

## 基于视频信号的微血管自律运动频率测量

李丹, 陈兆学

上海理工大学健康科学与工程学院医学影像工程研究所, 上海 200093

**【摘要】**针对目前微血管运动的检测对设备要求较高,检测时间较长的问题,提出一种简便观测微血管自律运动频率的方法。通过手机摄像头拍摄人体舌面视频,预处理后提取每帧图片中的感兴趣区域,根据每个区域中像素灰度值的变化得到血液容积变化的时序曲线;然后通过小波分解对每个感兴趣区域颜色通道的血液容积变化信号进行降噪,对降噪后的信号进行独立成分分析以降低光照和环境因素影响;提取源信号频域中主要峰值点频率进行拟合,实验结果表明本课题所提取信号频率属于微血管自律运动频率范围。

**【关键词】**远程光电容积法;微循环;血管运动;小波分解;独立成分分析法

**【中图分类号】**R318

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)05-0611-06

## Frequency measurement of microvascular vasomotion based on video signals

LI Dan, CHEN Zhaoxue

Institute of Medical Imaging Engineering, School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract:** Aiming at problems of high requirements for equipments and time consumption for microvascular vasomotion detection, a simple method for observing the frequency of microvascular vasomotion is proposed. The phone camera is used to capture videos of human tongue, and the regions of interest are extracted in each frame of the picture after preprocessing. The curve of the blood volume varying with time is obtained by investigating the variations of pixel gray values of each region. Then wavelet decomposition is used to denoise the blood volume varying signals of color channel in each region of interest, and independent component analysis is carried out on the noise-reduced signals to reduce the effects of light and environmental factors. Finally, the frequencies of main peak points in frequency domain of source signals are extracted for fitting. The experimental results show that the extracted signal frequency belongs to frequency range of microvascular vasomotion.

**Keywords:** remote photoplethysmograph; microcirculation; microvascular motion; wavelet decomposition; independent component analysis

### 前言

微循环是机体物质、能量和信号分子的最主要的交换场所。作为机体循环系统的重要组成部分,其形态结构改变与功能紊乱对许多疾病发生和发展具有重要影响<sup>[1]</sup>。微血管的自律性主动舒缩运动具有独特的振幅和频率<sup>[2]</sup>,不从属于心脏搏动及呼吸节律,其频率范围为0.04~0.15 Hz<sup>[3-4]</sup>。微血管自律运动是微循环血流对组织和器官灌注的重要能量来源之一,是人体血液循环系统中血液流体力学的一个重要调节因素。对微血管网络血流的研究表明,在许

多疾病状态下,如心血管和代谢疾病,微血管网络的适应能力及其对施加的应激源的响应能力下降<sup>[5-6]</sup>。有研究表明微血管功能障碍存在于许多慢性疾病发展的中早期<sup>[7-8]</sup>;文献[9]在对小鼠的研究发现当肾脏和胰腺微循环功能受损时,微血流灌注量减少,微血管自律运动紊乱;高血压小鼠的器官和组织微循环微血管自律运动频率降低,器官存在异质性。文献[10]通过对糖尿病患者视网膜微循环观察,发现糖尿病患者的微血管血流灌注水平降低。除了疾病对微血管自律运动的影响外,也有不少学者通过研究药物对微血管自律运动的影响来探寻对特定疾病新的治疗方法<sup>[11]</sup>。

闭塞后反应性充血实验是检查人体皮肤微循环状态的一种常用方法<sup>[12]</sup>。微血管的自律性运动可以通过显微镜或超声检查<sup>[13]</sup>连续测量血管直径的变化

**【收稿日期】**2021-12-16

**【作者简介】**李丹,硕士研究生,研究方向:医学信号处理,E-mail: 1565-305313@qq.com

来获得,也可以通过功能近红外光谱法<sup>[4,14]</sup>、功能磁共振成像<sup>[4]</sup>或激光多普勒血流仪<sup>[15-17]</sup>间接测量得到。文献[6]将相关映射光学相干断层扫描成像技术用于皮肤微血管结构检测中,证明了其在微循环可视化方面的适用性。文献[18]提出流动介质皮肤荧光技术来监测皮肤微循环状态。

舌、甲皱和眼球结膜是观测人体微循环环境变化的3个重要窗口,其中舌以其丰富的微血管分布和活跃的微循环状态变化成为了临床和活体动物微循环监测的理想部位<sup>[19-20]</sup>。日常生活中采用激光多普勒血流仪或功能磁共振成像来观测微血管舒缩运动仍然存在场地上和设备上的限制,为了实现更加便捷快速的测量,本研究提出一种简便观测微血管自律运动频率的方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 小波变换

小波变换是一种广泛用于研究血流波动的方法,可用于观察微循环中特定生物组分在微血管血流中非线性动态变化<sup>[3]</sup>。除此之外学者们还将小波分析技术运用到中医脉象<sup>[21]</sup>分析中,利用小波变换分析实验对象在不同状态和不同部位下脉搏波信号的系数、波形特征<sup>[22]</sup>,这为传统中医脉诊客观化提供了新思路。本研究采用快速正交小波变换算法<sup>[23]</sup>,将每帧视频图像中的感兴趣区域中像素灰度值的变化得到血液容积变化的时序曲线作为原始信号 $b^0$ 进行小波分解后,信号被解为两部分:近似信号 $b1=G*b^0$ 和细节信号 $d1=H*b^0$ 。其中,近似信号包含信号的低频成分, $G$ 表示低通滤波器;细节信号包含信号的高频成分, $H$ 表示高通滤波器。对低频信号再进行上述分解,以此类推当原始信号分解到 $m$ 层时,有:

$$b^m = G*b^{(m-1)} \quad (1)$$

$$d^m = H*b^{(m-1)} \quad (2)$$

对信号进行重构时有:

$$b^{m-1} = G^*b^m + H^*d^m \quad (3)$$

其中, $G^*$ 、 $H^*$ 为 $G$ 、 $H$ 的共轭矩阵,分解过程如图1所示。

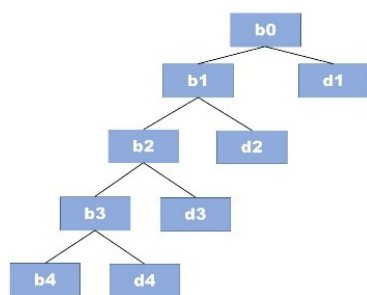


图1 小波分解示意图

Figure 1 Schematic diagram of wavelet decomposition

### 1.2 独立成分分析(ICA)

ICA是一种基于统计学分析的信号处理方法,它可以在没有任何先验知识的情况下,从盲源信号中分离出源信号<sup>[20]</sup>。假设存在相互独立的统计源信号 $S(i), i=1, 2, \dots, n$ ,观测信号 $X(i), i=1, 2, \dots, n$ 是源信号各分量的线性组合,即:

$$X = AS \quad (4)$$

$A$ 是未知非奇异混淆矩阵,ICA的目的是在已知混合信号 $X$ 的情况下,获得解混矩阵 $W$ :

$$Y = WX \quad (5)$$

$Y$ 分量为源独立成分的估计,设 $\hat{S}(j), j=1, 2, \dots, n$ 为源独立成分的估计,即:

$$Y = \hat{S} \quad (6)$$

Fast-ICA是基于批运算相关目标函数的快速算法,采用了定点迭代,其计算过程简单且具有较好的收敛性,相比于ICA, Fast-ICA在累积分布函数和 $W$ 的迭代公式上做了优化。其累积分布函数为:

$$g(m) = \frac{1}{a1} \log(\cosh(a1x)) \quad (7)$$

相应的概率分布函数变为:

$$g'(m) = \tanh(a1x) \quad (8)$$

其中, $a1$ 是常量, $1 \leq a1 \leq 2$ ,通常选 $a1=1$ 。

$w_i$ 的迭代公式改为:

$$w_i = E\{2g(w_i^T z)\} - E\{g'(w_i^T z) \cdot w\} \quad (9)$$

$$W = (W \cdot W^T)^{-\frac{1}{2}} \cdot W \quad (10)$$

## 2 实验数据采集与分析

### 2.1 实验数据采集与预处理

实验使用手机摄像头来进行数据采集。在自然光条件下,要求被视者保持自然站立状态并尽量伸出舌部,伸展舌面。为降低拍摄时舌部不自觉抖动对实验带来的影响,最大程度地减少拍摄时间,拍摄视频时长为13 s。在进行数据预处理时,首先将采集到的视频数据进行分帧;采用基于HSV颜色空间阈值分割和活动轮廓模型相结合的方法进行舌部分割。首先将H通道图像和V通道图像按比例进行叠加,在 $0.7 \times H + 0.3 \times V$ 参数比例下所得图像中舌和脸的对比度更高,采用大津法获得分割阈值进行粗分割,对分割所得的图像进行形态学处理,消除图像周围小的闭合区域,如图2所示。

参数活动轮廓模型方法通过轮廓曲线内部能量和外部能量来控制轮廓曲线的大小和形状<sup>[24]</sup>。内力是由轮廓曲线自身弹性形变所产生,可保持轮廓曲线的平滑性和收缩性。外力主要由图像本身作用力组成,通过外力作用可使轮廓曲线向真实目标轮廓移动。将上述所得的粗分割结果的边缘作为初始的

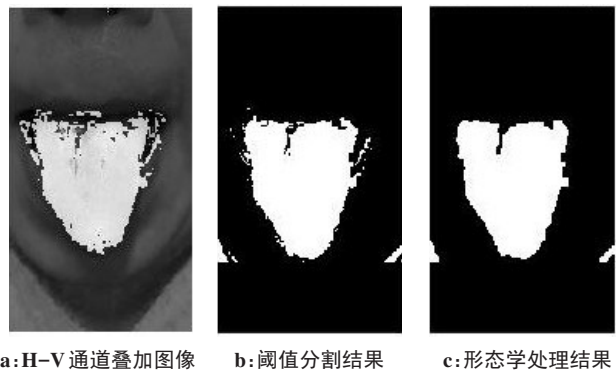


图2 阈值分割结果

Figure 2 Threshold segmentation results

轮廓线,轮廓线内、外的灰度值大小分别作为内、外能量进行分割,当能量和为最小时,便可得到图3所见的舌分割的最终结果。

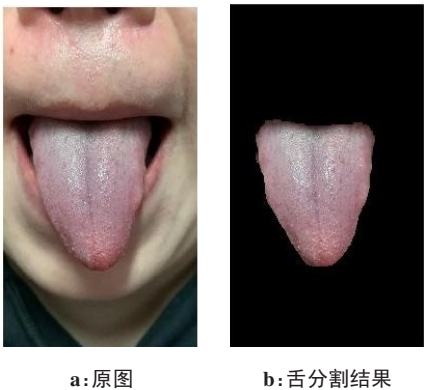


图3 舌图像分割结果图

Figure 3 Tongue image segmentation results

2.2 实验数据分析

根据舌的解剖结构,将舌体分为舌根、舌中、舌侧和舌尖4个区域进行分析。对每个舌部区域提取上下左右相邻的5个30×30像素的小区域进行分析,如图4所示,并提取每个感兴趣区域的R、G、B、R-B、G-B通道数据。根据表1小波分解规则,当所采集视频帧速率为30帧/s,即采样频率为30 Hz时,需要对信号进行4层分解才可以得到包含人体生理信号的感兴趣频段,对第四层分解得到的近似信号数据进行小波重构降噪。

为降低拍摄过程中运动噪声和光照等环境因素的干扰,对小波重构后的信号,如图5所示,进行快速独立成分分析提取源信号。把提取到的源信号转换到频域中,如图6所示,可发现独立分量频谱都有多个峰值点。为确定引起此现象的此信号的来源,提取每个独立分量的傅里叶频谱峰值点,并对这些数据进行拟合,通过拟合曲线的斜率来观察该信号的频率值。通过拟合发现

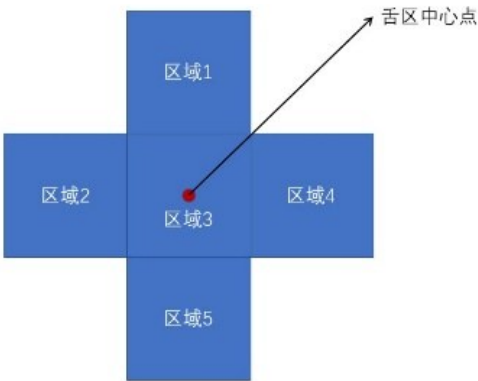


图4 区域选取示意图

Figure 4 Schematic diagram of region selection

表1 4层小波分解频带划分

Table 1 Four-layer wavelet decomposition frequency band division

分解层数	近似信号频率/Hz	细节信号频率/Hz
1	0~15.000	15.000~30.000
2	0~7.500	7.500~15.000
3	0~3.750	3.750~7.500
4	0~1.875	1.875~3.750

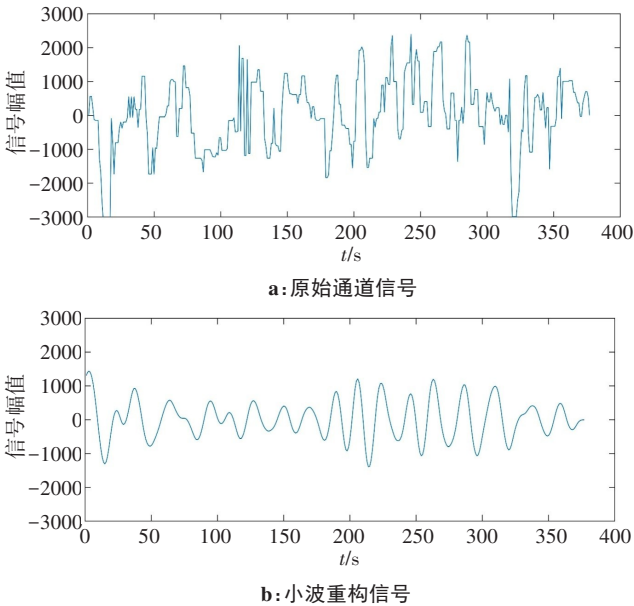


图5 颜色通道信号重构图

Figure 5 Color channel signal reconstruction

峰值点的数据具有良好的线性,且其斜率在微血管自律运动频率范围内,拟合结果见图7。

为进一步验证观测微血管自律运动频率方法的可行性和普适性,采集5个手指指甲和脸颊皮肤5个区域的数据,每个区域选择5个提取上下左右相邻的30×30像素的感兴趣区域进行分析,不同部位的5个感兴趣区域所测频率值如表2所示。

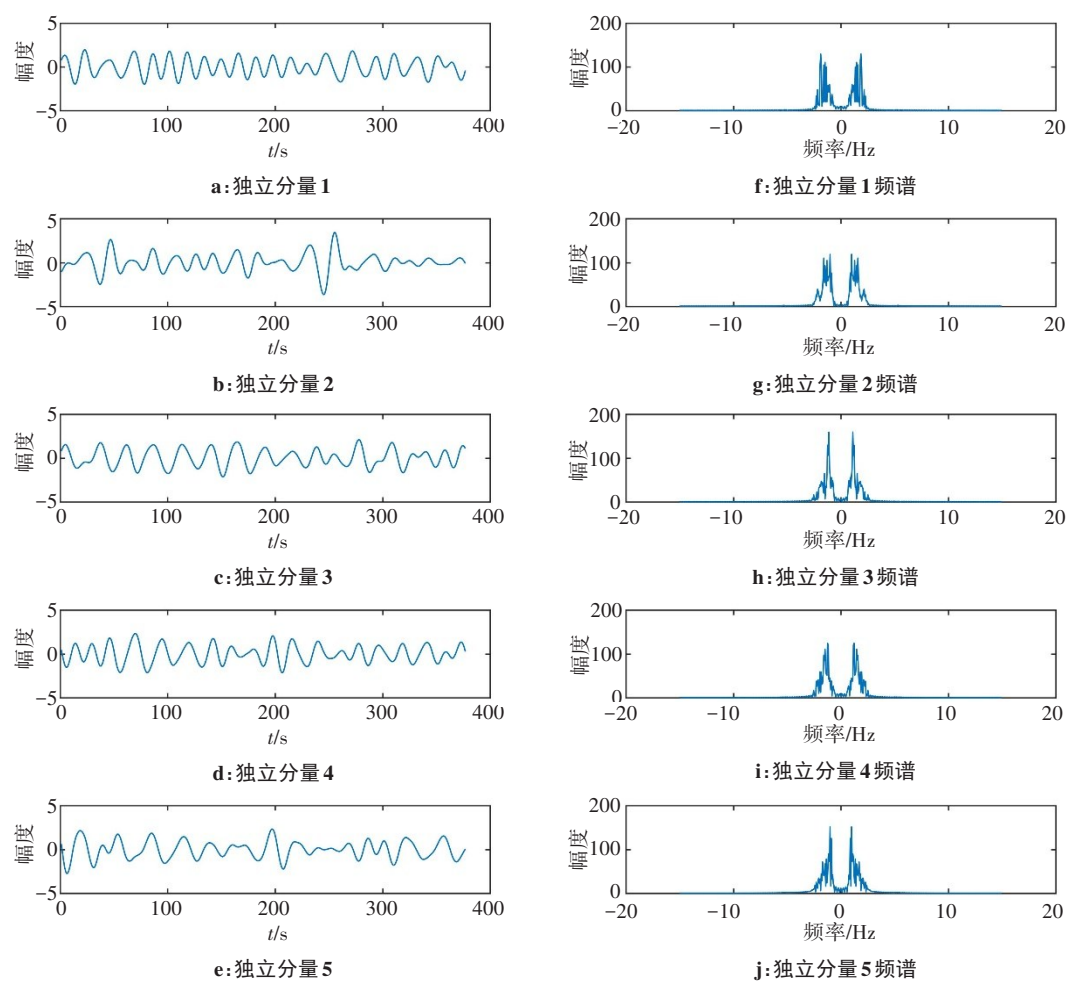


图 6 独立分量信号频谱分析示意图  
Figure 6 Independent component signal spectra analysis

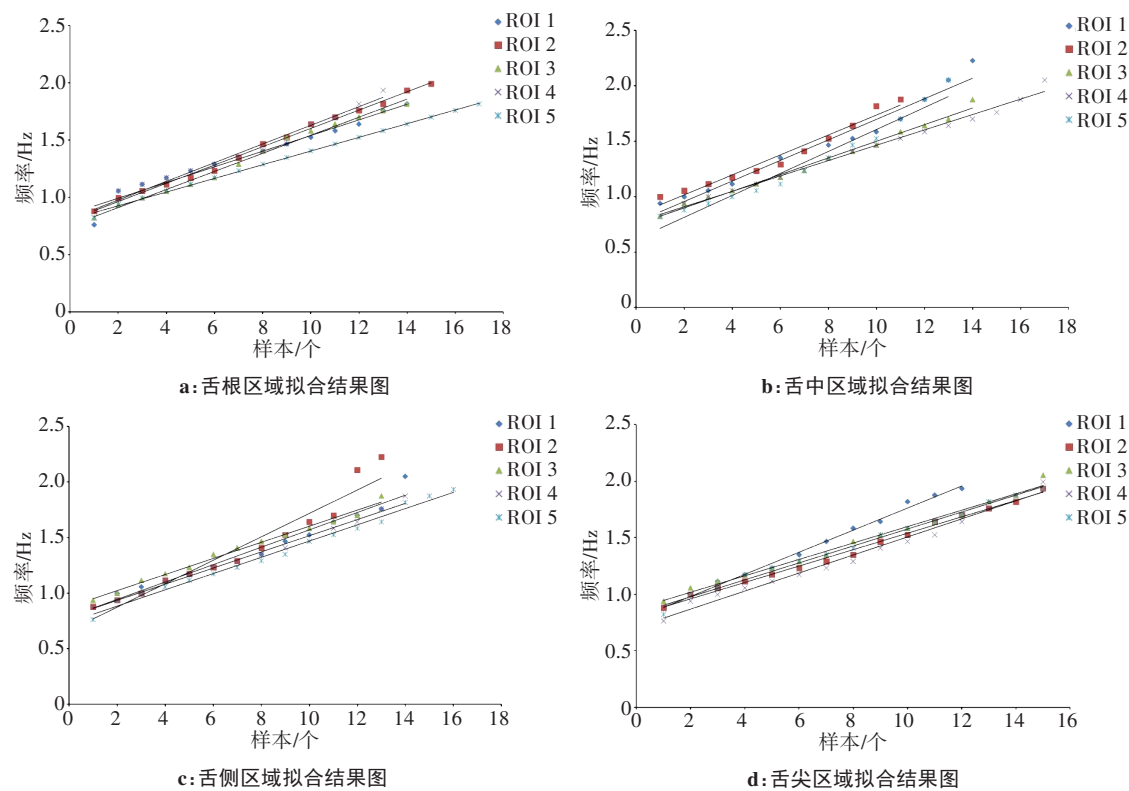


图 7 不同舌区拟合结果图  
Figure 7 Fitting results in different tongue regions



表2 不同区域的微血管运动频率测量结果(Hz)  
Table 2 Microvascular motion frequency measurements in different regions(Hz)

区域	微血管自律运动频率				
	ROI <sub>1</sub>	ROI <sub>2</sub>	ROI <sub>3</sub>	ROI <sub>4</sub>	ROI <sub>5</sub>
舌根	0.099 0	0.070 4	0.069 7	0.089 8	0.101 2
舌中	0.066 3	0.078 7	0.094 9	0.061 6	0.085 3
舌侧	0.069 4	0.077 3	0.088 3	0.064 5	0.072 4
舌尖	0.067 7	0.090 6	0.073 4	0.074 1	0.077 6
拇指指甲	0.079 6	0.100 4	0.069 7	0.073 2	0.065 1
食指指甲	0.073 9	0.063 1	0.069 3	0.069 6	0.010 1
中指指甲	0.070 9	0.071 9	0.067 1	0.071 4	0.070 0
无名指指甲	0.098 3	0.088 9	0.081 1	0.083 9	0.052 1
小指指甲	0.080 9	0.084 6	0.089 0	0.077 4	0.121 4
脸颊	0.063 3	0.065 1	0.082 9	0.069 3	0.106 8

为证明实验所测数据的可靠性,与文献[25]中所测数据进行对比和假设检验。该文献中使用激光多普勒微循环血流仪测量了20位健康人体,在合谷、内关、三阴交、足三里、三焦腧处穴位的血流量、血流速度,计算各穴位相对应的微血管自律运动频率,微血管自律运动频率范围为0.026 7~0.200 0 Hz。计算本实验数据和文献[25]测量数据的平均值和标准差,通过假设检验方法来判断两文献数据是否均属于微血管自律运动频率这一总体。为保证与文献[25]数据表示的一致性,将微血管自律运动频率单位换算为次/min并做以下假设。H0:假设两个样本中的所测数据属于同一总体,即均属于微血管自律运动频率。H1:假设两个样本中所测数据属于不同总体。计算所得Z值为0.558 5,  $Z<1.64_{(Z\alpha=0.05)}$ ,所以保留原假设,认为两个样本中所测数据属于同一总体,均属于微血管自律运动频率。由于本研究测量方法标准差较小,且同时适用于舌头、指甲和脸颊等不同部位微血管自律运动的测量,暗示本研究所提观测微血管自律运动频率算法具有较大的鲁棒性、普适性和稳定性。

3 讨论

本研究提出一种基于视频信号观测人体微循环血管自律运动频率的方法,通过使用手机摄像头来拍摄十几秒的舌部视频来测量人体舌部微循环血管运动,为分析微循环自律运动信号提供新的可能性。该方法相较于目前测量微血管运动的方法避免长时间使用仪器进行数据采集对人体造成的伤害,具有简单、方便的特点。但因在测量过程中由于所测量的感兴趣区域微血管分布的不同,不同区域测量所得微血管自律运动频率会有0.24~1.02次/min的差

别,具体原因有必要在未来进行进一步研究和分析。由于本研究采集信号时间较短,采集设备简单,未能检测出内皮源性和神经源性的血管振荡信号。

【参考文献】

[1] 盛有明. 微循环及心肌细胞显微图像特征参数动态测量技术及应用研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2011.  
Sheng YM. Research on dynamic measurement technology and application of feature parameters of microcirculation and cardiomyocyte microscopic image[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2011.

[2] 王冰, 盛有明, 李宏伟, 等. 自发性高血压大鼠淋巴微循环功能变化及特点研究[J]. 现代生物医学进展, 2015, (32): 6212-6217.  
Wang B, Sheng YM, Li HW, et al. Microvascular vasomotion changes in occurrence and development of hypertension [J]. Progress in Modern Biomedicine, 2015, 15(32): 6212-6217.

[3] Rivadulla C, Labra C, Grieve K, et al. Vasomotion and neurovascular coupling in the visual thalamus *in vivo* [J]. PLoS One, 2017, 6(12): e28746.

[4] Urquhart EL, Wang XL, Liu HL, et al. Differences in net information flow and dynamic connectivity metrics between physically active and inactive subjects measured by functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) during a fatiguing handgrip task [J]. Front Neurosci-Switz, 2020, 14(14): 267.

[5] Chipperfield AJ, Thanaj M, Clough GF. Multiscale, multidomain analysis of microvascular flow dynamics [J]. Exp Physiol, 2019, 105(9): 1452-1458.

[6] Smirni S, MacDonald M, Robertson C, et al. Application of cmOCT and continuous wavelet transform analysis to the assessment of skin microcirculation dynamics [J]. J Biomed Opt, 2018, 23(7): 076006.

[7] Merinopoulos I, Eccleshall S, Gunawardena T, et al. Endothelial dysfunction and coronary vasoreactivity-a review of the history, physiology, diagnostic techniques, and clinical relevance [J]. Curr Cardiol Rev, 2021, 17(1): 85-100.

[8] Tóth-Szűki V, Bari F, Domoki F. Stable laser-Doppler flow-motion patterns in the human cutaneous microcirculation: implications for prospective geroscience studies [J]. Physiol Int, 2020, 107(1): 134-144.

[9] 宋晓红, 刘明明, 仇红刚, 等. 自发性高血压大鼠肾脏和胰腺微循环血流灌注和自律运动变化 [J]. 微循环学杂志, 2020, 30(2): 1-6.  
Song XH, Liu MM, Zhang HG, et al. Renal and pancreatic microcirculatory blood perfusion and vasomotion spontaneously hypertensive rats [J]. Chinese Journal of Microcirculation, 2020, 30(2): 1-6.

[10] Rieger S, Klee S, Baumgarten D. Experimental characterization and correlation of mayer waves in retinal vessel diameter and arterial blood

- pressure[J]. *Front Physiol*, 2018, 9(9): 892.
- [11] Javier P, Benites J, Gareth O, et al. Impact of the potential antitumor agent 2-(4-hydroxyphenyl) amino-1, 4-naphthoquinone (Q7) on vasomotion is mediated by the vascular endothelium, but not vascular smooth muscle cell metabolism[J]. *J Cardiovasc Pharm*, 2021, 77(2): 245-252.
- [12] Roustit M, Cracowski JL. Non-invasive assessment of skin microvascular function in humans: an insight into methods [J]. *Microcirculation*, 2012, 19(1): 47-64.
- [13] Nilsson H, Aalkjaer C. Vasomotion: mechanisms and physiological importance[J]. *Mol Interv*, 2003, 3(2): 81-89.
- [14] Kanders K, Grabovskis A, Marcinkevics Z, et al. Assessment of conduit artery vasomotion using photoplethysmography [C]// *International Society for Optics and Photonics*. 2013: 90320L.
- [15] Turner J, Belch JF, Khan F. Current concepts in assessment of microvascular endothelial function using laser doppler imaging and iontophoresis[J]. *Trends Cardiovasc Med*, 2008, 18(4): 109-116.
- [16] Corstian AE, Lagrand WK, Brugts JJ, et al. The microcirculation in health and critical disease[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2008, 51(2): 161-170.
- [17] Roustit M, Cracowski JL. Assessment of endothelial and neurovascular function in human skin microcirculation[J]. *Trends Pharmacol Sci*, 2013, 34(7): 373-384.
- [18] Katarzynska J, Cholewinski T, Sieron L, et al. Flowmotion monitored by flow mediated skin fluorescence (FMSF): a tool for characterization of microcirculatory status[J]. *Front Physiol*, 2020, 11(11): 702.
- [19] 蒋升, 李佩伦, 宁钢民. 舌下微循环显微影像监测及其应用研究进展[J]. *中国生物医学工程学报*, 2021, 40(1): 99-106.  
Jiang S, Li PL, Ning GM. Progress of sublingual microcirculation microimage monitoring and application [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2021, 40(1): 99-106.
- [20] 程敏, 陈兆学. 基于指端脉搏波视频信号的心率稳定检测算法[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(2): 215-222.  
Cheng M, Chen ZX. An algorithm based on video signals of pulse waves on the finger tip for stable detection of heart rates[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2019, 36(2): 215-222.
- [21] Huang XJ, Lei Z, Xia JT, et al. Pulse wave cycle features analysis of different blood pressure grades in the elderly[J]. *Evid-Based Compl Alt*, 2018, 2018: 1-12.
- [22] 谢家宇, 蔡坤宝. 基于连续小波变换的中医脉象信号处理[J]. *生物医学工程学杂志*, 2004, 21(3): 469-472.  
Xie JY, Cai KB. Pulse signal processing based on continuous wavelet transform [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2004, 21(3): 469-472.
- [23] 李春雪, 郭家赫, 白雪梅, 等. 基于Mallat算法脑电信号处理的新方法[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(6): 80-88.  
Li CX, Guo JH, Bai XM, et al. A new method of EEG signal processing based on mallat algorithms[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(6): 80-88.
- [24] 陈红, 于晓升, 吴成东, 等. 参数化水平集活动轮廓模型的快速图像分割算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(1): 6-10.  
Chen H, Yu XS, Wu CD, et al. Fast image segmentation algorithm based on parametric level set active contour model[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(1): 6-10.
- [25] 穆祥, 段惠琴, 陈武, 等. 膻穴实质与微血管相关的生理学研究[J]. *中国中医基础医学杂志*, 2001, 12: 47-52.  
Mu X, Duan HQ, Chen W, et al. Physiological study on the relationship between the essence of acupuncture point and the microvascular[J]. *Journal of Basic Chinese Medicine*, 2001, 12: 47-52.

(编辑:陈丽霞)