

利用功能性近红外光谱法研究大脑皮层血氧 情况随任务特征变化规律

潘津津¹ 焦学军¹ 焦典² 王春慧¹ 徐凤刚¹ 姜劲¹ 张朕¹ 曹勇¹

¹中国航天员科研训练中心人因工程国家重点实验室,北京 100094

²天津大学精密仪器与光电子工程学院,天津 300192

摘要 功能性近红外光谱(fNIRS)成像是一种新兴的光学脑成像技术。已有大量基于fNIRS简单任务脑力负荷评估方面的研究,但当实验任务从单一简单任务变化为复杂综合任务时,相应方法不能直接简单套用。借助于fNIRS技术,通过复杂任务特征分解的思路进行尝试,研究大脑皮层血氧情况随复杂任务各任务特征的变化规律,为fNIRS评估复杂任务脑力负荷等研究提供思路 and 基础。结果发现:前额叶大脑皮层(PFC)区域的含氧血红蛋白(HbO)对复杂度、时间压力和有/无控制三种任务特征的变化均有较高的激活程度响应;视觉皮层(VC)区域的HbO对不同时间压力任务特征导致的任务难度变化有较高的激活程度响应,但对不同复杂度和有/无控制特征的激活程度响应较低;运动皮层(MC)区域HbO对有/无控制输出特征有较高的激活程度响应,对不同时间压力特征的激活程度响应较弱。

关键词 医用光学;功能性近红外光谱成像;血氧变化;含氧血红蛋白;激活程度

中图分类号 O433.4; TP274.52; O242.2; TN012 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0817001

Study on Variation in Cortex Oxygen with Task Features Using Functional Near-Infrared Spectroscopy

Pan Jinjin¹ Jiao Xuejun¹ Jiao Dian² Wang Chunhui¹ Xu Fenggang¹

Jiang Jing¹ Zhang Zhen¹ Cao Yong¹

¹State Key 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 300192, China

Abstract Functional near-infrared spectroscopic (fNIRS) imaging is an emerging optical brain imaging technique. Numerous studies have been carried out for assessment of mental workload in simple tasks by fNIRS, but these methods can not be directly applied when the experimental task is complex and integrated. A task decomposition idea is tried to study the variation in cortex blood oxygen with every task feature of complex task using fNIRS, and to find ideas and basis for mental workload assessment in complex tasks. The results show that the activation degree of oxygenated hemoglobin (HbO) in prefrontal cortex (PFC) area makes response to the change of complexity, time pressure, and with or without control strongly; the area of visual cortex (VC) has strong activation degree as the feature of time pressure changes, but weak activation for complexity and with or without control; motor cortex (MC) has strong activation degree with the feature of control existing or not, but its relationship with the change of complexity and time pressure is weak.

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-04-22

基金项目: 国家973计划(2011CB711000)、国防重点实验室自主课题(HF2011-Z-Z-A-01)、飞天基金(FTKY201509)

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 spectroscopic imaging; blood oxygen change; oxygenated hemoglobin; activation degree

OCIS codes 170.6510; 120.4630; 300.6340; 110.7410

1 引 言

功能性近红外光谱(fNIRS)成像是生物医学和认知神经科学领域中新兴的一种光学脑成像技术。fNIRS利用700~900 nm波段的近红外光谱发射进入局部大脑皮层组织,近红外光在组织内经折射、吸收后再从大脑皮层组织发射出来,通过计算近红外光经过皮层前后的光谱变化来反映对应区域大脑皮层血液动力学指标的变化情况^[1-3]。

fNIRS方法的光学信号可以反映的血液动力学指标主要包括含氧血红蛋白(HbO)、脱氧血红蛋白(Hb)、组织血氧饱和度(TSI)等^[4-5]。fNIRS光谱成像法能够反映这些血氧指标,是因为近红外光谱对于大脑皮层组织相对透明,组织中某些吸光成分载色体的氧化状态直接影响大脑皮层对近红外光的吸收率,如水、HbO、Hb等成分。同时测量近红外光谱范围内两种不同波长光的变化,利用修正的Beer-Lambert法则进行计算,就可以得到HbO以及Hb的浓度变化^[6-7]。

利用fNIRS方法测得的HbO、Hb等血液动力学指标,与局部组织的血液氧化情况以及新陈代谢密切相关^[8],而大脑皮层的血氧变化情况又直接与大脑活动功能情况相关^[9],因此利用大脑皮层血氧情况进行大脑认知活动研究具有直接的生理理论基础^[10-11]。

之前也进行过基于fNIRS评价简单基本任务(N-back任务)脑力负荷的研究^[11],发现fNIRS可以有效评估简单任务脑力负荷。但是,当实验任务从简单单一任务向复杂综合任务变化时,fNIRS的响应情况也发生了变化,已无法用简单任务评价时的方法直接评估脑力负荷。一方面由于任务不再单一,复杂任务的不同特征对fNIRS血氧情况的影响未知,另一方面参与复杂任务的大脑皮层脑区响应情况也未知,并且与任务类型密切相关^[12]。因此将复杂任务的任务特征进行分解,细致地进行不同任务特征对大脑皮层全脑fNIRS血氧情况的影响研究,成为了研究复杂任务首要解决的问题。

本文实验任务为模拟航天器交会对接任务(SRD)^[13-15],因此研究思路是针对SRD进行任务分析,分解任务特征,然后重点进行不同任务特征与全脑区fNIRS血氧情况变化关联规律研究,为进一步进行复杂任务fNIRS方法脑力负荷评估奠定基础。

2 实验设计

实验为SRD任务,任务过程中同时测量SRD任务绩效数据、全脑fNIRS客观生理参数,同时填写NASA_TLX^[16-17]主观量表。

2.1 任务特征分析

SRD任务是一种复杂综合任务,被试需要控制模拟航天器完成完整的飞船交会对接过程。SRD任务平台包括计算机和模拟交会对接专用手柄两部分。任务过程中,被试需要实时监控计算机屏幕上模拟航天器的对接情况,同时两只手通过控制手柄实现对己方模拟航天器的控制,在一定时间内完成模拟飞船交会对接任务。

SRD任务中需要监测和控制的内容主要包括速度和姿态两部分。由于SRD任务是模拟航天器空间运动,因此SRD涉及的速度及姿态均为三个维度,其中速度控制包括X轴、Y轴和Z轴三个方向,姿态控制包括俯仰、偏航和滚转三个轴向。左手分别通过水平和垂直拨动左侧手柄控制X轴和Y轴的速度,同时左手通过按动油门键或者提前设置固定值来控制Z轴速度,右手则分别通过水平和垂直拨动右侧手柄控制姿态的偏航和俯仰,同时右手通过旋转右侧手柄控制姿态的滚转。

SRD任务可以分解为监测和控制两部分,任务过程中需监控内容的多少,即任务复杂度会直接影响任务难度,同时Z轴速度会对被试造成不同的时间压力,也会影响任务难度。因此分解的任务特征包括任务复杂度、时间压力以及有无控制。对应任务特征设计的实验为三组:第一组任务为正常控制组,复杂度分三级,低难度仅需左手控制X轴速度(A1组),中难度仅需左手控制X与Y轴速度(A2组),高难度左右手需同时控制X、Y轴速度及三个轴向所有姿态(A3组);第二组任务为监控无操作对照组,被试需实时监测对接情况并做

分析判断,与组 A 区别仅在于手不需要运动控制,组内复杂度分级与组 A 相同(B1、B2、B3组);第三组任务为时间压力特征变化组,被试需正常控制 X、Y 轴速度及三个轴向姿态所有操作,组内时间压力分三级难度,其中高时间压力对应较快的 Z 轴前进速度(C1、C2、C3 组)。

通过上述实验设计,可以分别进行复杂度、时间压力以及有无控制三个任务特征与大脑皮层血氧情况变化规律研究。

2.2 实验流程

针对 20 名 20~24 岁在校大学生进行了 SRD 任务实验,平均年龄为 22 岁,均为男性,其中右利手被试 17 名,为了获取高质量的全脑区 fNIRS 信号,所有被试在实验前均剃为光头,这也是被试全部为男性的一个重要原因。实验前所有被试均了解熟悉了实验要求及操作,并自愿签署了实验参与同意书。

实验过程中同步测量 SRD 任务绩效数据、全脑 fNIRS 客观生理参数,同时填写 NASA_TLX 主观量表。

SRD 任务包括三组任务,每组任务又包括三次不同难度级别实验,每单次任务用时 2 min,任务间休息 2 min 并填写 NASA_TLX 主观量表,共 9 次任务,实验总时间为 40 min,满足实验伦理学及科学性条件。

全脑 fNIRS 的测量使用荷兰 Artinis Medical Systems 公司生产的 Oxymon III,选取的测量通道数为 40 导,采样频率为 25 Hz,覆盖脑区包括前额叶皮层(PFC)、左右运动区皮层(L_MC、R_MC)和视觉区皮层(VC)^[18-19]。每块脑区测量区域均由 4 个光源探头(Tx)和 4 个光接收器探头(Rx)组成,每个光源均可发射 762 nm 和 856 nm 的近红外光,每对 Tx_Rx 间距为 3 cm,形成如图 1 所示 10 通道网络布局,4 个测量区域通道均为相同布局。

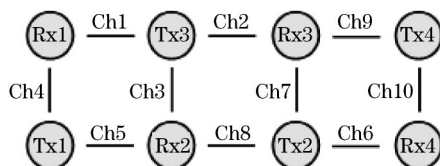


图 1 fNIRS 光学探头通道布局示意图

Fig.1 Schematic diagram of fNIRS optical detection

NASA_TLX 主观量表包括脑力需求、体力需求、时间压力、作业绩效、努力程度、挫折感 6 个维度,被试需对每个维度进行 1~10 分区间打分。

3 实验结果

针对 SRD 任务实验设计中指出的复杂度、时间压力和有无控制输出三方面特征,对实验结果进行了相应的分析。分析某一特征与全脑 fNIRS 血氧情况对应关系时,选取另外两个任务特征变量为恒定条件组,通过控制变量方法进行分析。分别得出了 SRD 任务三种任务特征对全脑 fNIRS 血氧情况的影响规律。

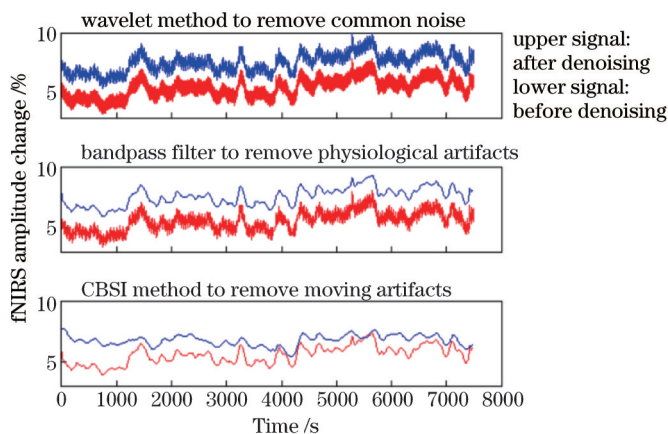


图 2 fNIRS 信号 HbO 特征三步滤波结果

Fig.2 Three-step denoising result of HbO in fNIRS

fNIRS 信号的主要特征包括 HbO、Hb 以及 tHb。先后利用小波分解与重构、带通滤波、相关性方法(CBSI)^[20-22]等算法去除了 fNIRS 信号中的白噪声、工频干扰、毛刺噪声、心动等生理干扰和运动伪迹,得到了满足统计分析

要求的纯净 fNIRS 信号(图 2 所示为 HbO 信号经滤波后的结果)。

3.1 任务复杂度

第一组实验为 3 级复杂度变化正常操作组, A1 低复杂度任务仅操作 X 轴速度, A2 中复杂度任务控制 X、Y 轴速度, A3 高复杂度任务额外还需右手控制所有姿态。分析 A1、A2、A3 任务间全脑的 fNIRS 信号激活程度差异即可得出任务复杂度变化引起的血氧变化规律。利用滤波处理后 fNIRS 的 HbO、Hb 数据相对变化值的 2 s 均值特征、2 s 斜率均值特征进行了计算, 对每个通道单次任务中的特征变化进行了均值化处理, 然后计算不同次任务间均值化后的特征变化, 然后对这些差异值进行全通道归一化处理, 得到逐通道的任务间血氧特征激活程度情况。发现利用 2 s 的 HbO 特征作为模型的最初输入可以取得稳健性和显著性最好的结果, 图 3 所示为各通道 HbO 响应任务复杂度的激活程度结果, 具体为 A3-A2 任务的 HbO 激活程度结果。图中纵坐标为脑区位置, 每个脑区通道真实布局类似图中圆点布局, 各点颜色的暖冷表征了各通道 HbO 激活程度的大小, 颜色越偏红激活程度越高。

通过图 3 可以发现, 任务复杂度变化会造成被试全脑各个脑区的 HbO 不同程度的激活, 其中 PFC 区域的激活程度最高, MC 和 VC 激活程度较低, MC 激活程度略高于 VC。A3-A2 任务间 MC 还呈现出 L_MC 激活程度明显高于 R_MC, 该结果与复杂度特征区别的情况相互关联, A3 任务相比 A2 任务复杂度变化明显, 增加了右手的操作, 且右手增加的操作较多, 难度较大, 而 A3-A2 结果显示的 L_MC 激活程度明显高于 R_MC, 也符合脑科学中大脑 MC 对侧控制肢体运动的生理学基础。图 4 结果通过方差分析(ANOVA)进一步验证了不同脑区在表征任务复杂度激活程度响应时的差异显著性, 结果各脑区激活程度值 $f_{PFC}=0.9163 \mu\text{mol}$, $f_{VC}=0.2277 \mu\text{mol}$, $f_{R_MC}=0.0822 \mu\text{mol}$, $f_{L_MC}=0.5538 \mu\text{mol}$, 显著性检验 $p<0.001$ 。

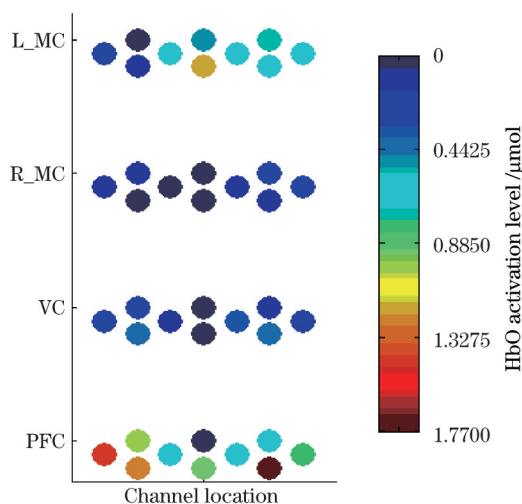


图 3 各通道 HbO 响应任务复杂度的激活程度结果

Fig.3 HbO activation degree on task complexity by channels

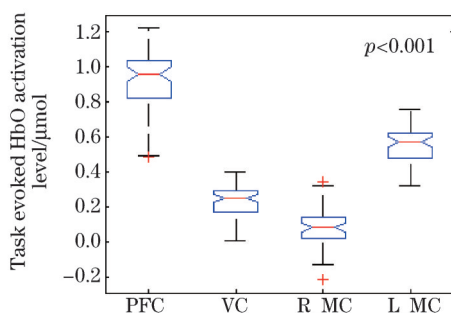


图 4 各脑区 HbO 响应复杂度激活程度方差分析(A3-A1)

Fig.4 ANOVA of HbO activation degree of 4 brain regions on task complexity (A3-A1)

3.2 时间压力

第三组任务为时间压力任务特征变量组, C1、C2、C3 组任务时间压力逐级增高, 分析该组任务间全脑的

fNIRS 信号激活程度差异即可得出任务时间压力变化引起的血氧变化规律。fNIRS 信号滤波、处理分析方法与复杂度任务特性研究相同,结果如图 5 所示。

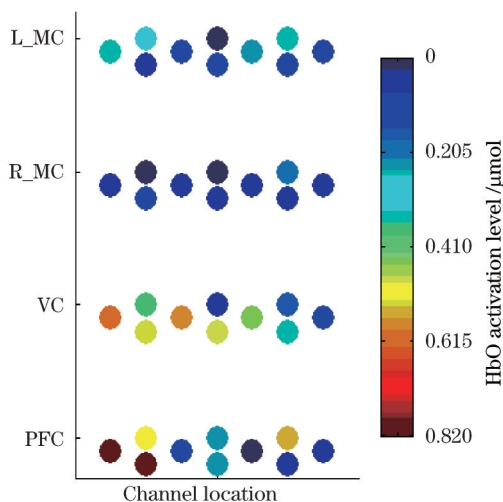


图 5 各通道 HbO 响应时间压力的激活程度结果

Fig.5 HbO activation degree on time pressure by channels

通过图 5 可以发现,任务压力变化不同时也会造成被试全脑各个脑区 HbO 不同程度的激活,其中 PFC 和 VC 区域的激活程度最高,MC 激活程度较低。与复杂度影响大脑皮层血氧情况规律的相同点在于,PFC 区域在复杂度和时间压力引起的任务难度变化对全脑区血氧响应的激活程度都很高,主要区别在于视觉区在时间压力引起的任务难度变化中对血氧激活的影响明显高于复杂度。同时 PFC 和 VC 区域 HbO 激活程度指数明显高于 L_MC 和 R_MC 区域。该结果与实验前的预期也较为一致,被试在任务后交流时反馈时间压力组任务过程中眼睛需要更加专注地盯着屏幕,大脑需高速分析判断,这些与结果中 PFC 及 VC 区域的 HbO 高激活程度也相互验证。结果通过方差分析进一步验证了不同脑区在表征任务时间压力激活程度响应时的差异显著性,结果各脑区激活程度值分别为 $f_{PFC}=0.267 \mu\text{mol}$, $f_{VC}=0.3712 \mu\text{mol}$, $f_{R_MC}=0.0371 \mu\text{mol}$, $f_{L_MC}=0.1728 \mu\text{mol}$, 显著性检验 $p < 0.001$ 。

3.3 运动控制

实验设计中第二组和第一组任务组内变量均为复杂度,第二组存在的意义是要和第一组进行组间比较。在相同复杂度级别任务中,第二组和第一组对应任务的区别在于有无控制输出,两组任务需要被试进行监测、分析、判断,区别在于第二组不需要进行控制输出,分析这两组任务间全脑 fNIRS 信号激活程度差异可得出有无控制输出变化引起的血氧变化规律。fNIRS 信号滤波、数据处理分析方法与之前相同,结果如图 6 所示。

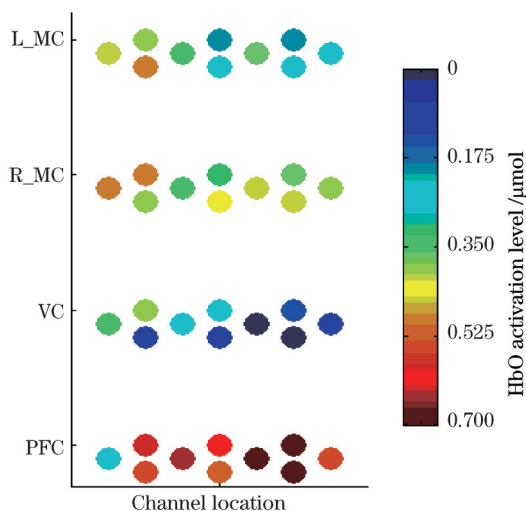


图 6 控制组一视觉组 HbO 激活程度结果(A1-B1)

Fig.6 HbO activation degree in control group minus vision group (A1-B1)

通过图6可以发现,有无控制输出也会造成被试全脑各个脑区HbO不同程度的激活,其中PFC区域的激活程度最高,然后是L_MC和R_MC区域,VC激活程度最低。与复杂度及时间压力特征影响大脑皮层血氧情况的规律具备一定的相同点,即PFC区域在复杂度和时间压力引起的任务难度变化对全脑区血氧响应的激活程度都很高。同时有无控制特征HbO激活结果表现出了新的特点,L_MC和R_MC首次在激活程度结果中表现出了较高的激活程度,这直接与有无运动控制这一任务特征变量相互关联,即在需要被试进行运动控制的任务中,运动控制导致的大脑活动情况直接与MC激活程度相关。结果通过方差分析进一步验证了不同脑区在表征有无控制输出对HbO激活程度响应时的差异显著性,结果各脑区激活程度值分别为 $f_{PFC}=0.6337 \mu\text{mol}$, $f_{VC}=0.0418 \mu\text{mol}$, $f_{R_MC}=0.2918 \mu\text{mol}$, $f_{L_MC}=0.1977 \mu\text{mol}$,显著性检验 $p<0.001$ 。

4 讨论与分析

利用全脑40导fNIRS进行SRD任务,当实验任务从简单单一任务变为复杂综合任务时,任务特点对被试大脑血氧情况的影响变得更为复杂,且不同任务特征与大脑血氧情况的关联变化规律可能会有不同,同时大脑不同脑区受不同任务特征的影响也未知,因此对SRD任务进行了任务特征分析与分解,通过实验设计保障了不同特征与全脑血氧响应关系的研究。实验中采集了SRD任务绩效数据、全脑fNIRS客观生理参数和NASA_TLX主观量表。分别研究分析了复杂度、时间压力、控制输出等特征与全脑血氧情况变化的关系。

利用HbO, Hb的2s均值、斜率均值等fNIRS多种数据特征进行逐通道的激活程度变化研究,结果发现由逐通道HbO的2s均值作为输入计算得出的通道激活指数可以实现较好的结果。1) PFC区域的HbO对复杂度、时间压力和有无控制三种任务特征的变化均有较高的激活程度响应;2) VC区域的HbO对不同时间压力任务特征导致的任务难度变化有较高的激活程度响应,但对不同复杂度和有无控制特征的激活程度响应较低;3) MC区域HbO对有无控制输出特征有较高的激活程度响应,对不同时间压力特征的激活程度响应较弱,在复杂度特征变化实验组中还发现L_MC区域比R_MC区域对HbO的激活程度响应要高。

研究中发现的结果与相关的生理学理论以及实验前的一些预期假设比较一致。如高复杂度对应右手操作增加,结果发现L_MC激活程度比R_MC激活程度高,与脑科学中大脑MC对侧控制肢体运动的生理学基础相一致;时间压力特征变大时,被试反映需要付出更加专注的注视,结果中视觉区域的高激活程度也与之相一致。

针对不同任务特征得出的血氧激活程度响应规律,充分说明在研究复杂任务时进行任务特征分解分析,针对不同特征对大脑响应的不同分别进行研究,对于构建复杂任务脑力负荷等模型是非常有必要的。如实验结果发现的三种任务特征对大脑各脑区HbO激活程度响应变化规律的不同,可以直接用于后续构建复杂任务整体fNIRS评估研究。如复杂任务脑力负荷研究中,先分别得出不同任务特征导致的部分脑力负荷变化,每部分变化情况可以由全脑区HbO参数结合该特征脑区激活区域情况进行分析,可以得出对应特征引起的脑区激活程度情况,进而得出对应特征导致的脑力负荷变化。然后综合考虑所有任务特征,同时将所有任务特征导致的激活程度甚至脑力负荷变化情况通过一定权重的结合,可以科学地得出对应复杂任务整体的脑力负荷情况。

综上所述,得出了针对SRD任务不同任务特征对全脑血氧情况的影响规律,该结果为后续进行相关fNIRS方法评估复杂任务大脑功能情况提供了思路 and 基础。

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 Maior H A, Pike M, Wilson M L, *et al.*. Continuous detection of workload overlaid: An fNIRS approach[C]. *Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors 2014*, 2014: 450.

- 4 Peck E M, Afergan D, Yuksel B F, *et al.*. Using fNIRS to measure mental workload in the real world[M]. //Advances in Physiological Computing. London: Springer, 2014: 117-139.
- 5 Ayaz H, Shewokis P A, Bunce S, *et al.*. Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment[J]. NeuroImage, 2012, 59(1): 36-47.
- 6 Herff C, Heger D, Fortmann O, *et al.*. Mental workload during *n*-back task — quantified in the prefrontal cortex using fNIRS[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2013, 7: 935.
- 7 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.
- 8 Kaiser V, Bauernfeind G, Kreilinger A, *et al.*. Cortical effects of user training in a motor imagery based brain-computer interface measured by fNIRS and EEG[J]. NeuroImage, 2014, 85: 432-444.
- 9 Pan J, Jiao X. New application, development and aerospace prospect of fNIR[J]. Engineering, 2013, 5(5): 47-52.
- 10 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.
- 11 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(S1): 179-181.
- 12 Xia H, Liu W, Zhang Y, *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.
- 13 Antonello A, Sansone F, Francesconi A, *et al.*. A novel approach to the simulation of on-orbit rendezvous and docking maneuvers in a laboratory environment through the aid of an anthropomorphic robotic arm[C]. IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2014: 347-352.
- 14 Wang B. Modeling and simulation in rendezvous and docking spaceflight training[C]. Proceedings of the 14th International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering, 2015, 318: 399-407.
- 15 Boge T, Ma O. Using advanced industrial robotics for spacecraft rendezvous and docking simulation[C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 1-4.
- 16 Hillebrand A, Wahrenberg E, Manzey D. A new method to assess pilots' allocation of visual attention using a head-up display[C]. Proceedings of HFES, 2012: 179-191.
- 17 Gorbunov A L. Stereoscopic augmented reality in visual interface for flight control[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 38: 116-123.
- 18 Jung R, Moser M, Baucsek S, *et al.*. Activation patterns of different brain areas during incremental exercise measured by near-infrared spectroscopy[J]. Experimental Brain Research, 2015, 233(4): 1175-1180.
- 19 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.
- 20 Lew R. Assessing Cognitive Workload from Multiple Physiological Measures Using Wavelets and Machine Learning[D]. Moscow: University of Idaho, 2014.
- 21 Thao P T, Thang N D, van Toi V. Evaluation of frontal and visual cortices on mental working tasks using functional near infrared spectroscopy[C]. 5th International Conference on Biomedical Engineering in Vietnam, 2015: 389-394.
- 22 Brigadoi S, Ceccherini L, Cutini S, *et al.*. Motion artifacts in functional near-infrared spectroscopy: A comparison of motion correction techniques applied to real cognitive data[J]. NeuroImage, 2014, 85: 181-191.

栏目编辑: 吴秀娟