

从功能性近红外光谱法的光学信号中 提取心动和呼吸特征

潘津津¹ 焦学军¹ 姜国华¹ 焦典² 姜劲¹ 张朕¹ 曹勇¹ 徐凤刚¹

¹中国航天员科研训练中心人因工程重点实验室, 北京 100094

²天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 认知神经科学的快速发展,使得各种生理参数的客观测量得以实现,其中功能性近红外光谱(fNIRS)是一种新兴的脑成像方法,可以检测经过人体皮肤组织的血液动力学指标,包括含氧血红蛋白(HbO)、脱氧血红蛋白(Hb)和总血红蛋白(tHb)含量。心电图(ECG)、呼吸波(RSP)则是常用的生理参数检测方法。研究目的是尝试利用fNIRS方法测得心率(HR)和呼吸率(BR)特征,利用时域形态学特征法、频域带通滤波法以及小波分解与重构方法提取心率及呼吸率,并与ECG、RSP真实信号的HR(77.0199)、BR(22.9153)进行对比。结果发现三种方法均可从fNIRS信号中提取出HR信号,其中用频域带通滤波器方法得到的HR为76.8807,偏差最小为-0.1392,利用相同方法提取的BR为21.7039,偏差为-1.2114。基本实现了从fNIRS信号中提取心率和呼吸率的目标。

关键词 医用光学;功能性近红外光谱成像;血氧变化;算法;心率;呼吸率

中图分类号 O433.4; TP274.52; O242.2; TN012

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0917001

Extracting Cardiac and Respiratory Features from Optical Signal of Functional Near-Infrared Spectroscopy

Pan Jinjin¹ Jiao Xuejun¹ Jiang Guohua¹ Jiao Dian² Jiang Jing¹ Zhang Zhen¹
Cao Yong¹ Xu Fenggang¹

¹Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China

²School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The rapid development of cognitive neuroscience makes objective determination of various physiological parameters possible. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) is an emerging brain imaging tool that can detect human skin tissue hemodynamic indices including oxygenated hemoglobin (HbO), deoxygenated hemoglobin (Hb) and total hemoglobin (tHb). Electrocardiograph (ECG) and respiration wave (RSP) are also two important physiological parameter determination methods. In order to obtain multiple physiological parameters using fNIRS only, three algorithms, including time-domain waveform characteristic analysis, frequency-domain band-pass filtering and wavelet decomposition and reconstruction, are used to calculate heart rate (HR) and breath rate (BR) based on the HbO data collected by fNIRS. The calculated HR and BR results are compared with the real HR (77.0199) surveyed by ECG and BR (22.9153) surveyed by RSP. The results show that the three methods can all extract HR from fNIRS effectively, wherein the band-pass filtering can extract the most accurate HR (76.8807) with the deviation of -0.1392. The BR (21.7039) with the deviation of -1.2114 is also calculated by the same algorithm. Extracting HR and BR features using fNIRS signal is realized.

收稿日期: 2015-01-19; 收到修改稿日期: 2015-04-22

基金项目: 国家973计划(2011CB711000, HF2011Z-Z-B-02)

作者简介: 潘津津(1990—),男,硕士研究生,主要从事功能性近红外光谱成像用于脑功能检测方面的研究。

E-mail: winston331@126.com

导师简介: 焦学军(1969—),男,副研究员,主要从事近红外光谱设备的软硬件开发方面的研究。

E-mail: jxjisme@sina.com(通信联系人)

Key words medical optics; functional near-infrared spectroscopy imaging; blood oxygen change; algorithm; heart rate; breath rate

OCIS codes 170.4630; 120.4640; 260.3060; 300.6340; 110.7410

1 引 言

近些年来,神经科学迎来了快速的发展,与人、人的认知及行为绩效方面相关的研究大量开展。神经科学研究的领域非常广泛,涉及神经系统的结构、功能、病理等方面。同时,各种神经系统生理信号检测方法、技术的进步也推动了相关脑科学研究的发展。功能性近红外光谱成像(fNIRS)技术就是近年来兴起的一种脑成像技术^[1-3],可以无创便捷地实现大脑皮层中血液动力学指标检测,能够测量含氧血红蛋白(HbO)、脱氧血红蛋白(Hb)、组织血氧饱和度(TSD)等中枢神经系统的血氧指标。另外,心电图(ECG)、呼吸波(RSP)等测量外周神经系统的生理参数检测方法^[4-5]也可以提供重要的特征指标来反映大脑结构、功能、病理等方面的活动情况。

同时使用fNIRS、ECG及RSP可以获得比较丰富的神经活动指标,但是多件设备的同时使用也必然带来操作繁杂、准备时间冗长等问题。本文针对这一问题,创新性地提出使用fNIRS生理检测方法来实现原本需要三种方法的参数测量,从fNIRS信号中提取ECG、RSP信号的心率(HR)和呼吸率(BR)特征指标。该研究有直接的应用需求,不仅能够高效测量多种参数,同时可以节约实验资源和成本。

fNIRS是利用700~900 nm近红外光来监测生物组织血氧含量变化的一种生理检测技术^[6]。脑组织在近红外光谱范围内相对透明,其中某些载色体的氧化状态会直接影响脑对近红外光的吸收率^[7-8]。人体组织中对于近红外光的主要吸收成分包括水、HbO和Hb。fNIRS得到的血液动力学数据(HbO、Hb浓度)和组织的氧化作用以及新陈代谢紧密相关,因此利用fNIRS进行大脑皮层功能和活动研究具有一定的生理学基础^[9]。利用修正的Beer-Lambert定律^[10],同时测量不同时间内近红外光谱范围内两种不同的波长,可以测得HbO以及Hb的浓度变化。这项技术可以便携、安全、廉价、无创地实现对大脑皮层状态的监测^[11-12]。鉴于fNIRS的上述优点,近年来研究人员利用fNIRS开展了大量研究,广泛应用于大脑特性研究、脑机接口、脑力负荷评估、新生儿检测、脑力疲劳检测、麻醉深度检测、医疗康复和认知增强等领域^[8-9,13]。

ECG是人体重要的外周神经系统电生理信号。心脏在每个心动周期中,从起搏点、心房、心室依次兴奋,伴随产生的体表检测电位变化信号就是ECG,它是心脏兴奋发生、传递和恢复过程的客观指标。在每个心动周期中均包含一组P-QRS-T波群,有时还包括一个U波^[14]。

ECG不仅用于病理诊断等临床使用,也用于运动员、特殊工作人员心脏功能变化检测及选拔,也有关于不同体力及脑力工作的心脏功能变化研究,以及测量高山、高空、深海等环境中人体心脏功能变化等的科研领域^[15]。

RSP可以通过传感器检测人体呼吸情况,人体呼吸造成的胸腔及腹部的起伏,通过传感器检测可以转化为电流信号,进而规律性起伏波动的电流信号响应可以反映生命体的呼吸波形情况^[16-17]。

本文使用不同算法从fNIRS信号中提取ECG的R-R间期、心率及RSP周期、呼吸频率等特征,从而实现利用fNIRS一种生理信号实现三种生理信号检测设备的功能。实验数据来源于一项基于fNIRS的N-back任务脑力负荷研究,实验对象为12名身心健康的21~24岁大学生被试。

2 数据采集及处理过程

对12名21~24岁在校大学生被试进行了一组N-back任务脑力负荷诱发实验,实验过程中同时采集fNIRS、ECG及RSP信号。被试平均年龄为23岁,为避免性别差异对结果的影响,被试全部为男性,其中右利手9名。利用Artinis Oxymon III近红外光谱仪(Artinis医疗设备公司,荷兰)测量操作者前额部分血氧数据^[18],实验中使用了4个光源(每个光源均可发射856 nm和762 nm的近红外光),4个光接收器探测器,光源与接收器间距为3 cm,形成了10通道网络布局(图1),采样率为50 Hz,且fNIRS探头组布局在前额叶区域。另外,利用BIOPAC MP150多生理参数测量仪测量ECG和RSP数据,采样率均为1000 Hz。

fNIRS是一种血液动力学响应信号,近红外光进入大脑皮层前后的信号变化可以反映近红外光路径中的血液动力学指标变化(图2)。利用修正的Beer-Lambert定律^[19],同时测量不同时间内近红外光谱范围内两种不同的波长,可以测得HbO、Hb以及tHb的浓度变化,如图3所示。

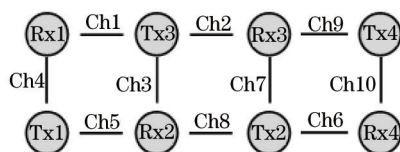


图1 fNIRS 光学探头通道布局示意图

Fig.1 Schematic diagram of fNIRS optical probe channels

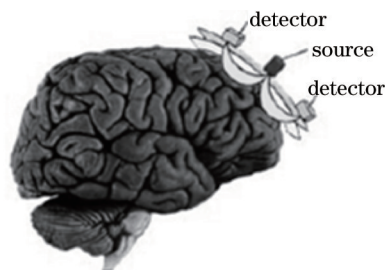


图2 fNIRS 光学检测示意图

Fig.2 Schematic diagram of fNIRS optical detection

图4所示为某一名被试的ECG及RSP信号波形。ECG是常用的生理检测方法,规范的ECG信号可以提取时域形态学特征(如R-R间期、RS幅度差等特征)及心率变异性时域特征(HRV)[如R波间期均值(mRR),HR,R波间期标准差(SDNN)等特征]。RSP信号波形存在较大的个体差异性,常用的信号特征包括呼吸周期、呼吸频率、呼吸波峰等。

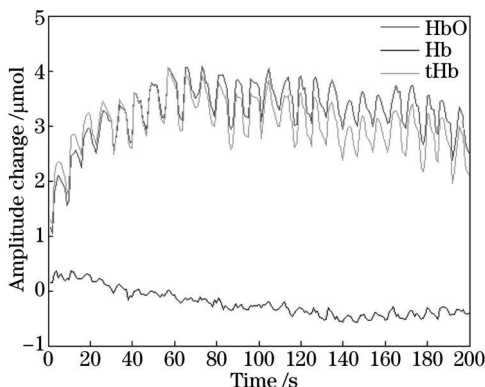


图3 fNIRS 信号波形

Fig.3 Signal features of fNIRS

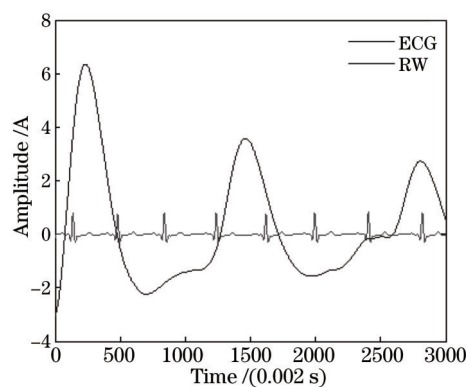


图4 ECG、RSP 信号波形

Fig.4 Signal features of ECG and RSP

利用小波分解与重构、时域形态学特征分析以及带通滤波器三种方法,对fNIRS信号进行了处理,提取了ECG信号的R-R间期、HR、SDNN特征及RSP信号的周期与频率。同时将上述fNIRS中提取的心动及呼吸特征与真实ECG、RSP信号进行了对比分析。

小波分解与重构方法是对信号进行小波分解后,利用门限阈值等形式对分解得到的小波系数进行不同权重处理,然后再对子小波信号进行重构便可以达到信号去噪的目的。实验中提取包含心动或呼吸成分的子小波,其他小波作为干扰滤除^[20-21]。

时域形态学特征分析法是观察、计算、提取、分析形态学上的波形特征的方法。通过对fNIRS波形信号的分析,发现大约在每1~2s之内,规律性地出现一对波峰、波谷,对比发现与ECG信号的周期相似,因此推断其为心动干扰。fNIRS的此波动信号有波峰缓和圆滑、波谷尖锐的特点,因此计划分别通过提取波峰或波谷的时间与ECG周期进行比较验证。具体使用的波峰数学计算方法为小区间内寻找峰值点,该小区间的选取参考fNIRS的波动周期及正常HV范围确定,最终确定的滑动窗时间范围为0.8~2.2s,小区间峰谷提取方法与小区间波峰提取方法类似,仅需在提取前进行取相反数运算,提取峰值后再进行一次相反数运算即可^[22]。

带通滤波器方法则是利用带通滤波提取fNIRS信号中与心动、呼吸频率接近的信号成分,将其他频带的信号作为干扰信号滤除,然后对fNIRS中留下的心动及呼吸频率附近的信号进行分析。利用带通为1~2Hz的滤波器提取fNIRS心动信号,利用0.2~0.4Hz滤波器提取呼吸信号^[23-24]。

3 实验结果

图5所示为同一次任务(1-Back)中利用心电放大器和呼吸波放大器采集的 ECG 和 RSP 信号,利用专门测量方法测得的信号质量稳定清晰,因此简单利用几何形态学方法便可求出 HR 及 BR。测试任务中测得的平均 HR 为 77.0199 counts/min,平均 BR 为 22.9135 counts/min。

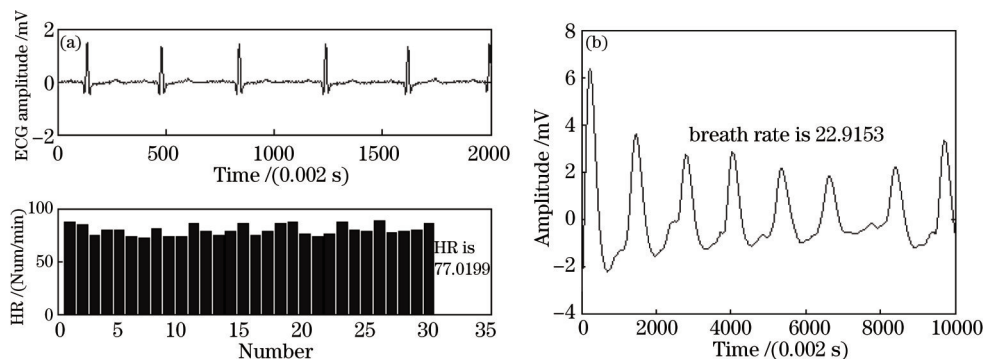


图 5 ECG、RSP 信号及测得的 HR、BR。(a) HR; (b) BR

Fig.5 Calculated HR and BR from ECG and RSP signal. (a) HR; (b) BR

3.1 时域特征法结果

从 10 通道 fNIRS 信号中选取噪声较小的其中一个通道的 HbO 特征,如图 6 所示,利用前述时域形态学特征方法,从 fNIRS 信号中提取 HR 结果。分析 fNIRS 信号可以发现, fNIRS 在心周期附近会出现规律的波峰波谷,波峰稳定但缓和,波谷稳定性较差但却尖锐。稳定与尖锐都是提取明显特征的优点,且其在波峰波谷特征上优势不同。因此同时采取了波峰及波谷两种形态学特征进行尝试,从 fNIRS 提取波峰波谷特征后,进行相邻波峰(谷)差值计算,进而通过计算求出每一跳心率及任务中平均心率。

$$F(t) = C_{\text{HbO}}(t), \tag{1}$$

$$F'(t) = 0, \tag{2}$$

$$F''(t) < 0 \text{ (peak)}. \tag{3}$$

结果发现,利用波峰特征法从 fNIRS 中求得心动 HR 为 77.7127,与 ECG 信号测得值的偏差为 0.6928,波谷法求得的 HR 为 77.9841,偏差为 0.9642。

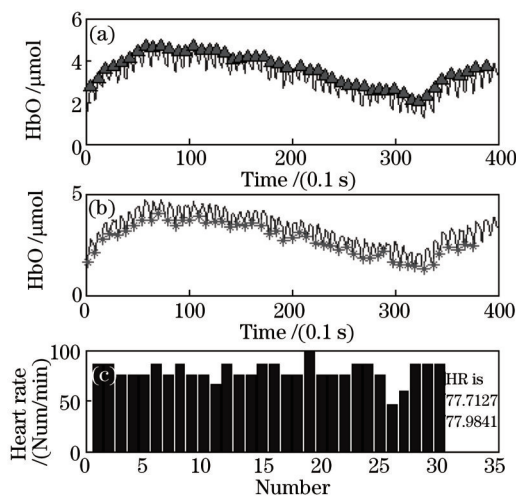


图 6 fNIRS 信号波形

Fig.6 Signal features of fNIRS

3.2 带通滤波法结果

图 7 所示为利用带通滤波器方法从 fNIRS 信号中提取的 HR 结果,红色标记点为经带通滤波后识别的波峰值,通过这些波峰间期间接求得 HR 和 BR。心动信号利用 1~2 Hz 带通滤波器提取,呼吸信号则利用 0.2~0.4 Hz 滤波器提取。结果发现利用带通滤波方法提取的 HR 为 76.8807,与 ECG 信号测得值的偏差为 -0.1392,而相应

的 BR 为 21.7039, 与 RSP 信号测得值的偏差为 -1.2114。

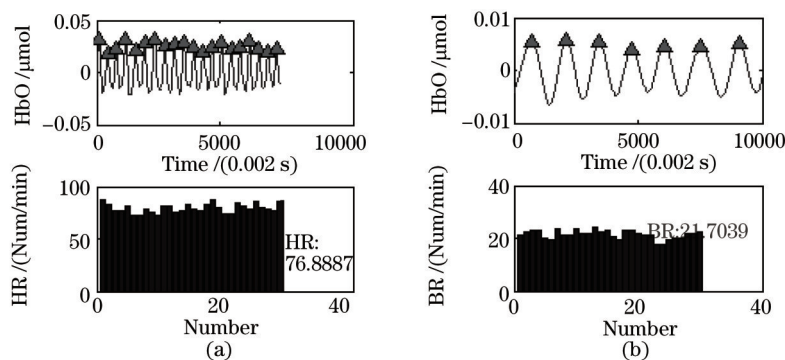


图 7 带通滤波器法测得的 HR 和 BR。(a) HR; (b) BR

Fig.7 Calculated HR and BR by band-pass filter. (a) HR; (b) BR

3.3 小波分解与重构法结果

利用小波分解与重构方法对 fNIRS 信号进行处理。如(4)式所示, 分别设计高通滤波器和低通滤波器两组滤波器的系数可实现小波重构, 而重构也只是分解的逆过程, 重构算法和分解算法是相对应而互逆的。

$$\begin{cases} x(t) = \sum_k cA_1(k)\phi_{j-1,k}(t) + \sum_k cD_1(k)w_{j-1,k}(t) \\ cA_1(k) = \sum_n h_0(n-2k)cA_0(n) \\ cD_1(k) = \sum_n h_1(n-2k)cA_0(n) \end{cases} \quad (4)$$

由于任务中 fNIRS 信号的采样率为 10 Hz, 由小波分解与重构理论可知进行 5 级分解, $2^5=32, 10 \text{ Hz}/32=0.3125 \text{ Hz}$, 可以较好地覆盖 1~2 Hz 心动信号频带。因此利用 5 级分解, 并利用第 4~6 节细节小波进行重构, 进而利用包含心动信号的小波峰值间期计算出 HR。结果发现利用小波分解与重构方法提取的 HR 为 78.1250, 与 ECG 信号测得值的偏差为 1.1051。

3.4 fNIRS 信号提取 HR 及 BR 小结

利用时域波形特征法、带通滤波法以及小波分解与重构方法从 fNIRS 信号中提取 ECG 及 RSP 的 HR、BR 信息, 并与通过专门 ECG、RSP 测量设备测得的 HR、BR 进行比较。ECG 信号测得的平均 HR 为 77.0199, 通过三种方法由 fNIRS 信号求得的 HR 如表 1 所示, 其中由带通滤波器方法求得的 HR 为 76.8807, 偏差最小为 -0.1392。表 2 为利用带通滤波器方法测得的 BR, RSP 放大器测得的 BR 为 22.9153, 带通滤波器测得的 BR 为 21.7039, 偏差为 -1.2114。

表 1 不同方法测得的 HR 结果

Table 1 Calculated HR by the three methods

	HR	Deviation
ECG	77.0199	--
fNIRS wave crest	77.7127	0.6928
fNIRS wave valley	77.9841	0.9642
fNIRS bandpass filter	76.8807	-0.1392
fNIRS wavelet	78.1250	1.1051

表 2 带通滤波方法测得的 BR 结果

Table 2 Calculated BR by bandpass filter

	BR	Deviation
RSP	22.9153	--
fNIRS bandpass filter	21.7039	-1.2114

4 讨论与分析

该研究的目的是利用 fNIRS 一种生理信号实现三种生理信号检测设备的功能, 即仅利用 fNIRS 获得除 fNIRS 信号外的 HR、BR 信号特征。

通过分析,从 fNIRS 中获取 HR、BR 信息存在可能性,因此利用时域波形特征法、带通滤波法以及小波分解与重构方法进行了尝试,并与心电及脉搏波放大器采集的真实信号进行比较。

结果表明,三种方法均可以从 fNIRS 信号中提取心率及呼吸频率特征,且均与真实 HR、BR 值接近。三种方法中,带通滤波器方法表现出了最佳性能,通过带通滤波器方法求得的 HR 与真实值偏差最小,偏差为-0.1392,同时带通滤波器方法意义明确,操作简单。带通滤波器方法在提取 BR 方面也显示了优良的性能,偏差为-1.2114。

由于综合使用三种方法从 fNIRS 中获取心率信息,因此结果更加稳定,在各种状态下均有合适的方法,比之前其他研究的提取方法适用性更加广泛;同时获得心率和呼吸率也是该研究的另一个创新点。

综上所述,初步证明通过 fNIRS 一种信号提取出 HR 和 BR 特征是可行的,带通滤波器方法在该功能实现中表现出了较好的效果。研究结果具有一定启示意义,各种生理测量设备的发展虽然能够提供更全面的信息,但单纯地增加设备种类及数量也会对实验造成负担及干扰,通过尽可能简单少量的方法获得尽可能多的信息是必然的发展趋势,这种高效绿色的生理测量方法思路也具有一定意义。

参 考 文 献

- 1 Pan Jinjin, Jiao Xuejun, Jiang Jing, *et al.*. Mental workload assessment based on functional near-infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1130002.
潘津津, 焦学军, 姜 劲, 等. 利用功能性近红外光谱成像方法评估脑力负荷[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1130002
- 2 Zhou Zhenyu, Yang Hongyu, Gong Hui, *et al.*. Brain signal analysis of functional near-infrared imaging based on Hilbert-Huang transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 307-312.
周振宇, 杨宏宇, 龚 辉, 等. 基于希尔伯特-黄变换的近红外脑功能成像信号分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 307-312.
- 3 Durantin G, Gagnon J F, Tremblay S, *et al.*. Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload[J]. *Behavioural Brain Research*, 2014, 259(2): 16-23.
- 4 Elmes D, Kantowitz B, Roediger III H. *Research Methods in Psychology*[M]. Belmont: Cengage Learning, 2011: 221-230.
- 5 Ge Liezhong, Li Hongting, Wang Duming. *Engineering Psychology* [M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2012: 185-190.
葛列众, 李宏汀, 王笃明. *工程心理学*[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012: 185-190.
- 6 Strait M, Scheutz M. What we can and cannot (yet) do with functional near infrared spectroscopy[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2014, 8(5):117-125.
- 7 Pan J J, Jiao X J. New application, development and aerospace prospect of fNIRS[J]. *Engineering*, 2013, 5(5): 47-52.
- 8 Zhu Dan, Wu Guiling, Luo Qingming, *et al.*. Photonics diffusion for small source-detector separations of tissue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 25(5): 638-642.
朱 丹, 吴龟灵, 骆清铭, 等. 生物组织中光子微区扩散理论研究[J]. *光学学报*, 2006, 25(5): 638-642.
- 9 Gu Y, Song Y, Constantinescu A. Comparison of tumor vascular blood volume measured by near infrared spectroscopy and ¹⁹F NMR spectroscopy[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(101): S179-S181.
- 10 Xia H, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.*. An approach of open-path gas sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(6): 437-440.
- 11 Villringer A, Chance B. Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function[J]. *Trends in Neurosciences*, 1997, 20(10): 435-442.
- 12 Jiao X J, Bai J, Chen S G, *et al.*. Monitoring mental fatigue in analog space environment using optical brain imaging[J]. *Engineering*, 2013, 5(5): 53-57.
- 13 Wu Chunyang, Lu Qipeng, Ding Haiquan, *et al.*. Near-infrared non-invasive blood glucose measurement using human tissue fluid[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1117001.
吴春阳, 卢启鹏, 丁海泉, 等. 利用人体组织液进行近红外无创血糖测量[J]. *光学学报*, 2013, 33 (11): 1117001.
- 14 Halperin H R, Berger R D. ECG artifact reduction system[P]. US Patent 8666480, 2014.
- 15 Kwon S, Kang S, Lee Y, *et al.*. Unobtrusive monitoring of ECG-derived features during daily smartphone use[C]. 2014 36th Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014: 4964-4967.
- 16 Okawai H, Yajima T, Imamatsu T, *et al.*. Sophisticated rate control of respiration and pulse during sleep studied by body motion wave[C]. XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, 2014: 1895-1898.
- 17 Gao Duorui, Zhong Liujun, Zhao Zhao, *et al.*. Zoom optical system design based on Matlab[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0416002.

- 高铎瑞, 钟刘军, 赵 昭, 等. 基于 Matlab 的变焦光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416002.
- 18 Gayda M, Gremeaux V, Drigny J, *et al.*. Muscle VO₂ and forearm blood flow repeatability during venous and arterial occlusions in healthy and coronary heart disease subjects[J]. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, 2015, 59(2): 177-183.
- 19 Baker W B, Parthasarathy A B, Busch D R, *et al.*. Modified Beer-Lambert law for blood flow[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(11): 4053-4075.
- 20 Dixit A, Sharma P. A comparative study of wavelet thresholding for image denoising[J]. *Image, Graphics, and Signal Processing*, 2014, 12: 39-46.
- 21 Upadhyay P, Kar R, Mandal D, *et al.*. An efficient differential evolution with wavelet mutation algorithm for optimal IIR filter design[J]. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2014, 6(5): 350-367.
- 22 Withayachumnankul W, O'Hara J F, Cao W, *et al.*. Lower bound of sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy[C]. 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IEEE, 2014: 1-2.
- 23 Targum S D, Burch D J, Asgharnejad M, *et al.*. Use of band-pass filter analysis to evaluate outcomes in an antidepressant trial for treatment resistant patients[J]. *European Neuropsychopharmacology*, 2014, 24(8): 1188-1195.
- 24 Kamma A, Reddy G S, Parmar R S, *et al.*. Dual-band filter for WiMAX and WLAN with improved upper stop band performance[J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2014, 50: 131-138.

栏目编辑: 吴秀娟