

面向移动智能终端的人体心率监护系统设计及实现

魏琪¹, 林增刚¹, 郭阳明¹, 孔德岐², 张双²

(1. 西北工业大学 计算机学院, 西安 710072;

2. 航空工业西安航空计算技术研究所, 西安 710068)

摘要: 高质量的长期健康医疗监护逐渐成为全世界人们关注的焦点; 为预防突发心脏病所带来的风险, 论文结合临床最常见的健康指标心率, 采用基于随机森林的心率预测模型, 设计了一款面向移动智能终端的可穿戴、可交互, 具有实时心率采集、异常心率检测和心率异常预警等功能的小型人体心率监护系统; 实验结果表明, 该心率监护系统能实现用户心率的实时监测和未来时刻心率的预测, 心率预测正确率可达 86.67%, 预测精确度可以满足用户的需求。

关键词: 医疗监护; 心率预测; 移动智能终端; 随机森林

Design and Implementation of Human Heart Rate Monitoring System Based on Mobile Intelligent Terminals

Wei Qi¹, Lin Zenggang¹, Guo Yangming¹, Kong Deqi², Zhang Shuang²

(1. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710068, China)

Abstract: High-quality long-term health care monitoring has gradually become the focus of attention around the world. In order to prevent the risk of sudden heart disease, this paper combines the heart rate of the most common health indicators in clinical practice, and adopts a random forest-based heart rate prediction model to design a small human heart rate monitoring system for mobile intelligent terminals. The system features wearable, interactive, real-time heart rate acquisition, abnormal heart rate detection, and heart rate anomaly alerts. The experimental results show that the heart rate monitoring system can realize real-time monitoring of heart rate and prediction of heart rate in future time. The correct rate of heart rate prediction can reach 86.67%, and the prediction accuracy can meet the needs of users.

Keywords: medical care; prediction of heart rate; mobile intelligent terminal; random forest

0 引言

随着医学的发展, 医疗模式已经从传统的以发现病症再治疗为中心逐渐转变为预防、早诊、早治的模式。通过对采集的生理信息进行分析, 可以详细了解人体健康状况, 提前发现潜伏期的病发症, 从而达到疾病预防和医疗保健的目的^[1]。当前, 心脏病已经成为威胁人类生命的主要因素之一, 持续监护人体心脏功能, 防止心脏疾病突发变得越发重要。因而, 具有心脏监护功能的系统受到人们的广泛关注^[2]。

目前, 国内外众多研究团队提出了基于移动智能终端

的人体心脏监护解决方案。如, Richer 等人^[3]提出了基于 Android 手机的心率反馈系统, 并将其与 Android wear 相结合, 取得了较大的用户满意度; Yen 等人^[4]、Makki 等人^[5]提出了基于心电异常检测的心电图分析方法; Gradl 等人^[6]提出一种基于 Android 移动设备的实时心电监测和心率异常检测算法; Hasan 等人^[7]提出了远程血压监测系统; Boudra 等人^[8]借助 Android 和 Java 技术开发了基于传感器和无线传感器网络的智能医疗监控系统。但这些现有的研究基本上都是围绕算法的开发, 并且侧重点都是对当前时刻人体健康状况的评估, 对用户未来的身体状况不具有预测和指导功能。

为此, 针对现有人体心脏监护研究存在的问题, 为有效预防突发心脏病带来的风险, 本文选用随机森林预测模型, 设计了一款在日常生活中可用的新型心率监护系统。该系统具有人体心电信号采集、心率异常检测、实时心率显示以及未来心率状态预测功能, 能为用户提供有效的心率预测和健康指导, 降低了心脏病带给用户的危害。

1 系统架构及原理

针对心率采集设备对电池续航、空间体积及检测精度

收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-06-10。

基金项目: 国家某重点科研项目资助(MJ-2016-S-42); 国家某重点科研项目资助(MJ-2018-S-34)。

作者简介: 魏琪(1993-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事移动智能终端的可信环境分析方向的研究。

通讯作者: 郭阳明(1978-), 男, 河南南阳人, 教授, 主要从事复杂系统可靠性设计与近似计算, 面向物理信息系统的智能感知与赛博安全方向的研究。

的严格要求, 设计低时延、高精度、交互友好的心率监护系统由心率采集模块、数据传输模块和 Heart 软件三部分组成。系统的总体架构设计如图 1 所示。

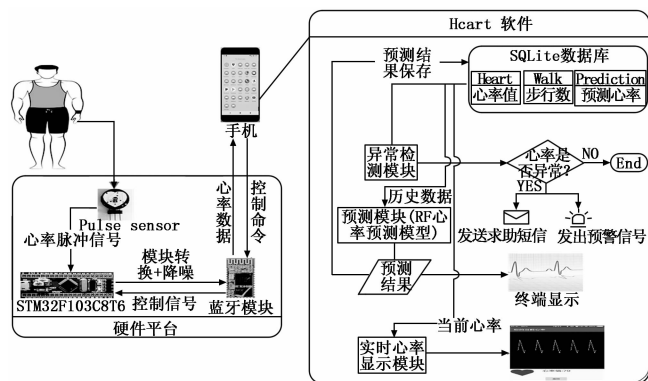


图 1 心率监护系统总体架构

图 1 中, 心率采集模块由心率传感器 Pulse Sensor 以及 STM32 核心板组成, 佩戴于人体的 Pulse Sensor 采集到心率脉冲信号, 通过 STM32 进行模数转换和降噪处理得到精确的心率值; 数据传输模块采用当前流行的蓝牙低功耗传输模式^[9], 选取设备 HC-05 蓝牙模块与智能手机之间进行数据交互, 数据传输速率可达 2Mbps; Heart 是基于 Android 平台开发的一款人机交互软件, 该软件包括异常心率检测、心率预测和实时显示 3 个功能模块。

2 系统硬件设计

本文设计的硬件平台主要包含心率传感器 Pulse Sensor、STM32 核心开发板和 HC-05 模块 3 个组件。其中, STM32 为控制核心, 控制传感器实时采集人体心率信号, 经过信号分析处理, 由蓝牙模块将心率数据传输至移动端与用户进行交互。心率监护系统硬件平台完成的功能有, 心电信号采集、信号处理以及数据传输, 其总体架构如图 2 所示。

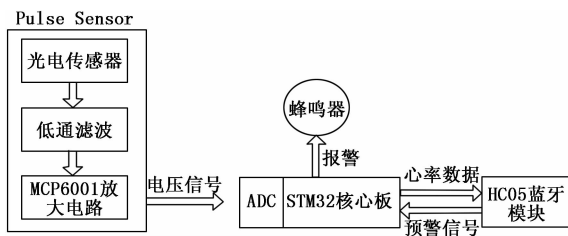


图 2 系统硬件平台架构

2.1 心电信号采集

在对心率测量方法研究中发现, 传统的测量方法会限制人体的活动, 若长时间使用会增加用户生理和心理上的不适感。这对于心率监护系统来说, 极大地影响了其应用效果, 降低了系统可靠性。

为方便采集人体心电信号, 增加硬件平台的续航能力和采集数据的真实性, 本系统采用光电容积法进行脉搏测量, 选用体积小, 功耗低的心率传感器 Pulse Sensor 对心电信号进行采集, 其基本原理是利用人体组织在血管搏动时所造成

透光率的不同来采集心电信号。将传感器佩戴于手部, 可完成心电信号的采集。Pulse Sensor 内部结构如图 3 所示。

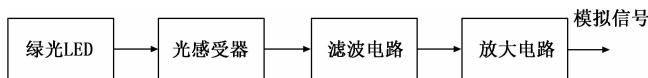


图 3 Pulse Sensor 内部结构

2.2 心电信号处理

利用心率传感器 Pulse Sensor 采集的人体心电信号是模拟信号, 在原始信号中存在重搏波, 会对心率统计产生较大的噪声干扰, 如图 4 所示。因此, 需要对原始信号进行降噪、模数转换和统计计算等处理过程, 从而使统计结果更为准确。为此, 本文结合 STM32 核心板低功耗、体积小和强抗干扰的特性, 将 STM32 作为系统主控制器, 接收 Pulse Sensor 采集到的心电信号并完成信号的处理。

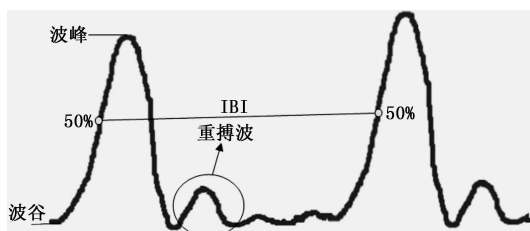


图 4 心电信号

首先 STM32 通过 ADC 单元采集传感器输出的脉搏模拟信号, 根据心跳特性将采样率设为 500 Hz。然后追踪脉搏波的上升, 为使心跳检测更为精确, 本系统每隔 0.6 个 IBI (两次心跳时间间隔) 才开始追踪脉搏信号, 从而避开了重搏波的峰值。最后, 考虑到突发干扰信号影响, 心率计算根据脉搏波上升段的中间值之差来确定 IBI 数值, 并将连续获得的 10 次 IBI 值进行平均, 利用该均值来计算实际心率。假设当前心率为 n , 则心率计算公式如下:

$$n = \frac{60}{10 \sum_{i=1}^{10} IBI_i} \quad (1)$$

STM32 处理得到精确的心率数据, 通过搭载的 HC-05 蓝牙模块传输至 Android 端的 Heart 软件, 为心率异常检测和预测提供数据支持。

3 系统软件设计

3.1 心率异常检测

统计结果表明, 在静息状态和运动状态下的正常心率范围各不相同, 且范围幅值也参差不齐^[10]。本系统为满足用户对于心率异常检测准确性的需求, 对用户进行为期一周的心率数据建模, 在建模过程中, 系统会根据所统计用户每一时段内的运动步数, 将静息与运动两种状态下的心率模型进行区分, 以提高异常检测的精度。

采用心率数据建模的方式, 能够得到正常心率范围的衡量标准, 但是模型建立的准确性问题也是需要解决的一个难点, 为防止在建模过程中某一时刻的异常心率被当作有效数据记录, 用户可随时中止数据建模过程, 并将异常

时段数据从记录中删除, 从而保证模型的准确性。

由于人体心率容易受到情绪、饮食等众多因素的影响, 为了避免外界因素带来的异常检测错误, 本文结合医学上对于心脏骤停期的分析^[11-12], 设计了如下异常检测策略, 其伪代码如表 1 所示。

表 1 心率异常检测策略

心率异常检测策略
输入: 当前心率 rate
输出: 心率异常 true / false
H_RGR: 经统计得到的用户静息状态下的心率上限;
L_RGR: 经统计得到的用户静息状态下的心率下限;
H_EER: 经统计得到的用户运动状态下的心率上限;
L_EER: 经统计得到的用户运动状态下的心率下限;
While (true) {
if (rate > H_RGR rate < L_RGR) {
RGR_Sign ++;
} else {
RGR_Sign = 0;
}
if (rate > H_EER rate < L_EER) {
EER_Sign ++;
} else {
EER_Sign = 0;
}
if ((RGR_Sign == 6 && 静息状态) (EER_Sign == 6 && 运动状态)) {
发出异常预警;
发送求助信息;
RGR_Sign = 0;
EER_Sign = 0;
}
}

(1) 系统对接收到的心率值进行判断, 若超出正常阈值则对异常信号进行累加并执行 (2), 否则重置异常信号, 继续执行 (1);

(2) 检测异常信号是否达到预先设定的门限值, 若达到则执行 (3), 否则执行 (1);

(3) 系统发出预警信号, 提示用户采取心肺复苏措施, 并立即向预先设定的联系人发出求救信息, 执行 (4);

(4) 重置异常信号, 继续执行 (1)。

3.2 心率预测

利用机器学习中的预测算法可以对心率进行预测, 进而为用户提供正确的健康指导, 避免突发心脏病带来的风险。然而, 不同的预测模型在进行模型训练时, 会存在如下问题^[13-14]: (1) 对训练集进行学习的过程中, 计算成本大, 内存占用高; (2) 模型泛化能力较弱, 对新加入样本不具有很强的适应能力, 预测精度低; (3) 存在过拟合及欠拟合现象。因此, 对于不同的应用场景, 预测模型的选择至关重要。

为此, 为了实现心率预测的准确性和高效性, 本文结合心率样本数据的特性, 选择基于随机森林的心率预测模型。该模型的基本思想是: 从训练样本中随机选取部分特征来构建独立的回归树, 然后重复这个过程, 且保证每次都是等概率地抽取特征, 直到构建了足够多且相互独立的树, 将所有回归树的预测结果求均值得到最终的心率预测结果^[15-16]。随机森林心率预测模型实现步骤如下:

(1) 从本系统的 SQLite 数据库中收集用户历史数据构成样本集;

(2) 利用 Bootstrap 自助采样方法从原始心率样本集中所有 n 个样本中抽取 k ($k < n$) 个样本组成新的训练集, 用于创建单棵回归树, 剩余样本构成袋外 (out-of-bag, OOB) 样本数据集, 以测试回归树的 OOB 误差, 评价回归树性能;

(3) 重复步骤 2, 产生 T 个训练集, 用于构建 T 棵回归树, 组成一片“森林”。回归树生长过程中, 在每个非叶子节点进行分支前, 选择全部 p 个属性中的 m ($m < p$) 个, 作为当前节点的分裂候选属性, 并选取均方差最小原则进行属性划分;

(4) 每棵树都完全生长, 直到叶子节点;

(5) 利用“森林”中每棵回归树对测试样本进行测试, 得到 N 个对应的预测结果, 所有预测结果取均值即为最终的预测结果。

本文采用的随机森林预测模型, 利用 Bootstrap 抽样得到不同的样本集分别构建回归树模型, 增加了模型间的差异, 从而提高了模型的外推预测能力。

3.3 数据可视化

为了满足用户对于系统高响应、低时延、操作便捷的要求, 本系统可视化功能基于 Android SDK 8.1 开发实现。该系统提供了友好的用户交互功能, 能够为用户提供直观的心率变化状态以及正确的健康指导。本文列出了部分功能模块的截图, 如图 5 所示。

蓝牙连接完成 Heart 软件与下位机间通信链路的建立; 联系人设置需要用户指定至少一个联系人作为心率异常时的求助对象; 心率显示可以从数据库中读取当前时刻的心率进行显示, 并对心脏跳动波形进行了模拟仿真; 心率历史变化通过统计用户每小时的平均心率, 利用 MPAndroid-Chart 绘制出心率变化图, 使用户更加直观的了解 24 小时内自身心率的变化情况。

自左向右依次为: 主菜单; 蓝牙连接界面; 联系人设置界面; 心率显示界面; 心率历史状态变化界面

4 实验结果与分析

4.1 心率测量准确性分析

为了验证本系统人体心率测量的准确性和实用性, 将心率监护系统与智能穿戴中的光学心率传感器进行了对比实验。实验分为 5 个不同时段进行, 每个时段连续采集 10 组心率数据, 共计 50 组。从图 6 的实验结果可知, 本系统心率测量结果与光学心率传感器保持了较高的契合度。

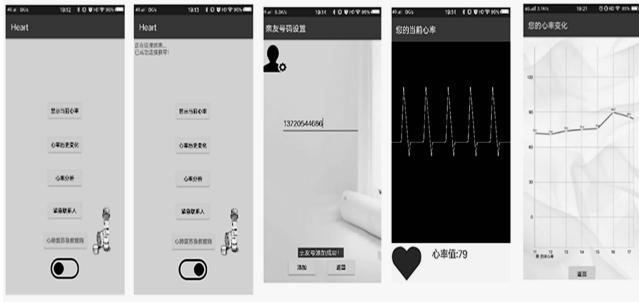


图 5 心率监护系统功能图

采用均方误差 MSE 作为本系统心率测量准确度的量化评估依据, 定义为:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - F_i)^2 \quad (2)$$

式中, f_i 为心率监护系统的测量值, 为光学心率传感器的测量值, n 取 50。经计算, 本系统与光学心率传感器两组测量结果的均方误差仅为 17.56。由此可见, 本系统作为心率测量具有一定的实用价值。

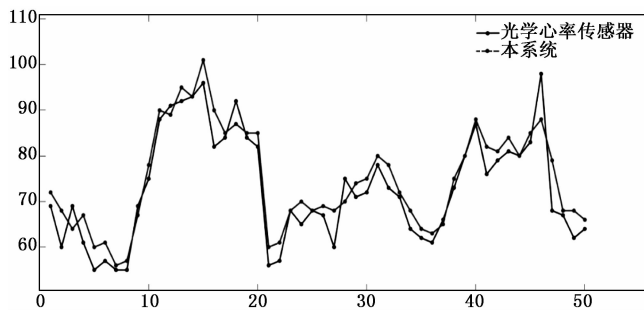


图 6 心率测量准确性评估

4.2 心率预测准确性分析

心率预测实验选取用户 SQLite 数据库 8 天的心率值、步行数、同时段最高和最低心率等数据共计 1 152 条作为样本, 采集的时间间隔为 1 次/10 min。选取样本集的 97% 作为训练集, 3% 作为测试集。为使心率预测模型简单高效, 且具有较高的精确度, 子树的数量选择为 100, 树的深度不做限制。实验结果如图 7 所示。

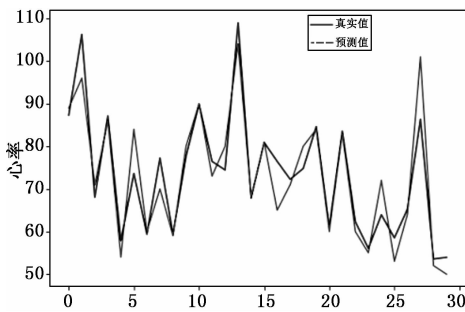


图 7 心率预测结果

由图 7 可以看出, 本系统很好的拟合了心率数据的周期性, 准确地判断出了心率数据起伏趋势。

采用均方误差 MSE 和决定系数 R^2 两个指标作为模型

预测性能量化评估的依据, 分别定义为:

$$MSE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (f_i - y_i)^2 \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中, f_i 为预测值, y_i 为真实值, \bar{y} 为真实值的均值。本系统预测模型的预测结果中, 均方误差为 22.6328, 决定系数 R^2 为 0.8667。因此, 本系统心率预测模型能够很好地实现人体心率数据的准确预测。

5 结束语

本文设计并开发了一款基于 Android 平台的新型人体心率监护系统, 该系统在移动终端为用户提供了友好的交互功能, 使用户在日常生活中即可随时随地了解自身的心脏健康状况。针对突发心脏疾病带来的风险, 该系统结合了医学上关于心脏骤停期的分析研究, 提出了心率异常检测策略, 当系统检测到异常发生时向紧急联系人发送求救信号, 以避免意外的发生。此外, 该系统选用随机森林的心率预测模型对用户心率变化状态进行预测, 利用 sklearn 框架进行算法仿真, 模型预测准确度达到 86.67%。因此, 该系统对人体健康管理具有指导意义, 满足了用户当前的需求。后续的工作中将在实时性方面做进一步完善, 同时加入陀螺仪等传感器, 对人体行为特征进行识别, 进一步提高模型的预测精度。

参考文献:

- [1] 贾震宇, 王 维, 王 琛, 等. 可穿戴设备在医疗领域中的应用发展 [J]. 中国医疗设备, 2017, 32 (2): 96-99.
- [2] 陈 欣. 基于智能手机 Android 平台的远程医疗监护系统的设计 [D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [3] Robert Richer, Tim Maiwald. Novel Human Computer Interaction Principles for Cardiac Feedback using Google Glass and Android Wear [J]. IEEE, 2015.
- [4] Yen T. H., Chang C. Y., and Yu S. -N., A portable real-time ECG recognition system based on smartphone [A]. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of IEEE [J]. IEEE, 2013, pp. 7262-7265.
- [5] M. M. Makki, G. A. Saade, A. G. Altouma, S. Al-Terkawi, A. Baobeid, and R. Tafreshi, Acquiring and analyzing electrocardiograms via smartphone to detect cardiovascular abnormalities, Biomedical and Health Informatics (BHI), 2014 IEEE-EMBS International Conference on. IEEE [C]. 2014, pp. 277-280.
- [6] S. Gradl, P. Kugler, C. Lohmüller, and B. Eskofier, Real-time ECG monitoring and arrhythmia detection using Android based mobile devices [A]. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE [C]. IEEE, 2012, pp. 2452-2455.