

基于脉搏波传导时间变异性的冠心病识别方法

张爱华^{1,2,3}, 靳冠军^{1,2,3}

1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 甘肃 兰州 730050

【摘要】为提高冠心病识别的准确性,提出基于脉搏波传导时间变异性(PTTV)的冠心病识别方法。采用同步心电和脉搏信号提取PTTV信号,计算PTTV信号的均值、标准差等时域特征、庞加莱散点图特征以及信息熵特征,对这些特征参数在主成分分析基础上,选取7组主成分作为PTTV信号的综合特征,用于冠心病的分类识别。实验结果表明基于PTTV信号的综合特征对冠心病的分类识别准确率达到98.77%,其有望作为冠心病早期诊断方法。

【关键词】脉搏波传导时间变异性;冠心病;时域分析;非线性分析;主成分分析

【中图分类号】R318;TP391

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)05-0527-04

Method of coronary heart disease recognition based on pulse transit time variability

ZHANG Aihua^{1,2,3}, JIN Guanjin^{1,2,3}

1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China. 3. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: A coronary heart disease recognition method based on pulse transit time variability (PTTV) was proposed to improve the accuracy of coronary heart disease recognition. The mean value, standard deviation and other time domain characteristics, Poincaré scatter plot features and information entropy characteristics of the PTTV signal extracted using synchronous electrocardiogram and pulse signals were calculated. Based on the principal component analysis of the above-mentioned characteristic parameters, 7 groups of principal components were selected as the comprehensive characteristics of PTTV signals for the recognition and classification of coronary heart disease. The experimental results showed that the recognition accuracy of coronary heart disease based on the comprehensive characteristics of PTTV signal was 98.77%, which indicated the PTTV-based coronary heart disease recognition method may become a method for the early-diagnosis of coronary artery disease.

Keywords: pulse transit time variability; coronary heart disease; time domain analysis; nonlinear analysis; principle component analysis

前言

冠心病现已成为全球致死率较高的心血管疾病之一,由于在冠心病早期不能及时识别出是否患有冠心病,而导致冠心病死亡率正在逐年上升。因此,准确地识别冠心病并对冠心病病人进行及时救治,对有效降低冠心病的死亡率具有十分重要的意义。传

统的冠心病识别方法通常借助心电图或心电图负荷的方式来实现。心电图用于冠心病识别,由于50%~75%的冠心病患者对心电图敏感性、特异性不高,从而难以对冠心病作出准确识别^[1]。心电图负荷法用于识别冠心病,通过给病人施加外界压力使其心率达到一定范围后采集心电图,再通过心电图判别病人是否患有冠心病,但很多病人达不到压力测试的要求^[2]。其他临床识别方法,如动态心电图、超声心动图对冠心病的识别与医生经验关系密切^[3];冠状动脉CT是冠心病早期筛查和随访的手段,但是早期筛查的准确率较低且随访时间较长^[4];冠状动脉造影及血管内成像技术是有创性检查且冠状动脉造影正常

【收稿日期】2016-12-20

【基金项目】国家自然科学基金(81360229);甘肃省基础研究创新群体项目(1506RJIA031)

【作者简介】张爱华,女,教授,主要研究方向:生物医学信号检测与处理, E-mail: zhangaihua@lut.cn

并不能排除病人是否患有冠心病^[5]。近年来,随着无创便携医疗设备的发展,非侵入式的冠心病识别方法得到了广泛应用,并且非侵入式识别方法能够更好地识别出冠心病早期患者。通常用心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)和脉率变异性(Pulse Rate Variability, PRV)作为冠心病识别的非侵入式信号,现有的研究中基于HRV信号的冠心病识别准确率依然较低^[6-8]。因此,结合冠心病的病理信息,提出脉搏波传导时间变异性(Pulse Transit Time Variability, PTTV)作为冠心病识别的非侵入式信号,来提高冠心病识别的准确率。PTTV能够反应冠脉病变的严重程度,与HRV信号相比,包含了更丰富的心血管信息,并且能够更清晰地反应交感神经的调节作用^[9-10]。但已有的基于PTTV信号的冠心病识别研究中,通常仅用脉搏波传导时间的统计数据范围来判断是否患有冠心病,且识别的准确率不高^[11]。本文在PTTV信号研究基础上,通过提取PTTV信号的多个特征进行冠心病识别,以期提高冠心病识别的准确率。

1 方法

1.1 PTTV信号

PTTV信号通常被作为一种非侵入式评价中心动脉僵硬程度的指标。脉搏波传导时间(Pulse Transit Time, PTT)是动脉血液从指定位置流到另一指定位置所用的时间,通过PTT可以获得脉搏波传导速度(Pulse Wave Velocity, PWV)。当前PWV被认为是评估大动脉的“金标准”,可直接反应中心动脉僵硬程度,且临床相关性较好。每搏PTT或PWV之间存在差异称为脉搏波传导时间变异性,即PTTV。冠心病患者会出现大动脉弹性下降,故通过PTTV能更好地反映中心动脉僵硬程度,从而更加有效地进行冠心病识别。同时,PTTV信号是连续的PTT间隔序列,通过提取心电信号的R波到相应脉搏信号的主波峰值点P之间的PTT来获得,如图1所示。采用阈值法提取PTT信号^[12]。

1.2 特征提取

对20组健康人数据和20组冠心病数据,每组数据提取1 000个样本点PTTV信号,设置窗宽500点,使用滑窗迭代的方法计算PTTV信号的均数、标准差、差值标准差、差值均方根、pNN50、庞加莱散点图和信息熵的多个特征^[13]。

在时域中,Mean是PTTV信号的均数,SD为PTTV信号的标准差,SDSD为相邻PTTV差值的标准差,RMSSD为相邻PTTV差值的均方根,pNN50为相

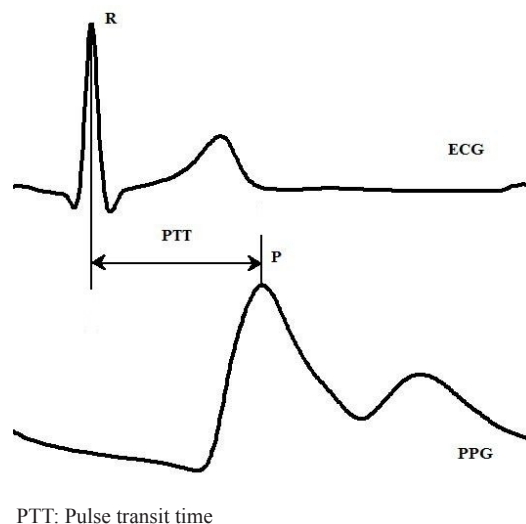


图1 PTT提取示意图

Fig.1 Schematic diagram of PTT extraction

差大于50 ms的相邻PTTV占总PTTV的百分比,能够定量区别正常和异常PTTV信号的取值范围。

庞加莱散点图以图形化的形式表现出非线性系统的一些变化规律,能够直观地反应PTTV的变化轨迹,其形状的变化可以一定程度上反应人体的变化^[14]。因此,可从散点图中提取用于定量分析的指标。对PTTV庞加莱散点图拟合得到椭圆拟合图形,其量化指标主要有:椭圆长轴(SD_1)、椭圆短轴(SD_2)、长轴与短轴之比(SD_1/SD_2)、椭圆面积(Area)、矢量长度指数(VLI)、总反馈指数(R_{TF})、椭圆离心率(E)、脉搏波传导时间变异性不对称性(PTTVA),可用于PTTVA的量化指标主要有:Porta指数(Porta Index, PI)、Guzik指数(Guzik Index, GI)和Ehler指数(Ehler Index, EI),可反映人体的健康状态。

信息熵是一种有效反映PTTV信号复杂性的方法,熵值越大,信号的复杂度越高。卞春华等^[15]学者提出的基本尺度熵(BSE)和符号序列熵(SSE),用于短时脉率变异性分析,取得了较为理想的效果。该文选用BSE和SSE作为短时PTTV信号的信息熵。

1.3 特征选择

在特征提取的基础上,为了得到有效的用于冠心病识别的特征,对冠心病人和健康人的PTTV信号,分别提取对应的时域和非线性特征,进行t检验,时域指标:Mean、SD、RMSSD、pNN50、SDSD的显著性水平P值分别为0.4116、1.6174e-71、3.6801e-75、5.2926e-97、3.6804e-75;庞加莱散点图拟合所得椭圆图形量化指标: SD_1 、 SD_2 、 SD_1/SD_2 、E、Area、VLI、GI、PI、EI、 R_{TF} 的P值分别为3.6801e-75、1.6623e-62、2.8237e-85、1.2376e-109、1.9707e-82、1.2921e-73、2.7629e-05、2.4555e-22、0.9264、2.6277e-24;信息熵指

标 BSE 和 SSE 的 P 值分别为 $1.3135\text{e-}208$ 和 $1.528\text{e-}173$ 。可以看出, Mean 和 EI 的伴随概率均远远大于显著性水平 ($P=0.05$), 所以舍弃这两个特征, 对其他 15 个特征进行主成分分析 (Principle Component Analysis, PCA)^[16], 由 15 组特征参数降维选取 7 组主

成分 (PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7) 作为冠心病识别综合特征, 选取依据如表 1 所示。为了保留原始特征向量 95% 以上的信息, 由表 1 可知, 主成分分析累计方差贡献率达到 95% 以上的为前 7 组, 因此选用这 7 组主成分作为综合特征进行冠心病的识别。

表 1 选取的主成分方差贡献率

Tab.1 Selected principal component variance contribution rate

PCA	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Variance contribution rate	0.528 8	0.163 3	0.099 6	0.069 4	0.055 3	0.032 7	0.019 3
Cumulative variance contribution rate	0.528 8	0.692 1	0.791 7	0.861 1	0.916 4	0.949 1	0.968 4

PCA: Principle component analysis

1.4 分类方法

该文采用 BP 神经网络、RBF 神经网络、广义神经网络 (GRNN)、概率神经网络 (PNN) 和支持向量机 (SVM)^[17], 用 1.3 节特征选择所获得的 7 组特征对健康人和冠心病病人进行分类识别, 对比分析该文提出各分类器用于冠心病识别的准确率。总共选取 40 组数据, 其中 20 组健康人数据, 20 组冠心病数据。将主成分分析后的 7 组 PTTV 信号综合特征组成特征向量, 每组综合特征由健康人特征和冠心病特征各 2 000 个样本点组成, 共 4 000 个样本点。每组特征随机产生 3 600 个训练集, 400 个测试集, 输入分类器进行正确率和准确率对比分析。

2 实验数据

采用 PhysioNet 网站提供的 PhysioBank 数据库数据。选用 PhysioNet/PhysioBank/Fantasia Database 数据库同时采集心电信号和连续血压信号的数据 20 组, 信号采样频率为 250 Hz。选用 PhysioNet/PhysioBank/MGH_MF Waveform Database 数据库中同步采集血压和心电信号的患有冠心病的患者数据 20 组, 采样频率为 360 Hz。该文主要是针对脉搏信号的主波峰值 P 和心电信号的 R 波峰值进行研究, 故可以忽略两类数据库的不同采样环境和传感器对脉搏信号和心电信号造成的影响。由于健康人和冠心病数据库采样频率不相同, 将冠心病患者数据采样频率 360 Hz 降为 250 Hz, 与健康人数据采样频率保持一致。

为了消除信号幅值不同造成的影响, 对同步心电脉搏信号进行归一化处理:

$$y_k = (y_{\max} - y_{\min}) \frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min}$$

式(1)中, x_{\max} 、 x_{\min} 分别为同步心电脉搏信号 x_k 的最大值和最小值, y_{\max} 、 y_{\min} 分别为归一化后同步心电脉搏信号的最大值和最小值, 即归一化后输出同步心电脉搏信号 y_k 的值在 $[y_{\min}, y_{\max}]$ 之间。该文同步心电脉搏信号归一化处理到 $[-1, 1]$ 之间。

3 实验结果

3.1 结果分析

本实验采用 matlab2014a 在 Lenovo 启天 M715E (处理器: Intel(R) Core™ 2 Duo CPU E7500 @2.93 Hz 2.94 Hz, 安装内存: 4.00 GB, 系统类型: 64 位操作系统) 下实现。为获得基于 PTTV 信号综合特征冠心病识别的最佳分类方法, 将特征选择得到的综合特征输入 1.4 节中所提分类器中, 对比分析结果。为消除每次输入样本不同对分类准确率的影响, 每次输入保持总样本数不变, 随机选取训练集和测试集的样本, 程序运行 50 次, 结果如表 2、表 3 所示。

表 2 分类准确率统计 (%)

Tab.2 Classification precision rate (%)

Method	Max	Min	Mean±SD
BP	62.75	45.00	56.43±5.57
GRNN	66.25	60.50	65.08±2.52
RBF	99.75	98.25	98.77±1.27
PNN	99.25	98.00	98.17±1.36
SVM	97.50	92.00	96.00±1.66

BP: Back propagation neural network; GRNN: Generalized regression neural network; RBF: Radial basis function neural network; PNN: Probabilistic neural network; SVM: Support vector machine

表3 识别正确率统计(%)
Tab.3 Recognition correct rate (%)

Method	Max	Min	Mean±SD
BP	76.00	45.00	61.75±2.63
GRNN	61.00	49.00	54.70±4.10
RBF	99.50	98.50	99.20±0.26
PNN	99.00	96.50	97.85±3.20
SVM	99.00	95.00	97.17±1.72

由表2中的分类准确率可以看出,采用RBF神经网络进行冠心病识别的准确率最高,PNN神经网络次之,RBF神经网络较PNN神经网络识别准确率高0.6%。由于RBF神经网络不仅具有全局逼近能力,而且还可以得到唯一最佳逼近点,从根本上解决了局部最优问题。而PNN神经网络作为三层前馈神经网络,具有不易收敛到局部最优的优点。其他两种神经网络(BP和GRNN)由于网络本身的问题,所以识别准确率较低。SVM分类将7组综合特征通过最优分类面对健康人和冠心病病人进行分类,分类面的选择与核函数有很大的关系,所以分类准确率与RBF神经网络相比较低。表3是冠心病识别正确率的统计结果。由表3可以看出,RBF神经网络的冠心病识别正确率最高,结合表2和表3可知,选取识别准确率和识别正确率最高的RBF神经网络作为最终的分类识别方法。

3.2 讨论

本文将时域和非线性特征经过主成分分析得到的综合特征用于冠心病和健康人分类识别,提高了冠心病识别的准确率。Dua等^[7]通过HRV信号提取的非线性特征进行主成分分析获得综合特征输入多层感知机神经网络得到识别准确率为89.5%。相比较,本文提取PTTV信号的时域和非线性特征,通过时域和非线性特征来分析冠心病具有更好的分析效果。Giri等^[16]对HRV信号求其离散小波基,通过独立成分分析降维后输入高斯混合模型,得到冠心病识别准确率为96.8%。通过小波变换相当于只分析了HRV信号的频域信息,且独立成分信息没有通过方差贡献率来选,存在一定的主观性。Kim等^[6]从HRV信号中提取线性和非线性特征进行多参数模型分析冠心病识别准确率达到84.6%,得到特征后直接输入多参数模型,对特征的分析不够严谨。本文从同步心电脉搏信号中提取出PTTV信号,从PTTV信号中提取其时域特征和非线性特征,通过主成分分析,根据累计方差贡献率达到95%的原则,选取了7

组主成分作为冠心病识别的综合特征,分别输入常用的几种分类器,得到RBF神经网络分类准确率为98.77%,正确识别冠心病的概率为99.20%,有效提高了冠心病识别的准确率。

4 结论

本研究针对采用脉搏波传导时间的统计数据进行分析冠心病识别,且识别准确率低的问题,在对PTTV信号研究的基础上,提取PTTV信号的时域和非线性特征作为综合特征进行冠心病识别。实验结果表明,所提出的方法,有效提高了冠心病识别的准确率,对冠心病识别的研究具有重要意义。

【参考文献】

- [1] 陈伟伟,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告2015》概要[J].中国循环杂志,2016,31(6): 521-528.
CHEN W W, GAO R L, LIU L S, et al. Outline of China Cardiovascular Disease Report 2015 [J]. Chinese Circulation Journal, 2016, 31(6): 521-528.
- [2] VAN DER Wall E E. The PROMISE study: a clear promise for functional stress testing in patients with suspected coronary artery disease[J]. Neth Heart J, 2015, 23(6): 297-298.
- [3] 赵莹莹,黄朴忠,李焱,等.经胸冠状动脉超声与动态心电图对冠心病的诊断初探[J].中国超声医学杂志,2014,30(8): 690-693.
ZHAO Y Y, HUANG P Z, LI Y, et al. Preliminary study of transthoracic coronary artery ultrasonography and dynamic electrocardiogram in the diagnosis of coronary heart disease [J]. Chinese Journal of Ultrasound in Medicine, 2014, 30(8): 690-693.
- [4] 何斌,盖鲁粤,盖兢涪,等.冠状动脉CT与冠心病危险因素的相关分析[J].南方医科大学学报,2012,32(10): 1400-1406.
HE B, GAI N Y, GAI J J, et al. Coronary plaques identified by coronary computed tomography angiography and the risk factors for major adverse cardiac events: a correlation analysis[J]. Journal of Southern Medical University, 2012, 32(10): 1400-1406.
- [5] 王明友,张忠涛. CT冠状动脉成像与冠状动脉造影诊断冠心病对照研究[J].中国医学影像学杂志,2014,22(11): 846-848.
WANG M Y, ZHANG Z T. Coronary artery angiography and coronary angiography in the diagnosis of coronary heart disease[J]. Chinese Journal of Medical Imaging, 2014, 22(11): 846-848.
- [6] KIM W S, JIN S H, PARK Y K, et al. A study on development of multi-parametric measure of heart rate variability diagnosing cardiovascular disease [C]//World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006. Berlin: Springer, 2007: 3480-3483.
- [7] DUA S, DU X, SREE S V, et al. Novel classification of coronary artery disease using heart rate variability analysis[J]. J Mech Med Biol, 2012, 12(4): 271-276.
- [8] ZHANG A, WEI B, CHOU Y. Coronary heart disease recognition based on dynamic pulse rate variability [C]//International Conference on Intelligent Computing. Berlin: Springer International Publishing, 2016: 28-38.
- [9] 马敏,刘云霞,李洱花,等.脉搏波传导速度与冠心病冠状动脉病变严重程度的相关性分析[J].昆明医科大学学报,2014,35(3): 62-64.
MA M, LIU Y X, LI E H, et al. Correlation analysis of pulse wave velocity and severity of coronary heart disease[J]. Journal of Kunming Medical University, 2014, 35(3): 62-64.

(下转540页)