

四种体表脉搏传感器的测量重复性量化分析

徐礼胜, 孙楠楠, 于靖义, 张欠欠
(东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 选取 20 名健康大学生作为研究对象, 分别使用 4 种不同脉搏波传感器(可调式、笔形探头式、腕带式、光感式)进行脉搏波数据采集, 研究 4 种传感器的影响因素、稳定性、重复性的差异. 结果表明, 光感式传感器易受压力、环境光、测量部位的影响, 重复性一般, 稳定性差; 腕带式传感器易受测量部位的影响, 稳定性和重复性一般; 笔形探头式传感器易受测量部位影响, 稳定性和重复性好; 可调式传感器易受压力、测量部位的影响, 重复性好, 稳定性一般. 可见 4 种传感器有各自的性能指标与适用范围, 其中笔形探头式传感器影响因素少, 有较好的性能指标.

关 键 词: 脉搏波; 传感器; 性能; 测量重复性; 量化分析
中图分类号: N 945.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)08-1114-04

Quantitative Analysis on the Reproducibility of Four Kinds of Pulse Wave Sensors

XU Li-sheng, SUN Nan-nan, YU Jing-yi, ZHANG Qian-qian
(Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering School, Northeastern University, Shenyang 110169, China.
Corresponding author: XU Li-sheng, E-mail: xuls@bmie.neu.edu.cn)

Abstract: Twenty healthy college students were selected as subjects. Four kinds of pulse wave sensors (adjustable, pencil probe, wrist-band, and photoelectric) were used to collect radial pulse waves. The influence factors, stability and reproducibility of the four sensors were studied. The results show that photoelectric sensor is susceptible to contact pressure, ambient light and measuring site, and it has medium reproducibility and poor stability; wrist-band pulse sensor is susceptible to measuring site, and its stability and reproducibility are medium; pencil probe sensor is susceptible to measuring site, and its stability and reproducibility are good; adjustable sensor is susceptible to pressure and measuring site, and it has good reproducibility and medium stability. Four kinds of pulse wave sensors have their own performance indexes and application scopes. The pencil probe sensor has less influence factors and better performance indexes.

Key words: pulse wave; sensor; performance; reproducibility; quantitative analysis

脉搏波蕴含大量生理病理信息^[1], 通过采集分析脉搏波信号, 可评估心血管系统的状态^[2-3]. 在脉搏波采集过程中, 不同传感器有各自的性能特点, 因此采集所得到的整体波形和各项参数都略有差异, 且对诊断的准确度也会有影响.

国内外虽有对传感器进行研究^[4-6], 但很少对不同传感器之间进行性能比较. 本文研究了 4 种不同传感器的性能差异并对获取的整体脉搏波进行了重复性分析. 对传感器进行性能分析时, 考虑压力、测量位置、环境光等因素对脉搏波的影响; 采用方差分析评估参数的稳定性, 采用组内相关系数评估重复性. 通过量化评价脉搏波的重复性来进一步比较 4 种传感器的性能, 本研究将动态时间规整算法^[7]用于整体脉搏信号形态的相似性度量, 该算法对脉搏信号的幅值变化较为敏感, 能有效分析不同波形的相似性^[8-9]. 对于波形细节进行相似度比较时, 考虑脉搏波时域、频域相关参数; 本文选取脉搏上升时间(t_{up})、脉搏上升

时间与脉搏周期的比值(t_{up}/T)、降中峡高度与主波高度的比值(h_2/h_1)和 K 值^[10] 4 个显著的时域特征参数,以及 0 ~ 5 Hz 频带脉搏波占总频带谱能比(E_r)的频域特征参数作为研究对象. 选取这些参数的原因是脉搏上升时间、脉搏上升时间与脉搏周期的比值能反映动脉硬化程度^[11];降中峡高度与主波高度的比值能反映外周阻力的高低; K 值能反映一些血流参数的变化,从而连续独立地预测心血管疾病;健康人群的脉搏波几乎全部的能量分布在 0 ~ 10 Hz^[12] 之间,因此频谱能量比能反映人体的健康状态.

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

20 名健康大学生参与了目前的研究,年龄(24.16 ± 1.29) 岁,身高(176 ± 5.67) cm,体重(71.27 ± 9.22) kg. 受试者纳入的主要标准是没有心血管疾病,不吸烟或饮酒,并且在 1 h 内没有剧烈运动.

1.2 检测方法

脉搏波数据统一在 19:00—21:00 固定时间段内采集. 采集开始前要求受试者静息 5 min,保证心血管各项功能处于稳定状态,然后进行脉搏波采集. 受试者取坐位并保持手腕与心脏处于同一高度,由同一测试者分别把可调式、笔形探头式、腕带式 and 光感式传感器置于左手桡动脉脉动最强点处. 连续采集 30 s 稳定的桡动脉脉搏波,每一种仪器采集 5 次有效脉搏波数据. 测量过程中受试者保持放松、呼吸平静、不要移动手腕,测量位置、角度、压力以及受试者姿势等保持不变,以排除外界因素对桡动脉波形的影响及干扰. 提取采集的脉搏波数据特征,得到 5 个参数:脉搏上升时间 t_{up} ,脉搏上升时间与脉搏周期的比值 t_{up}/T ,降中峡高度与主波高度的比值 h_2/h_1 , K 值,0 ~ 5Hz 频带占总频带谱能比 E_r .

1.3 统计学方法

使用 SPSS 19.0 软件进行统计分析. 研究资料采用均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm sd$) 表示,采用 Pearson 相关分析、配对 t 检验、组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC) 来评价传感器性能和比较传感器获取脉搏波的差异. ICC 用来评价测量结果的重复性,一般认为: $ICC \leq 0.4$,重复性差; $0.4 < ICC \leq 0.75$,重复性好; $ICC > 0.75$,重复性很好^[13]. 当统计 P 值 < 0.05 时认为差异有统计学意义.

2 实验结果

2.1 性能分析

考虑各种环境干扰因素,以及实际采集过程中的误差因素,具有较强的抗干扰能力,稳定性、重复性好的传感器是精准采集脉搏波信号的关键. 因此本研究通过分析传感器的影响因素、稳定性、重复性来评估传感器的性能^[14].

2.1.1 影响因素分析

1) 不同压力对脉搏波的影响.

可调式传感器、笔形探头式传感器、腕带式传感器均为压力传感器. 如表 1 所示,针对压力与主峰振幅,可调式传感器有显著的相关性,光感式传感器相关性不显著,不易受压力影响,而其他 2 种传感器相关性无统计学意义. 因此本研究在后期实验中选择最佳压力下的脉搏波数据进行传感器分析.

表 1 压力与主峰振幅相关性 Table 1 Pearson's correlation analysis of pressure and the main peak amplitude		
传感器类型	相关系数	P 值
可调式	0.36	< 0.05
笔形探头式	0.16	> 0.05
腕带式	0.11	> 0.05
光感式	0.19	< 0.05

2) 不同测量部位对脉搏波的影响.

将 4 种传感器置于左手桡动脉脉动最强点处,记为部位 1,传感器分别向左、右方向水平移动 0.5 mm 距离,测量点处记为部位 2 和 3. 对测得的 t_{up}/T 和 h_2/h_1 与部位 1 进行配对 t 检验. 分析结果显示:腕带式和光感式传感器在测量部位 2 和 3 处得到的 t_{up}/T 参数与部位 1 有显著差异($P < 0.05$),笔形探头式、腕带式和光感式传感器在测量部位 2 和 3 处得到的 h_2/h_1 参数与部位 1 有显著差异($P < 0.05$).

3) 环境光的强度对脉搏波的影响.

光感式传感器采用光电传感器,在 3 种不同照度下采集受试者脉搏波时环境光的强度与其主峰振幅显著相关($r = 0.06, P < 0.05$). 对于其他传感器,环境光强度的改变对脉搏波采集无影响.

2.1.2 稳定性分析

对同一受试者在时间间隔为 7 天的情况下进行 2 次脉搏波信号采集,对参数进行方差分析的结果如表 2 所示,笔形探头式传感器参数变化不

明显,测量结果差异性较小,稳定性好.可调式传感器、腕带式传感器^[15]参数变化较明显,测量结果差异较大,稳定性一般.光感式传感器参数变化明显,测量结果差异大,稳定性差.

表 2 各参数的方差分析					
Table 2 Variance analysis of parameters					
传感器类型	t_{up}	t_{up}/T	h_2/h_1	K	E_r
可调式	0.012	0.012	0.015	0.020	0.017
光感式	0.026	0.038	0.046	0.027	0.048
笔形探头式	0.003	0.009	0.017	0.017	0.004
腕带式	0.012	0.016	0.018	0.019	0.022

2.1.3 重复性分析

在相同条件下,对每一名受试者进行 10 次连续脉搏波信号采集.各参数计算得到的组内相关系数结果如表 3 所示:笔形探头式、可调式传感器采集到的波形的时域和频域参数 ICC 均大于 0.7,说明重复性很好;光感式、腕带式传感器频域参数 ICC 小于 0.4,而时域参数 ICC 主要集中在 0.4 与 0.7 之间,说明重复性一般.

表 3 各参数的组内相关系数 (ICC)					
Table 3 ICC of the parameters					
传感器类型	t_{up}	t_{up}/T	h_2/h_1	K	E_r
可调式	0.98	0.82	0.91	0.92	0.91
光感式	0.80	0.62	0.50	0.64	0.21
笔形探头式	0.84	0.91	0.80	0.92	0.78
腕带式	0.86	0.64	0.42	0.83	0.21

2.2 波形分析

脉搏波波形能直观地观察 4 种传感器的采集质量,因此本研究分别从整体形态和特征参数两方面量化评价脉搏波的重复性,以便进一步比较

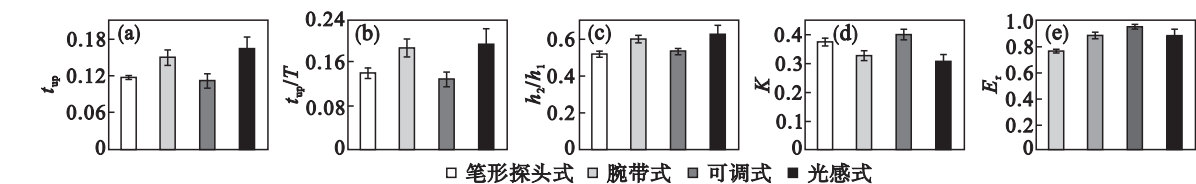


图 2 4 种传感器采集波形的参数变化
Fig. 2 Parameters variation of the waveforms acquired by four sensors

3 结 论

1) 不同类型传感器有各自的性能指标和适用范围.光感式传感器易受压力、环境光、测量部

4 种传感器的性能.
2.2.1 整体形态分析
如图 1 所示,对采集到的整体波形进行动态时间归整 (dynamic time warping, DTW) 并归一化,发现传感器 (笔形探头式、腕带式、可调式) 获得的重搏波比光感式传感器更明显.可调式与笔形探头式传感器采集得到的脉搏主波上升时间和降中峡高度与主波高度的比值相似度高.总之,4 种传感器采集的波形之间的相似性较差,存在显著差异.

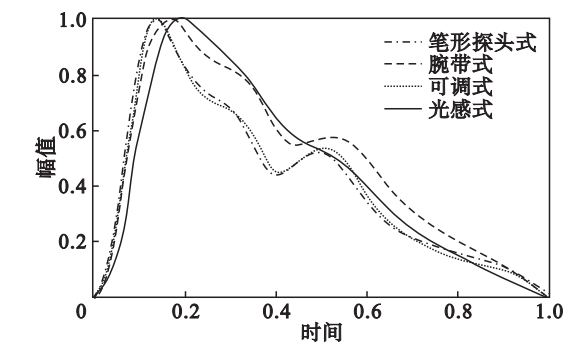


图 1 4 种传感器采集的归一化 DTW 波形
Fig. 1 Normalized DTW waveforms acquired by the four sensors

2.2.2 特征参数分析

分别利用 4 种传感器对同一受试者进行 5 次脉搏波数据采集.如图 2 所示,对 5 次采集的脉搏波进行特征提取,分析参数变化趋势发现:4 种传感器的 t_{up} 和 t_{up}/T 2 个参数变化趋势明显,测量结果差异较大; h_2/h_1 , K , E_r 3 个参数的变化趋势相对较小,测量结果差异较小.笔形探头式传感器的测量误差最小,腕带式与可调式传感器次之,光感式传感器测量误差最大.4 种传感器存在不同程度的测量误差,使得 4 种传感器得到的波形特征参数相似性差,存在显著性差异.

位的影响,重复性一般,稳定性差;腕带式传感器易受测量部位的影响,稳定性和重复性一般;笔形探头式传感器易受测量部位影响,稳定性和重复性好;可调式传感器易受压力、测量部位的影响,重复性好,稳定性一般.

2) 4 种传感器存在不同程度的测量误差,使得传感器采集到的波形之间在整体形态和特征参数上存在显著差异.

3) 笔形探头式传感器影响因素少,性能指标好,能够采集到良好的脉搏波.

参考文献：

[1] Xu L S, Zhang D, Wang K Q, et al. Baseline wander correction in pulse waveforms using wavelet-based cascaded adaptive filter [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2007, 37(5): 716 – 731.

[2] Xu L S, Wang K Q, Zhang D. Modern researches on traditional Chinese pulse diagnosis [J]. *European Journal of Oriental Medicine*, 2004, 4(6): 46 – 54.

[3] Ma Z C, Zhang Y L, Ni C M, et al. A new method for determining subendocardial viability ratio from radial artery pressure waves [J]. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 2013, 13(4): 1 – 10.

[4] Stea F, Bozec E, Millasseau S, et al. Comparison of the Complior Analyse device with Sphygmocor and Complior SP for pulse wave velocity and central pressure assessment [J]. *Journal of Hypertension*, 2014, 32(4): 873 – 880.

[5] Saba L, Gao H, Acharya U R, et al. Analysis of carotid artery plaque and wall boundaries on CT images by using a semi-automatic method based on level set model [J]. *Neuroradiology*, 2012, 54(11): 1207 – 1214.

[6] 周鹏, 高雄飞, 张玉满, 等. 基于驻极体传声器的脉象检测系统和方法 [J]. *传感技术学报*, 2015, 28(3): 374 – 380.
(Zhou peng, Gao Xiong-fei, Zhang Yu-man, et al. The pulse detection system and method based on electret microphone [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(3): 374 – 380.)

[7] Wang X, Mueen A, Ding H, et al. Experimental comparison of representation methods and distance measures for time series data [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2013, 26(2): 275 – 309.

[8] Petitjean F, Ketterlin A, Gançarski P. A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering [J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(3): 678 – 693.

[9] Keogh E, Ratanamahatana C A. Exact indexing of dynamic time warping [J]. *Knowledge and Information Systems*, 2005, 7(3): 358 – 386.

[10] 罗志昌, 张松, 杨益民. 脉搏波的工程分析与临床应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 8 – 155.
(Luo Zhi-chang, Zhang Song, Yang Yi-min. Engineering analysis and clinical applications of pulse wave [M]. Beijing: Science Press, 2006: 8 – 155.)

[11] Weber T, O’Rourke M F, Lassnig E, et al. Pulse waveform characteristics predict cardiovascular events and mortality in patients undergoing coronary angiography [J]. *Journal of Hypertension*, 2010, 28(4): 797 – 805.

[12] Hlenschi C, Corodeanu S, Chiriac H. Magnetoelastic sensors for the detections of pulse waves [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(1): 117 – 119.

[13] Perloff D, Grim C, Flack J, et al. Human blood pressure determination by sphygmomanometry [J]. *Circulation*, 1993, 88(5): 2460 – 2470.

[14] 邓琛, 方易圆, 陈益平, 等. 基于无线传感器网络的动脉硬化远程监测系统 [J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(9): 2345 – 2347.
(Deng Chen, Fang Yi-yuan, Chen Yi-ping, et al. WSN-based arteriosclerosis remote monitoring system [J]. *Computer Measurement and Control*, 2012, 20(9): 2345 – 2347.)

[15] 林哲祺, 刘书田, 郭绍伟. 压电质量传感器检测灵敏度分析 [J]. *计算力学学报*, 2012, 29(5): 779 – 782.
(Lin Zhe-qi, Liu Shu-tian, Guo Shao-wei. Detection sensitivity analysis for piezoelectric mass sensor [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(5): 779 – 782.)