*, 2008, 31(7):1224-1233.]