

基于可穿戴传感器的实时心电检测方法研究

孟 瑶

(辽东学院 信息工程学院, 辽宁 丹东 118000)

摘 要: 为了实时监控人体的心电信号,以胸带作为穿戴载体,设计一个可穿戴心电检测系统。内嵌于胸带的心电传感器采集佩戴者心电信号,通过蓝牙传输至移动设备应用程序,实现心电信号及心率的实时显示。所实现的心电检测算法基于自适应阈值,检测心电信号的 R 波并计算实时心率。设计和实施了实地实验以检测系统和算法性能。结果表明,心率检测算法的 R 波检测错误率为-1.99%,较好地适应了可穿戴心电传感器采集的信号。

关键词: 可穿戴计算;智能传感器;心电检测

中图分类号: TP311.52

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2021.04.012

引用格式: 孟瑶. 基于可穿戴传感器的实时心电检测方法研究[J]. 信息技术与网络安全, 2021, 40(4): 75-79.

Study of real-time electrocardiogram detection based on wearable sensors

Meng Yao

(School of Information Engineering, Eastern Liaoning University, Dandong 118000, China)

Abstract: In order to monitor the electrocardiogram(ECG) of human body in real time, a wearable ECG detection system is designed using a chest strap as the wearable carrier. The ECG sensors embedded in the chest strap collects the wearers' ECG signal and transmits it to the mobile application via Bluetooth. The application displays real-time ECG signal and heart rate. The implemented ECG detection algorithm detects the R wave of ECG signal based on adaptive threshold, and calculates real-time heart rate. A field experiment is designed and conducted to evaluate the performance of the system and algorithm. The results show that the error rate of R wave detection is -1.99%, which is suitable for the signal collected by the wearable ECG sensors.

Key words: wearable computing; smart sensor; electrocardiogram detection

0 引言

随着信息技术的快速发展和人们对高质、高效保健的更多需求,可穿戴传感器技术在健康监测方面的应用备受关注^[1]。可穿戴健康系统可以弥补传统医疗设备的局限性,提供有关个人的长期健康状况反馈,乃至健康威胁警报^[2],因此有望变革医疗保健,实现对健康隐患的及时发现和解决、疾病的有效预防以及慢性病的更好理解 and 自我管理^[3]。

该类系统通常使用集成在可穿戴设备中的微型传感器来测量诸如心电图(ECG)、血压、活动、温度等生物信号,并据此反馈与佩戴者及其所处环境相关的生理和情境信息^[4],其强调低生理负荷甚至无负荷的信息采集,对机体的日常活动基本没有干扰,可应用于临床监护、家庭保健、体育训练等领域^[5]。例

如,刘远柯^[6]针对老年人的日常监护,设计了一套人体生理信息及姿态的监测系统,实现了心电、心率、体温和运动状态的实时监测,并提供心电异常和意外跌倒的识别与报警;洪岩等^[7]设计了应用于智能服装的人体生理指标与服装微气候监测系统,其通过体温和心率反映人体的生理状况,通过湿度和温度了解身体舒适度;李正明等^[8]设计了一种生理健康监控系统,采用温度、脉搏等传感器进行前端感知,利用蓝牙技术实现与智能手机终端的通信,智能手机接收、处理和存储生理参数,并通过远程监控平台向监护人和医疗组织提供数据监控;李金明^[9]设计了一种多参数心脏远程监测系统,采集单元负责信号采集和蓝牙通信,Android 客户端实现心电、心音和脉搏信号的波形显示、存储、删除及上传,云服

务器实现三种生理信号的云端存储;占峰松^[10]设计和实现了一款可穿戴心电监测系统,可实时采集、存储和处理心电信号,对其进行特征提取和参数计算,并基于预置或自定义规则实时检测心电异常;李润川等^[11]设计和实现了一款健康监测系统,其借助可穿戴心电检测仪采集心电信号,传输至云平台供医生查看和诊断,并将结果派发给手机端显示;高鹏彪^[12]设计和实现了一种可穿戴健康监测系统,可检测人体血压、体温、心率、体脂率等生物信号,并通过蓝牙与手机移动端通信实现远程控制和监测。

心电图是心脏随时间变化的电活动记录。这种常见的非侵入性测量通常是通过将电极固定在受试者胸部区域来获得的^[13]。可穿戴传感器采集的 ECG 大多是在人体动态条件下记录的,信号受到了各类噪声和伪影的影响^[14],因此相较传统 ECG 监护仪,可穿戴 ECG 的处理更具难度。本文设计和实现了一种基于可穿戴传感器的实时心电检测系统。通过穿戴胸带内嵌的传感器,采集佩戴者的心电信号并传输至移动设备。安装于移动设备的应用程序接收心电信号,使用自适应心电检测算法进行实时分析,显示心电信号及实时心率。实地实验验证了本文方法的有效性与可行性。

1 可穿戴心电检测系统

该可穿戴心电检测系统包括可穿戴胸带和移动应用程序两部分。可穿戴胸带包括传感器模块、电路模块、通信模块和电源模块。传感器模块使用心电传感器采集心电信号;电路模块汇集和控制信号;通信模块使用蓝牙实现胸带和移动设备的无线通信;电源模块用于供电。移动设备(如智能手机、平板电脑等)安装有专门的应用程序,其接收和处理心电信号,并实时展示心电信号和心率。

1.1 可穿戴胸带

如图 1 所示,可穿戴胸带使用 3 个内置 ECG 传感器(采样率 240 Hz)来感知佩戴者心脏活动。传感器信号通过数字纱线发送至信号调节电路,无线转发至移动设备,实现对心脏状况的实时监测。该过程降低了运动伪影和测量噪声,提高了心电图的稳定性和 QRS 波群的检测率。

1.2 移动应用程序

移动应用程序接收可穿戴胸带传输的心电信号,于其界面显示心电信号和采用自适应心电检测算法提取的实时心率,如图 2 所示。



图 1 可穿戴胸带



图 2 心电信号和心率

2 自适应心电检测算法

采集自心电传感器的信号波形类似标准导联 II 心电图,故对文献[15]开发的 QRS 检测算法进行改进以适应本系统心电信号。为满足实时计算的需求,算法以重叠滑动窗口的方式,对输入的心电信号进行分段处理,具体包括以下步骤:

(1)设置滑动窗口的起始位置,窗口大小缺省值为 512,获取窗口内的原始心电信号(图 3(a))。

(2)对窗口内信号应用均值滤波器和带通滤波器对心电信号进行平滑降噪(图 3(b))。

(3)对滤波后的信号依次进行微分(图 3(c))、逐点平方(图 3(d))和移动窗口积分(图 3(e))。

(4)基于积分波形的峰值,导出阈值,据此检测 QRS 波群的 R 波(图 3(f))。

(5)计算当前 R 波和前一个 R 波之间的位置间隔,即 RR 间隔。

(6)基于过去 5 个 RR 间隔和 R 波峰值的平均值,计算自适应阈值;当不足 5 个时,使用所有已知 RR 间隔和 R 波峰值;阈值初始值为 0。

(7)根据 RR 间隔和 R 波峰值的自适应阈值以及当前 RR 间隔和 R 波峰值,评估当前 R 波的合法性。

(8)若当前 R 波合法,结合采样率,计算当前心率(次/分钟)。

(9)根据当前 R 波结束位置,确定下一个窗口的起始位置。

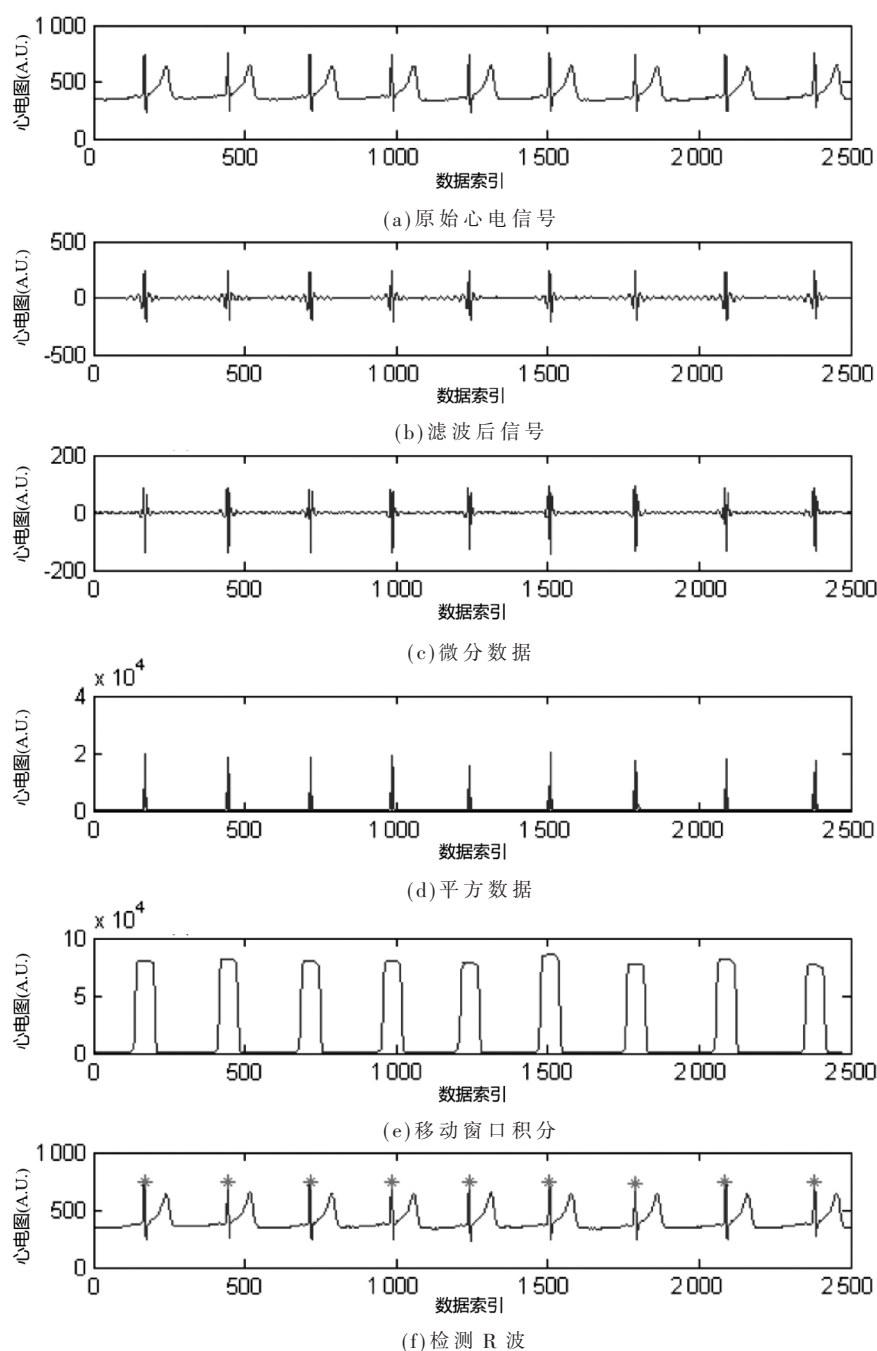


图3 心电检测

(10)重复以上步骤,直到处理完所有信号。

3 实地实验

为了评价系统和自适应心电检测算法的性能,设计和实施了实地实验。

3.1 方法

8名受试者参与了实地实验,其身体特征的描述性统计信息(均值、标准差和范围)如表1所示。受试者佩戴胸带,使用跑步机进行运动。

3.2 结果

为了评估心电检测算法性能,将算法检测到的R波数量与实际数量进行了比较。表2显示了每名受试者的实际R波数量、检测R波数量和检测错误率。在8名受试者中,2名受试者检测误差绝对值在0~1%之间;2名受试者检测误差绝对值在1%~2%之间;3名受试者检测误差绝对值在2%~3%之间;1名受试者检测误差绝对值在3%~4%之

表 1 8 名受试者身体特征

项目	均值	标准差	范围
年龄/岁	23.75	2.44	6.00
身高/m	1.76	0.06	0.18
体重/kg	68.88	7.26	22.00
身体质量指数(BMI)	22.22	2.23	7.17

表 2 算法性能

受试者编号	实际 R 波数	检测 R 波数	错误率/%
S01	606	593	-2.15
S02	579	576	-0.52
S03	592	588	-0.68
S04	601	586	-2.50
S05	608	597	-1.81
S06	609	592	-2.79
S07	622	611	-1.77
S08	629	606	-3.66

间(图 4)。

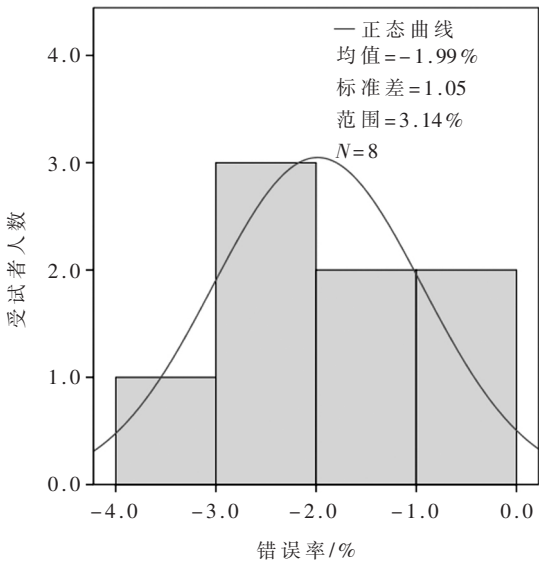


图 4 R 波检测错误率

表 3 显示了检测错误率的描述性统计信息。其中错误率均值为-1.99%，均值在 95%置信水平的置信区间为(-2.86%，-1.11%)，中值为-1.98%，标准差为 1.05，最小值为-3.66%，最大值为-0.52%，范围为 3.14%。

3.3 讨论

为了探讨受试者身体特征对实验结果的影响，采用 Spearman 相关分析了年龄、身高、体重以及 BMI 与错误率之间的关系。如表 4 所示，受试者体重与

表 3 描述性统计信息

错误率/%	统计量		标准误
	均值	-1.99	0.37
	均值的 95%	下限	-2.86
	置信区间	上限	-1.11
	5% 修整均值	-1.97	
	中值	-1.98	
	方差	1.10	
	标准差	1.05	
	极小值	-3.66	
	极大值	-0.52	
	范围	3.14	

表 4 身体特征与错误率相关性

身体特征	年龄	身高	体重	BMI
错误率	-0.247	-0.349	-0.755*	-0.405

* 表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾)

错误率的相关系数为-0.755($p<0.05$)，说明受试者体重与错误率之间存在高度负相关。

为了分析 R 波检测错误成因，对比了实际 R 波数量和检测 R 波数量。如图 5 所示，所有受试者都产生了低估 R 波数量的情况，这主要是由于人体活动会产生运动伪影和测量噪声，从而导致了 R 波漏检现象。图 6 展示了出现该类情况的心电信号，在下标 4 000~4 600 之间遗漏了若干 R 波，因此低估了从该段信号获得的瞬时心率。当这种漏失现象频繁发生时，R 波总数量可能会被低估。

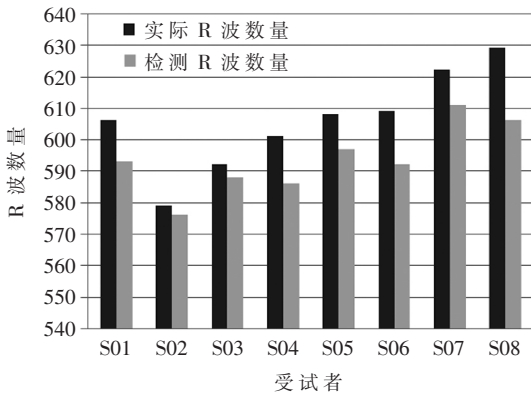


图 5 低估 R 波数量

因此，该算法可以在正常步行情况下表现良好，但是运动伪影和测量噪声对算法性能的降低起到了一定作用，意味着在高强度活动中可能会获得降低的性能，因为在这些活动中会产生更多的伪影和噪声。

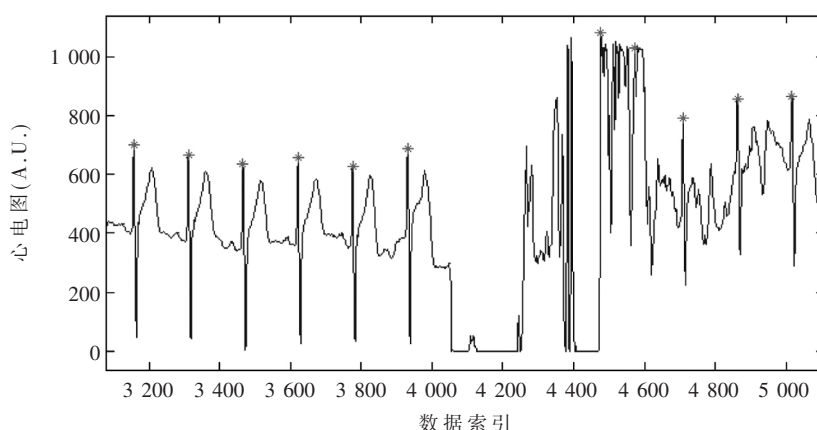


图6 R波漏检

4 结论

本文提出了一种基于可穿戴胸带和移动应用程序的心电检测方法,其提供与心电信号相关的实时反馈。移动应用程序实现了自适应心电检测算法,其利用胸带内嵌的心电传感器采集的信号,检测瞬时心率。招募了8名受试者进行实地实验,对系统和算法性能进行了测试。结果表明,检测R波数量错误率为-1.99%,检测到了96%以上的R波。下一步研究可扩大受试者范围以更全面地测试算法性能,也可改进算法以降低错误率。

参考文献

- [1] PARK S, JAYARAMAN S. Smart textile-based wearable biomedical systems: a transition plan for research to reality[J]. IEEE Transaction on Information Technology in Biomedicine, 2010, 14(1): 86-92.
- [2] MENG Y, KIM H C. Wearable systems and applications for healthcare[C]. Proceedings of the First ACIS/JNU International Conference on Computers, Networks, Systems, and Industrial Engineering, 2011: 325-330.
- [3] ALEXANDROS P, NIKOLAOS G B. A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews), 2010, 40(1): 1-12.
- [4] MSHALI H, LEMLOUMA T, MOLONEY M, et al. A survey on health monitoring systems for health smart homes[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2018, 66: 26-56.
- [5] 李延军, 李莹辉, 余新明. 穿戴式健康监测设备的现状与未来[J]. 航天医学与医学工程, 2016, 29(3): 229-234.
- [6] 刘远柯. 基于身体传感网络的人体生理及姿态监测系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [7] 洪岩, 杨敏, 陈雁. 人体生理指标与服装微气候监测系统研发[J]. 纺织学报, 2013, 34(1): 996-100.
- [8] 李正明, 于勇亮, 许伯强. 一种基于物联网的生理健康监测系统[J]. 电子器件, 2015, 38(5): 1037-1041.
- [9] 李金明. 基于 ANDROID 平台的多参数心脏远程监测系统设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [10] 占峰松. 面向穿戴应用的心电信号处理方法及软件实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [11] 李润川, 冯盼盼, 王淑红, 等. 基于云计算的智能健康监测系统设计及实现[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(7): 8-13, 64.
- [12] 高鹏彪. 人体生物信息的检测与健康监测系统的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [13] MALIK M, BIGGER J T, CAMM A J, et al. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use[J]. European Heart Journal, 1996, 17(3): 354-381.
- [14] SORNMO L, LAGUNA P. Electrocardiogram (ECG) signal processing[M]. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering, 2006.
- [15] PAN J, TOMPKINS W J. A real-time QRS detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1985, 32(3): 230-236.

(收稿日期: 2020-11-23)

作者简介:

孟瑶(1980-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 可穿戴计算、人机交互。