

Research on Embedded Physiological Signal Feature Extraction Algorithm for Smart Wearable Devices

Jinchao Li Sheng Li*

School of Electronic Information, Xijing University, Xi'an, Shaanxi, 710123, China

Abstract

This paper investigates the key challenges in physiological signal processing for smart wearable devices, with a focus on developing feature extraction algorithms for embedded systems. We conduct a comprehensive analysis of the characteristics of physiological signals collected by wearable devices, along with data quality issues, computational efficiency constraints, and algorithmic adaptability in embedded processing. By systematically evaluating existing feature extraction methods and considering the resource limitations of embedded systems, we propose a lightweight feature extraction framework tailored for wearable devices. The framework incorporates adaptive threshold-based noise suppression, a hybrid extraction strategy combining time-domain and frequency-domain features, and machine learning-optimized feature selection. Research demonstrates that this approach not only ensures effective physiological information extraction but also significantly reduces computational complexity and power consumption, providing an effective technical pathway for real-time and accurate health monitoring in smart wearable devices.

Keywords

smart wearable devices; embedded systems; physiological signals

智能穿戴设备嵌入式生理信号特征提取算法研究

李劲潮 李盛*

西京学院电子信息学院, 中国·陕西 西安 710123

摘要

文章主要从智能穿戴设备在生理信号处理过程中所遇到的主要问题入手, 重点对嵌入式环境下生理信号特征提取算法展开研究。对智能穿戴设备所采集到的生理信号特性以及它在嵌入式处理中所遇到的数据质量问题、计算效率问题、算法适应性问题进行了详细的分析。对目前各种特征提取方法进行梳理、对比, 并考虑嵌入式系统资源限制的特点, 文章提出一套适合于穿戴设备的轻量化的特征提取算法框架。该框架包含用自适应阈值进行噪声抑制的方法、结合时域和频域特征的混合提取策略、用机器学习来优化特征选择的过程。经过研究可知, 在保证生理信息的有效提取的基础上, 可以明显降低算法的计算复杂度以及功耗, 给智能穿戴设备实现实时、准确的健康监测功能提供了一个有效的技术途径。

关键词

智能穿戴设备; 嵌入式系统; 生理信号

1 引言

随着移动健康技术的飞速发展, 智能穿戴设备成了人们进行个人健康监测的主要手段。此类设备可以连续采集使用者的心电、血氧、皮肤电等各项生理指标, 给健康评价以及疾病预警提供基本的数据支持。但是由于穿戴设备体积大小、功耗高、成本高等原因, 使得其嵌入式处理系统面临严

重的资源限制问题。怎样在有限的算力、存储空间里, 完成对复杂生理信号高效特征提取的技术难题就成了限制设备性能和应用价值的主要技术瓶颈。文章以嵌入式系统实际需要为出发点, 对生理信号处理中特征提取部分进行深入研究, 目的在于探究既能保证计算效率又能达到提取精度、适应资源受限环境的轻量化算法方案, 给提高智能穿戴设备的信号处理能力与健康监测水平提供理论依据和技术路线。

【基金项目】国家自然科学基金项目(项目编号: 11974289)。

【作者简介】李劲潮(2001-), 男, 中国河南商丘人, 硕士, 从事嵌入式系统与图像处理研究。

【通讯作者】李盛(1972-), 男, 中国安徽巢湖人, 博士, 教授, 从事生命信息与机器学习研究。

2 智能穿戴设备生理信号处理的技术挑战

2.1 生理信号采集环境与数据质量问题

智能穿戴设备在日常使用过程中会遇到复杂的采集环境, 从而对生理信号质量造成很大的影响。由于设备佩戴位置变化、身体运动引起的伪影、环境电磁干扰等都会使采集得到的原始信号中包含各种各样的噪声。由设备本身带有的电路噪声、运动伪迹、肌电干扰、基线漂移等生理性的原因

而产生的噪声。尤其是运动时，传感器与皮肤之间的压力变化、相对位置的变化都会使信号的幅度和形态发生很大的变化，有效的生理信息就会被严重污染。另外不同的个体之间存在生理上的差别、皮肤特性及佩戴习惯的不同，也会造成信号质量的波动。怎样才能复杂的环境中得到稳定的、可靠的原始数据，这是后面特征提取可以正确进行的先决条件，也是目前穿戴设备所面临的主要的技术问题。

2.2 嵌入式系统的资源约束与算法适应性

智能穿戴设备的嵌入式平台存在严重的计算、存储、功耗等各方面的问题，对生理信号处理算法设计提出特殊的要求。传统的信号处理算法一般是在计算资源丰富的服务器或者桌面环境下开发出来的，它的复杂度大、数据量多的数学运算以及大量的数据存储要求不能直接移植到资源有限的嵌入式系统上。例如，很多先进的频域分析方法都需要很大的缓冲区、很高的精度的浮点运算，这样很快就会消耗掉穿戴设备所剩无几的内存，并且大大提高了功耗。嵌入式处理器一般没有高性能的浮点运算单元，复杂的算法会造成处理延迟变大，不能满足实时监测的要求。所以，开发出可以在低功耗、低内存、低计算复杂度的限制下正常工作轻量化算法，是实现穿戴设备实时生理信号分析的关键。算法的设计要在性能和资源消耗之间找到一个最好的平衡点，即从算法结构、运算精度以及实现方式等各个方面展开创新优化。

2.3 特征提取的实时性与准确性平衡

生理信号特征提取要兼顾实时性以及准确性，在智能穿戴设备的应用中具有很重要的意义。从准确性来说，为了全面地反映生理状态的变化，必须提取出足够多并且有判别力的特征，包含时域特征、频域特征和非线性特征等等。但是复杂的特征提取一般需要较多的计算时间和资源，会影响到系统实时响应的能力。从实时性来讲，穿戴设备的健康监测功能要能迅速地发现生理状态的异常变化，在心脏事件检测等重要的应用里，毫秒级的延迟都会影响到预警的效果。怎样在有限的计算资源之下，选取最有代表性的特征子集，设计出高效的特征提取流程，保证在满足实时性要求的前提下，不会丢失关键生理信息的准确度，这是算法设计所要解决的主要矛盾。这就要求深刻地认识各个特征同生理状态之间联系的特性，根据不同的应用场合来改进设计。

3 嵌入式生理信号特征提取的关键问题分析

3.1 噪声环境下有效特征的稳定提取

在噪声干扰很大的实际使用环境中，怎样才能稳定地提取出反映真实生理状态的有效特征就成了一个主要的难题。运动伪迹、基线漂移等噪声会严重影响信号的时域形态及频谱特性，使基于阈值或者形态学的特征点检测算法失效。心电信号的R波峰值，在运动状态下容易被运动伪迹所掩盖或者产生虚假峰值，从而影响到心率变异性分析的准确性。频域特征也容易受到噪声的影响，运动所引起的低频干扰会对生理信号的低频部分造成污染，使基于功率谱的特

征提取产生偏差。非线性特征熵值、分形维数对噪声更敏感，微小的噪声干扰就会造成计算结果发生较大的变化。因此，要使系统在噪声环境中仍能保持鲁棒性，必须从噪声特性出发，开发出自适应的预处理技术，在特征选择的时候优先考虑抗干扰能力较强的特征类型。

3.2 计算复杂度的控制与资源优化

嵌入式环境给算法的计算复杂度设置了严格的限制，特征提取过程要同时满足实时性要求并且尽量减小计算量。许多传统的特征提取方法存在大量的矩阵运算、迭代计算或者高维变换，计算复杂度和数据长度成非线性增长，不能在资源有限的平台上进行。小波变换虽然在时频分析上具有优势，但是它的多尺度分解过程要进行大量的卷积运算以及内存的访问。同样地，基于相空间重构的非线性特征提取方法要构造出高维度延迟向量来计算复杂的统计量，计算开销很大。怎样在保证特征信息量的基础上简化计算的过程，这是嵌入式算法设计的关键问题。这就需要使用近似计算、查表法、整数运算代替浮点运算等方式，或者开发出适合嵌入式平台优化的简化算法版本。

3.3 特征维度与信息冗余的平衡

生理信号的特征提取容易产生维度灾难、信息冗余等现象。一方面为了全面地描述信号的特性，需要提取出多个维度的特征，包含时域统计量、频域参数、时频特征以及非线性指标等。但是高维的特征向量会加大计算、存储的负担，并且含有大量的冗余信息，在维度诅咒下还会降低后续模式识别系统性能。另一方面，过简化的特征集会忽略掉重要的生理信息，从而影响到健康监测的准确度。因此，在嵌入式资源约束之下选择最优的特征子集，既要保持具有最大判别能力的信息，又要控制特征维度在合理的范围内，是特征提取算法设计所要解决的问题。这就要求研究特征之间的相关性，评价不同的特征对于某种生理状态的表征能力，用高效的方法来选择特征，在计算复杂度与信息完整性的平衡中取得最佳效果。

3.4 个性化差异与算法泛化能力

不同的个体之间存在着生理上的差异，使特征提取算法的统一性和个性化的矛盾变得突出起来。由于年龄、性别、体质、健康状况等各方面的因素影响，同一个生理信号在不同的个体之间会表现出不同的特征模式。老年人心电信号的形态特征同年轻人之间存在系统性的差别，运动员的心率变异性特征同一般人之间有明显的区别。如果特征提取算法过分依靠固定的阈值或者模板，不能适应个体之间存在的差别，从而造成提取出的结果准确率降低。但是完全个性化的算法调整也会增大系统复杂性以及使用难度。所以，设计出具有良好泛化能力的特征提取算法，在保证考虑个体差异的基础上又保证算法的一致性、可靠性的研究，是提高穿戴设备用户体验的一个课题。这可能要采用自适应参数调节方法或者创建可以从个体的历史数据中学习特征改变规律的算法。

4 面向嵌入式平台的轻量化特征提取算法设计与优化策略

4.1 自适应预处理与鲁棒性特征提取框架设计

对穿戴设备采集信号质量不稳定的情况,要创建起自适应预处理、鲁棒性特征提取相配合的完整的算法体系。在预处理阶段用基于信号质量评价的自适应滤波法,根据实时得到的信号噪声水平来自动调节滤波器参数。运动伪迹比较明显的时候,可以提高高通滤波器的截止频率来更好的抑制低频干扰,相对静止的时期则可以放宽滤波条件来保留更多的生理细节。特征提取阶段使用对噪声不敏感的稳健性特征。时域中可以结合波形的一阶差分、二阶差分等特征,这些特征对于基线漂移有较好的鲁棒性。在频域上用对频谱形状变化不敏感的频带能量比例来体现,而不是容易受噪声影响的单一频率点。另外,开发出一个基于多特征一致性检验的异常点剔除方法,当某一个特征值明显远离其它相关特征的联合分布的时候,就认为是由于噪声干扰引起的异常值而被剔除。利用自适应和鲁棒性相结合的设计,在不断变化的使用环境下可以稳定的提取出有效生理特征。该框架还要包含基于运动传感器数据的主动噪声抵消技术,用同步分析加速度计的信息来建立运动伪迹的参考模型,并做动态补偿。

4.2 计算效率优化的混合特征提取方法实现

嵌入式资源受限条件下,必须设计出一个计算效率高的混合特征提取方法,并且要兼顾到特征丰富性和实时性。使用分层特征提取法,先快速得到一组轻量级的初级特征,例如信号的均值、方差、过零点数等,这些特征计算简单而且可以给信号提供一个基本的描述。随后,只有在初步特征指示可能存在有意义的生理事件的时候,才会启动计算更加复杂的但是信息量更大的二级特征,例如小波系数能量、样本熵等。这样一种条件触发的计算机制可以明显降低平均计算负担。同时改进算法的实现方法,采用定点运算代替浮点运算、用查表法代替复杂的函数计算、用移位和加法代替乘除运算。对重复性进行计算时,尽量使用中间结果,减少重复计算。频域分析时用优化的实数FFT算法,避免了复数运算带来的开销。也可以利用嵌入式处理器的特定硬件加速单元,比如一些处理器支持的SIMD指令集,对特征提取中向量化的运算进行加速。通过采取上述综合优化措施,在有限的硬件资源条件下也能达到高效地提取特征的目的。

4.3 基于机器学习的特征选择与降维技术应用

为了保证在控制特征维度的同时保留重要的生理信息,要使用带有机器学习的特征选择和降维技术。首先从原始信号中提取出一个较为完整的初始特征集,包含时域、频域以及非线性等各方面的特征。再次用特征选择算法来分析各个特征与目标生理状态的关系及特征之间是否存在冗余。对于嵌入式环境,应该采用计算复杂度小的特征选取方式,例如用互信息做过滤式的或用L1正则化做嵌入式的。可以不用训练完整的分类模型,就可以很快地找出最有判别力的特征子集。对特征维度依然很高的情形,可以进一步使用线性降维的方法,例如主成分分析或者线性判别分析的简化形式。考虑到嵌入式系统计算能力的限制,在开发阶段就可以预先

计算出降维变换矩阵,在实际应用中只需要做简单的矩阵乘法即可得到低维特征表示。另外可以尝试用知识蒸馏的方式进行特征简化,训练出一个轻量级的学生模型去模仿复杂教师模型的决策边界,从而达到降低特征维度的目的。借助上述技术可以得到一个既紧凑又有丰富信息的特征向量,给后面健康状态的识别提供有效的输入。

4.4 个性化参数自适应与增量学习机制构建

为了克服由于个体之间生理差异而产生的问题,需要设计出有个性适应性的特征提取算法。创建用户个性化特征基准档案,在设备开始使用时,让用户在不活动的情况下连续采集一段时间的信号数据,得到该用户的基本生理特征轮廓。可以在实际使用的时候根据个体特征轮廓来自动调节算法的参数,心电R波检测阈值根据用户的典型R波幅度来进行归一化。进一步采用增量学习的方式,即算法可以按照时间的变化来适应用户的生理特征自然的变化。通过在线更新特征分布的统计参数,比如均值、方差等来保证特征提取过程可以跟踪用户的生理状态长期的变化趋势。对明显特征模式的改变会启动重新校准流程,提示用户在静止状态下去重建特征基准。为了防止增量学习过程中出现的错误累积,在进行学习时要设定合理的学习率以及更新条件,保证算法既能适应个体的变化,又不会因为过度调整而失稳。另外可以使用群体智能的方式,在保证用户隐私的情况下,用匿名化的群体特征分布信息来指导个性化的参数初始化,加速算法的适应性过程。通过上述的个性化和自适应机制,可以使得特征提取算法更好的服务多样化用户的需要。

5 结语

智能穿戴设备的嵌入式生理信号特征提取算法研究,对于改善设备的健康监测能力、推进移动健康技术的发展有着十分重要的意义。文章从嵌入式系统特殊的约束出发,对生理信号处理所遇到的技术难题及主要问题进行了分析,给出了一个针对性的轻量化算法设计以及优化策略。研究表明,在资源有限的嵌入式平台之上,采用自适应预处理、计算效率优化、智能特征选择和个性化的适应技术,可以达到高效的生理特征提取目的。可以对新型传感技术和特征提取算法进行结合,在边缘智能框架下实现端云协同处理方式,提升智能穿戴设备健康监测领域应用深度与广度。

参考文献

- [1] 陈笑远.基于可穿戴的多生理信号监测系统[D].天津工业大学,2025.
- [2] 王丹阳.基于可穿戴设备的生理监测与情绪识别系统[D].深圳大学,2023.
- [3] 宋陈.智能可穿戴设备高精度健康检测算法研究[D].安徽理工大学,2022.
- [4] 何文文.面向可穿戴设备的生理信号分析和处理算法研究[D].电子科技大学,2021.
- [5] 徐令仪,汪长岭,毛靖宁,等.可穿戴技术在生理信号监测中的应用和发展[J].中国医疗设备,2018,33(03):118-120+135.