

## NIRS-EEG联合检测技术在脑功能分析中的研究进展

欧朗<sup>1</sup>, 赵越<sup>1</sup>, 李晓欧<sup>2</sup>

1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 上海健康医学院医疗器械学院, 上海 201318

**【摘要】**近红外光谱技术(Near Infrared Spectroscopy, NIRS)和脑电(Electroencephalographic, EEG)在脑科学研究中占有重要地位。联合NIRS和EEG的检测技术(简称NIRS-EEG联合检测技术)在脑功能分析领域可以达到比单一检测技术更好的效果,从而更好地理解大脑生理机制。本文首先介绍NIRS和EEG技术的原理,并比较了这两种技术与其他脑检测技术的优缺点。然后指出目前联合检测技术在系统设计时需要注意的技术要点。接着列举在联合检测技术在脑功能分析中的应用,并总结目前该技术的优势和面临的问题,并根据出现这些问题的原因做出相应的分析,提出对策和建议。最后对这项技术的未来应用做出展望。

**【关键词】**脑电;近红外光谱;联合检测;脑功能分析;综述

**【中图分类号】**R318;TP391.4

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)10-1323-07

## Advances of near infrared spectroscopy combined with electroencephalogram in brain function analysis

OU Lang<sup>1</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, LI Xiaou<sup>2</sup>

1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Medical Instrument, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China

**Abstract:** Near infrared spectroscopy (NIRS) and electroencephalogram (EEG) play an important role in brain science research. The joint detection technology using the combination of NIRS and EEG can achieve better results than single detection technology in the analysis of brain function, so as to understand the physiological mechanism of the brain more clearly. Herein the principles of NIRS and EEG are firstly introduced, and the two technologies are compared with other brain detection technologies to analyze their advantages and disadvantages. Then the technical essentials that need attention during system designing are summarized, and the applications of NIRS-EEG joint detection technology in the analysis of brain function are listed, thereby analyzing the advantages and existing problems of the joint detection technology and then putting forward some countermeasures and proposals to solve these problems. Finally, the development trends of the proposed technology are discussed.

**Keywords:** electroencephalogram; near infrared spectroscopy; joint detection; brain function analysis; review

### 前言

人类脑功能是时下研究的热点。研究者们基于大脑活动时产生的不同生理信号,开发了多种技术研究来自不同生理机制的大脑信号<sup>[1]</sup>。这些检测技术各有其优缺点,就时间分辨率而言,由高到低分别是:微电极阵列(Multi-Electrode Array, MEA)、皮层脑电

(Electrocorticography, ECoG)、脑电(Electroencephalographic, EEG)、脑磁(Eagnetoecephalograph, MEG),然后是近红外光谱技术(Near Infrared Spectroscopy, NIRS)、功能核磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)、正电子发射型断层成像(Positron Emission Computed Tomography, PET);就空间分辨率而言,MEA是最高的,其次是fMRI和ECoG,然后是NIRS、PET和MEG,最低的是EEG<sup>[2]</sup>。其中,虽然MEA和ECoG在空间分辨率和时间分辨率都较高,但这两项技术的测量方法都是有创的<sup>[3]</sup>,对大多数脑检测的对象人群不适合。fMRI、MEG和PET的设备昂贵,在检测时要求患者固定,而且PET需要注射放射性核素,对人体有一定的伤害<sup>[4]</sup>。相比之下,NIRS

**【收稿日期】**2020-03-11

**【基金项目】**上海市卫健委卫生健康政策研究课题(2019HP71)

**【作者简介】**欧朗,硕士在读,研究方向:脑电信号分析,E-mail: 952694-762@qq.com

**【通信作者】**李晓欧,博士,教授,硕导,E-mail: lixo@sumhs.edu.cn

和EEG是无创的检测方式<sup>[5]</sup>。EEG可以直接检测人的生理电信号,被广泛用于脑科学的检测研究<sup>[6]</sup>。EEG和NIRS都具有较高的时间分辨率,检测装置都具有无创、便携等优点,是脑功能检测的有力手段<sup>[7]</sup>。EEG和NIRS技术某种意义上是互补的:EEG提供了非常高的时间分辨率,但空间分辨率较低。NIRS由于入射光强在组织中的指数级衰减,空间分辨率较高<sup>[8]</sup>。所以,可以通过进行EEG和NIRS联合检测,将两种信号进行同步分析,克服单一脑功能成像的局限性<sup>[9]</sup>。

基于神经元电活动的EEG是通过记录头皮表面下的神经元自发、有节律的运动电位用来检测大脑活动<sup>[10]</sup>。脑电活动与其对应的NIRS检测的血流动力学并没有系统的时空对应关系。它们之间的相互作用是通过神经血管耦合机制,既可以使用联合检测技术来研究这一机制,也可以假设神经血管耦合模型,通过联合测量获得更丰富的神经生理信号<sup>[11-13]</sup>。

这两项技术联合检测主要有以下优点:首先,这两项技术适应面广,从简单的视觉刺激实验检测到重症监护病人的检测,适应年龄从早产儿到老年病人覆盖全年龄段患者<sup>[14]</sup>;其次,这两种方法在时间分辨率和空间分辨率上可以实现互补<sup>[15]</sup>;第三,EEG和NIRS都具有设备相对小巧,价格相对低廉的优势,可以整合在便携式设备上<sup>[16-18]</sup>;第四,NIRS和EEG技术对运动伪影有很好的鲁棒性而且没有过多物理约束条件;第五,与其他技术相比,EEG和NIRS可以在接近日常生活的条件下进行,这为实验设计提供了相当大的自由度<sup>[19]</sup>。此外,因为这两种技术都是完全无声的,在进行语言研究和听觉认知实验时,这是一个重要优势<sup>[20-21]</sup>。最后,由于没有电光干扰,它们的集成相对简单<sup>[22]</sup>。

本综述的结构如下:第一部分分别介绍了NIRS和EEG的物理原理和研究进展;第二部分总结两种技术耦合时的技术要点;第三部分探讨NIRS-EEG联合测量在认知科学领域的应用;第四部分介绍了NIRS和集成的局限性、挑战和未来发展方向。

## 1 NIRS和EEG的检测原理

### 1.1 NIRS检测技术的原理

NIRS的原理是根据生物组织对近红外光的光学特性来计算脑血氧水平和血流状况。光子进入生物组织后会产生透射、散射、吸收等不同作用<sup>[23]</sup>,生物组织对近红外谱段波长的光具有散射度高、吸收度低的特点,处于该波长范围内的光符合脑功能检测的需求<sup>[24]</sup>。氧合血红蛋白(HbO<sub>2</sub>)与还原血红蛋白

(HbR)的浓度变化可反映组织的功能活动状态,从而进行脑组织功能的研究<sup>[25]</sup>。利用波长介于700和900 nm之间的近红外光的特性,NIRS可通过检测两种或多种波长的近红外光吸收谱,从而测量大脑组织的血氧饱和度<sup>[26]</sup>。

NIRS可以根据使用的光源和探测器之间的距离不同而提供不同的灵敏度。通常对于成人,3 cm及以上的距离对脑外和脑内血流动力学波动都很敏感,而3 cm及以下距离的通道则对脑外血流动力学成分比较敏感<sup>[27]</sup>。这一特点使得我们可以利用长距离和短距离通道的组合来生成更清晰的大脑活动生理信息。采用高密度光阵列,结合光源与探测器之间不同距离的组合,可获得良好的层析图像<sup>[28-30]</sup>。然而,这种技术所需的高密度光电子器件使得仪器相对昂贵,并且存在过多光电子器件,很难与脑电图同步采集<sup>[31]</sup>。所以目前现有的EEG-NIRS联合采集系统在NIRS模块的光电采集部分主要使用的还是低密度光阵列。

### 1.2 EEG检测技术的原理

EEG是通过电极记录下来的脑电细胞群的自发性、节律性电活动,它包含了大量的生理与病理信息<sup>[32]</sup>。一般根据EEG的频率和振幅的特征分类,可分为 $\gamma$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\theta$ 、 $\delta$  5种波形,由这些波形组合成的波称为节律<sup>[33]</sup>。脑电信号容易受到例如肌电和眼电等干扰造成的伪迹影响,解决这些噪声干扰问题是研究脑电信号的关键<sup>[34]</sup>。去噪的方法主要有独立成分分析、主成分分析、小波去噪、回归等<sup>[35-37]</sup>。虽然EEG的时间分辨率较高,但EEG信号来源于大脑皮层神经元的集体放电,空间分辨率较低<sup>[38]</sup>。EEG技术的低空间分辨率是EEG进行大脑检测的重要制约因素,也是EEG需要结合NIRS技术的重要原因之一<sup>[39]</sup>。

## 2 NIRS-EEG联合检测的系统设计

NIRS-EEG联合检测的系统设计根据两种技术在采集时的控制系统不同,可以分为独立采集和同步采集两种设计方法。

### 2.1 NIRS和EEG独立采集

NIRS模块和EEG模块独立采集信号,通过上位机对两种信号进行同步分析。这种方式较为简单和直接,在NIRS-EEG联合检测初期使用较多,如Fazli等<sup>[40]</sup>使用NIRScout近红外系统和BrainAMP脑电系统同时测量近红外光谱数据和脑电,证明了近红外光谱数据可以提高同时进行的实时脑电图运动图像分类精度。

这种方式虽然可以获得脑电和脑血氧代谢信

息,但对于毫秒级别时间分辨率的脑电来说,系统之间的时间同步不够精确,导致数据分析不够精准。

2.2 NIRS和EEG同步采集

第二种方式采用同一处理器同步控制NIRS的光源输出和探测器输入以及EEG信号的采集和处理,这比第一种方法的要求要高,系统设计更加复杂。但两种系统之间的同步较好,数据分析也更加方便,是目前NIRS-EEG联合检测的主流方式。其系统结构框图如图1所示。EEG-NIRS联合采集分析系统一般包括脑电电极、近红外探头、下位机微控制器和上位机。脑电电极和近红外探头需要根据实际要求确定数量、型号和分布位置;微控制器是系统的核心,负责光源驱动信号的产生、脑电与近红外光强信号的放大、模数转换以及与上位机的通信。上位机负责EEG与NIRS信号的显示、预处理、信号解调与存储等功能<sup>[41]</sup>。

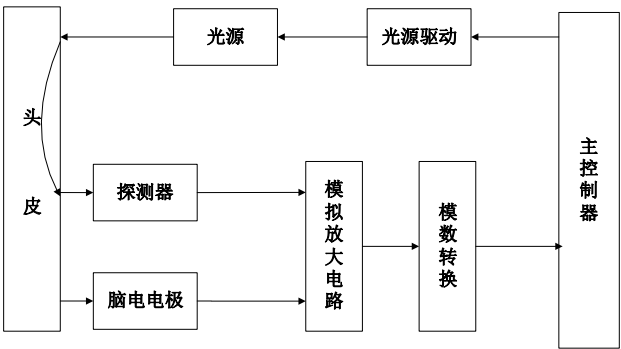


图1 NIRS-EEG 联合检测系统结构框图  
Fig.1 NIRS-EEG joint detection system block diagram

目前NIRS-EEG联合检测系统中的近红外探头和脑电电极大多通过固定在同一探头帽上实现联合检测<sup>[42]</sup>。NIRS-EEG联合检测研究的关键问题之一就是联合检测探头帽的设计。联合检测探头帽一般是将脑电电极和近红外探头安装到同一个贴合头皮的柔性装置上整合而成<sup>[43]</sup>。一些研究人员直接在现有的脑电帽上加入近红外光纤部件<sup>[44-46]</sup>,这种方法虽然实现方式简单快捷,可以保证脑电耦合效果,但是有两个弊端:其一是现有脑电帽多以弹性布料为基底,戴在不同的受试者头上后近红外光源和探测器之间的距离会略有不同且不可控;其二是弹性布料对近红外探头的固定效果有限,在实验时会带来诸多不便。

为解决这个问题,有研究人员使用3D打印技术根据实际需求制作了联合测量探头帽。如图2所示,这种探头帽可以根据自己的研究方向和实验设计所需,确定脑电电极和近红外探头的固定位置<sup>[47]</sup>。这样既可以符合两种技术的检测要求,又可以根据被试者的头型特点制作对应的探头帽,佩戴时较为舒适。但缺点是3D打印技术成本相对较高。

另有研究者使用复合高分子低温热塑板做联合检测探头帽,这种热塑板常用于固定临床骨科和放疗物理中心的患者,热塑板在60℃左右软化,软化后即可根据患者的体态进行塑形,冷却后迅速定型<sup>[43]</sup>。可以依据被试者的不同,使用低温热塑板随时制作出一一对应的贴合头皮的帽子基底。所以材料特性适合NIRS-EEG联合检测探头帽的设计需求<sup>[48]</sup>。这

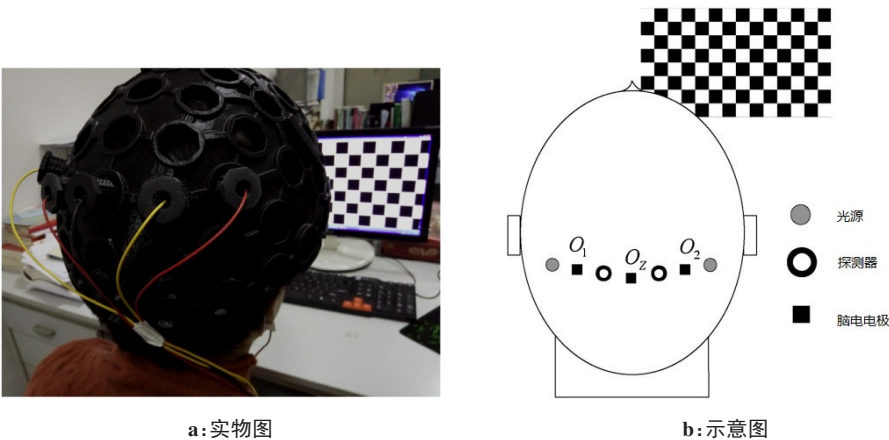


图2 3D打印的联合测量探测帽实物图(a)和示意图(b)  
Fig.2 3D printed joint measurement probe cap (a) and its schematic diagram (b)

种方法具有成本低廉、材料轻便、可塑性强的优点。但缺点是成型后的帽子固定脑电电极和NIRS探头的数量会被材料的硬度限制,通道数量有限。

还有一种解决方案是以传统脑电采集帽为基

底,通过上下双层的结构实现双模态探测器物理空间的融合,上下层选择打孔位置,通过塑料弹性片和纽扣结构固定在一起<sup>[49]</sup>。这种方法成本较低,佩戴舒适,但在空间耦合时,要注意避免脑电电极位置和



近红外探头位置之间的冲突,在电极数量和NIRS探头数量较大时安装较为不便。

总的来说,NIRS-EEG联合检测系统最好使用同一控制器同时控制两种系统,通过硬件实现同步,方便系统之间联合分析。对于联合测量探测帽,既要保证脑电电极耦合效果,又要保证近红外光源和探测器之间的固定。虽然两个模块之间的干扰较小,但在确定脑电电极和近红外探头具体位置时还是要尽量避免互相影响。

### 3 NIRS-EEG联合检测在脑功能分析中的应用

脑科学是研究脑认知、意识的规律和本质的科学<sup>[50]</sup>。脑电是研究脑科学的重要手段,主要是通过测量树突状细胞的同步激活神经元对外界刺激的反应。而NIRS能通过光学原理得到大脑血氧和血流信息进而检验脑电活动和脑血流动力学之间的潜在关系<sup>[51]</sup>。NIRS与fMRI的联合检测理念相似,都是基于神经血管耦合机制,NIRS技术基于大脑皮层的血氧状态与局部的神经元活动之间的联系,通过测量脑组织血红蛋白浓度变化来观察大脑局部区域血流量的动态变化,间接获取到大脑的神经活动<sup>[52]</sup>。

NIRS-EEG联合检测系统在认知神经科学的研究近年来愈来愈多。在这个应用领域中,NIRS-EEG联合检测系统大多通过模拟一种特定条件下的固定场景,来研究大脑活动在某种感官刺激、语言、运动意图和不同情绪下的血流动力学和电生理变化。

#### 3.1 感官刺激和运动意图

有研究人员将NIRS-EEG联合检测系统集中在接受听觉刺激或视觉刺激等感官刺激后的大脑活动。Rovati等<sup>[53]</sup>使用嵌入式的NIRS-EEG联合检测仪器,评估9名受试者在稳态视觉刺激时枕区血流动力学变化和稳态视觉诱发电位(Steady-State Visual Evoked Potentials, SSVEP),对比不同强度刺激下的生理数据。结果显示刺激开始后HbO<sub>2</sub>浓度升高,HbR浓度降低。它们的变化与刺激强度的关系明显,强度较大的刺激产生浓度的较大差异,强度较小的刺激产生浓度的较小差异。这种关系和SSVEP反映振幅与刺激强度之间关系类似,证明了脑血流动力学与ERP振幅之间具有线性相关性。此外,这两种反应都呈现出与刺激强度大小对应的对数曲线。Liu等<sup>[47]</sup>使用NIRS-EEG联合检测系统(枕叶,双通道NIRS和3个脑电电极)对10名健康成人进行视觉刺激实验,比较局部血流动力学变化和稳态视觉诱发电位的P100N135振幅变化。实验结果表明,视觉皮层P100N135振幅与脑氧合浓度呈线性关系。证明

多模态的NIRS-EEG检测为临床脑功能检测和分析提供了一种新的方法。

Ehlis等<sup>[54]</sup>对10名受试者同时进行了NIRS-EEG测量(额颞区,22通道fNIRS和3个脑电电极),以评估人类大脑皮层听觉感觉门控的相关性。感觉门控是指大脑抑制对无关环境的刺激以防止大脑接受的信息溢出的能力。将血流动力学数据与电生理信息相结合,发现感觉门控的数量与额叶和颞叶皮质血流动力学反应的强度呈正相关,和P50振幅的大小成负相关。Jausovec等<sup>[55]</sup>利用NIRS-EEG联合检测系统(额叶,8通道NIRS和19个脑电电极)研究性别差异在大脑处理视觉和听觉刺激时的不同,结果显示:男性在执行任务时血氧饱和度的变化较大,而女性早期诱发反应的ERP振幅P1和P3高于男性,而男性的N4振幅高于女性,视觉刺激比听觉刺激对比更明显。

Takeuchi等<sup>[56]</sup>利用NIRS-EEG联合检测系统(全脑,103通道NIRS和32个脑电电极)对18名受试者在电刺激右侧正中神经时的躯体感觉皮质进行检测。基于通用线性模型(General Linear Model, GLM)的血流动力学信号分析显示:在刺激期间,对侧躯体感觉区HbO<sub>2</sub>浓度升高,随后变化扩散到后侧和同侧躯体感觉区。脑电图数据显示,体感诱发电位在22 ms达到峰值,且血流动力学响应与P22显著相关,证明GLM分析可以揭示分层体感途径中神经激活的时间顺序,与已知的神经生理学知识一致。还有一些研究人员用NIRS-EEG联合检测系统研究运动意图,Norbert等<sup>[57]</sup>研究了自发运动行为(如手指运动)的初期与HbO<sub>2</sub>浓度和脑电的关系,用NIRS-EEG联合检测系统(额叶,单通道NIRS 3个脑电电极)连续检测10名受试者的信息,对比分析了受试者在5 min休息期间和10 min手指随意运动期间的数据。研究发现,在休息期间缓慢波动的HbO<sub>2</sub>峰值后3 s,脑电图β波增加,表明中枢运动皮层神经元的兴奋性变化缓慢,证明手指在相对恒定的时间间隔(大约10 s)内开始的自发运动可能与休息时的前额叶血氧浓度的缓慢振荡有关。

#### 3.2 情感识别

情感识别在脑科学研究中占有重要地位,也是实现真正人机交互的重要技术<sup>[58]</sup>。目前大多数NIRS-EEG联合检测系统的情绪识别检测区域主要集中在前额叶脑区,研究者们发现这一区域脑电和血氧的相关性较强,且前额避免了头发对光学信号的影响<sup>[59]</sup>。Balconi等<sup>[60]</sup>利用NIRS-EEG联合检测系统(前额叶,6通道NIRS和16个脑电电极)对20名受

试者进行检测。他们要求受试者观察会引发不同情感的图片。结果显示:对于消极情绪图片刺激,皮质额叶的EEG中主要的 $\delta$ 和 $\alpha$ 波段和 $\text{HbO}_2$ 的变化在情绪的分类上有较强的相关性,对积极情绪图片刺激则不太明显。Takeda等<sup>[61]</sup>研究了听觉刺激对12名受试者前额叶皮层的影响,并结合了NIRS-EEG联合检测系统和其他生理信号检测系统。验证了特定的应激情绪反应和脑生理信号的左右不对称有关,左侧脑区对积极情绪的生理活动更强,右侧脑区对消极情绪的生理活动更强。Hoshi等<sup>[62]</sup>同时测量NIRS(通过16个位于前额的通道)、ERPs(通过6个EEG电极)、全身血压和脉搏率。结果显示消极情绪伴随着外侧前额叶皮质 $\text{HbO}_2$ 浓度的升高,而积极情绪伴随着左外侧前额叶皮质 $\text{HbO}_2$ 浓度的降低。

Herrmann等<sup>[63]</sup>将检测区域扩展到了全脑,他们用联合检测装置(全脑,52通道NIRS和6个脑电极)对比36名受试者在单一的情感面部识别任务和双重任务实验时的生理数据。结果显示,在双重任务的条件下,前额叶皮层内的神经元活动显著增加。与单一任务相比,P100振幅降低,但P300振幅没有显示出预期的降低。这证明人对于面部情感的识别不是完全自动的,而是依赖于前额叶的控制。因此在大脑进行其他工作时,对视觉处理的面部表情识别可能受到影响。

#### 4 总结和展望

本文总结了NIRS-EEG联合检测系统在研究认知神经科学领域时的技术特点和具体应用。近10年来,NIRS-EEG联合检测在认知神经科学的应用越来越多。发展趋势为:检测区域从局部脑区发展到全脑;NIRS通道数量和脑电电极数量由少到多;从有线装置向无线装置逐步发展。这些研究通过多种方式证明了血流动力学和脑电之间的相关性。通过两种技术的联合检测和分析,可以更好地理解大脑在接受外界刺激时的生理活动规律,是脑科学发展的重要手段。

目前的联合检测装置还有其局限性:一是目前大多数应用在认知科学领域的联合检测装置主要集中在单一脑区,且通道数量较少,不利于大脑生理活动的数据采集和分析。即使在全脑的联合检测系统中,关于不同脑区之间生理信号的相关性分析也很少。二是虽然现在有研究者将装置设计为便携式<sup>[64-65]</sup>,但大多只是将下位机和上位机之间的通讯改为无线,在采集数据时,仍然需要患者尽量保持静止,实验设计有局限性。三是NIRS系统对大脑皮层

的深层活动不够敏感。

在未来,首先需要对全脑覆盖设备采集的信号综合分析,找到不同脑区之间潜在的相关性;第二是针对有特殊受试者大脑尺寸和结构的不同,使用NIRS时要注意算法的更新;第三是增强便携式设备的抗干扰能力,才能进行更方便更灵活更全面的生理检测;第四要充分发挥设备无声轻便的优势,结合两种技术的特点,设计更合理更科学的认知科学实验。这些都是NIRS-EEG联合检测技术在脑功能分析未来的发展方向。

#### 【参考文献】

- [1] CHIARELLI A M, ZAPPASODI F, DI POMPEO F, et al. Simultaneous functional near-infrared spectroscopy and electroencephalography for monitoring of human brain activity and oxygenation: a review[J]. *Neurophotonics*, 2017, 4(4): 041411.
- [2] FU Y F, XIONG X, JIANG C H, et al. Imagined hand clenching force and speed modulate brain activity and are classified by NIRS combined with EEG[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2017, 25(9): 1641-1652.
- [3] 赵鹏程, 朱昭琼. 三种脑功能成像技术在认知功能障碍的研究进展[J]. *国际麻醉学与复苏杂志*, 2018, 39(11): 1055-1058.  
ZHAO P C, ZHU Z Q. Research progress of three brain functional imaging techniques in cognitive dysfunction[J]. *International Journal of Anesthesiology and Recovery*, 2018, 39(11): 1055-1058.
- [4] 熊馨, 伏云发, 张夏冰, 等. 一种多模态脑电和近红外光谱联合采集头盔设计及实验研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2018, 35(2): 290-296.  
XIONG X, FU Y F, ZHANG X B, et al. Design and experimental study of a multi-modal EEG and near-infrared spectroscopy combined acquisition helmet[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2018, 35(2): 290-296.
- [5] VILLRINGER A, CHANCE B. Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function[J]. *Trends Neurosci*, 1997, 20(10): 435-442.
- [6] MINGUILLON J, LOPEZ-GORDO M A, PELAYO F. Trends in EEG-BCI for daily-life: requirements for artifact removal[J]. *Biomed Signal Proces*, 2017, 31: 407-418.
- [7] DIFEI L, SHEN L, XIAOMING L, et al. Interactive brain activity: review and progress on EEG-Based hyperscanning in social interactions[J]. *Front Psychol*, 2018, 9: 1862.
- [8] CROCE P, ZAPPASODI F, MERLA A, et al. Exploiting neurovascular coupling: a Bayesian sequential Monte Carlo approach applied to simulated EEG fNIRS data[J]. *J Neural Eng*, 2017, 14(4): 046029.1-046029.11.
- [9] VON LA, WABNITZ H, SANDER T, et al. M3BA: a mobile, modular, multimodal biosignal acquisition architecture for miniaturized EEG-NIRS based hybrid BCI and monitoring[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2016, 64(6): 1199-1210.
- [10] POLAK T, HERRMANN M J, MÜLLER L D, et al. Near-infrared spectroscopy (NIRS) and vagus somatosensory evoked potentials (VSEP) in the early diagnosis of Alzheimer's disease: rationale, design, methods, and first baseline data of the Vogel study[J]. *J Neural Transm*, 2017, 124(11): 1473-1488.
- [11] ATKINSON J, CAMPOS D. Improving BCI-based emotion

- recognition by combining EEG feature selection and kernel classifiers[J]. *Expert Syst Appl*, 2016, 47: 35-41.
- [12] 李日成. 基于EEG-NIRS双模态动作意图的分类识别[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LI R C. Classification identification based on EEG-NIRS bimodal action intent[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [13] CROCE P, BASTI A, MARZETTI L, et al. EEG-fMRI Bayesian framework for neural activity estimation: a simulation study[J]. *J Neural Eng*, 2016, 13(6): 066017.
- [14] WALLOIS F, MAHMOUDZADEH M, PATIL A, et al. Usefulness of simultaneous EEG-NIRS recording in language studies[J]. *Brain Lang*, 2012, 121(2): 110-123.
- [15] JOBSIS F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters [J]. *Science*, 1977, 198(4323): 1264-1267.
- [16] SHIGA T, TANABE K, NAKASE Y, et al. Development of a portable tissue oximeter using near infra-red spectroscopy[J]. *Med Biol Eng Comput*, 1995, 33(4): 622-626.
- [17] LIN Y, LECH G, NIOKA S, et al. Erratum: Noninvasive, low-noise, fast imaging of blood volume and deoxygenation changes in muscles using light-emitting diode continuous-wave imager [J]. *Rev Sci Instrum*, 2002, 73(3): 3065-3074.
- [18] SCHUDLO L C, CHAU T. Development of a ternary near-infrared spectroscopy brain-computer interface: online classification of verbal fluency task, stroop task and rest[J]. *Int J Neural Syst*, 2017, 28(4): 1750052.
- [19] 郑毅, 骆清铭, 刘谦, 等. 适于脑功能活动检测的便携式近红外光谱仪的研制[J]. *中国生物医学工程学报*, 2007, 26(6): 898-902.
- ZHENG Y, LUO Q M, LIU Q, et al. Development of portable near infrared spectrometer for detection of brain function activity [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2007, 26(6): 898-902.
- [20] 龚辉, 李成军, 李婷, 等. 前额叶皮层工作记忆作用的近红外光学成像[J]. *中国科学(G辑: 物理学力学天文学)*, 2007, G(S1): 110-117.
- GONG H, LI C J, LI T, et al. Near-infrared optical imaging of working memory in prefrontal cortex [J]. *Science in China (Part G: Physics Mechanics Astronomy)*, 2007, G(S1): 110-117.
- [21] 李良成, 张永顺, 李继刚. 双光源双探头脑血氧监测仪的设计[J]. *激光与红外*, 2007, 37(7): 653-655.
- LI L C, ZHANG Y S, LI J G. Design of dual-source dual-probe cerebral blood oxygen monitor[J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(7): 653-655.
- [22] MACNAB A J, GAGNON R E, GAGNON F A, et al. NIRS monitoring of brain and spinal cord-detection of adverse intraoperative events[J]. *Spectroscopy*, 2015, 17(2-3): 483-490.
- [23] 查雨彤, 刘光达, 王永祥, 等. 基于NIRS-ICG的脑血流量无创测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1069-1073.
- ZHA Y T, LIU G D, WANG Y X, et al. Noninvasive measurement of cerebral blood flow based on NIRS-ICA[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 1069-1073.
- [24] 丁海曙, 王峰, 林方, 等. 在多层结构的生物组织中近红外光子迁移的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2001(2): 28-32.
- DING H S, WANG F, LIN F, et al. Near-infrared photon migration in biological tissues with multi-layer structure [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2001(2): 28-32.
- [25] 张海宁, 李岩, 张翔, 等. 数字式无线肌血氧监测仪的研制[J]. *生物医学工程与临床*, 2006, 10(2): 109-112.
- ZHANG H N, LI Y, ZHANG X, et al. Development of digital wireless muscle blood oxygen monitor [J]. *Biomedical Engineering and Clinical Medicine*, 2006, 10(2): 109-112.
- [26] WATANABE K, TANAKA H, TAKAHASHI K, et al. NIRS-based language learning BCI system[J]. *IEEE Sens J*, 2016, 16(8): 2726-2734.
- [27] HIROMASA T, HISAO N, AKIHIRO I, et al. Cerebral hemodynamic responses during dynamic posturography: analysis with a multichannel near-infrared spectroscopy system[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 620.
- [28] 焦学军, 张朕, 姜劲, 等. 基于功能性近红外光谱技术的脑机接口[J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(12): 1456-1463.
- JIAO X J, ZHANG Z, JIANG J, et al. Brain-computer interface based on functional near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2017, 51(12): 1456-1463.
- [29] SONG H, CHEN L, GAO R, et al. Automatic schizophrenic discrimination on fNIRS by using complex brain network analysis and SVM[J]. *BMC Med Inform Decis*, 2017, 17(3): 166.
- [30] 司娟宁, 张文玥, 李雅欣, 等. 功能近红外光谱成像技术在大脑认知功能中的应用[J]. *立体定向和功能性神经外科杂志*, 2018, 31(3): 189-192.
- SI J N, ZHANG W Y, LI Y X, et al. Application of functional near-infrared spectroscopy in brain cognitive function [J]. *Journal of Stereotactic and Functional Neurosurgery*, 2018, 31(3): 189-192.
- [31] CHIARELLI A M, MACLIN E L, LOW K A, et al. Combining energy and Laplacian regularization to accurately retrieve the depth of brain activity of diffuse optical tomographic data [J]. *J Biomed Opt*, 2016, 21(3): 36008.
- [32] 谢平, 杨芳梅, 李欣欣, 等. 基于变分模态分解-传递熵的脑肌电信号耦合分析[J]. *物理学报*, 2016, 65(11): 285-293.
- XIE P, YANG F M, LI X X, et al. Coupling analysis of brain EMG signals based on variational mode decomposition-transfer entropy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 285-293.
- [33] 王丽娟. 视觉诱发P300电位去噪与提取算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- WANG L J. Research on denoising and extraction algorithm of visually induced P300 potential[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [34] 纪强. 基于VR与EEG的情绪识别系统设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- JI Q. Design and implementation of emotion recognition system based on VR and EEG [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [35] 秦鹏民, 韩俊荣, 王玉芝, 等. EEG-fMRI融合技术在静息态中的应用[J]. *华南师范大学学报(社会科学版)*, 2017(6): 74-81.
- QIN P M, HAN J R, WANG Y Z, et al. Application of EEG-fMRI fusion technology in resting state[J]. *Journal of South China Normal University (Social Science Edition)*, 2017(6): 74-81.
- [36] LAGANARO M. Inter-study and inter-individual consistency and variability of EEG/ERP microstate sequences in referential word production[J]. *Brain Topogr*, 2017, 30(6): 785-796.
- [37] 高晨阳. 提高全脑fNIRS-EEG双模态联合检测性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- GAO C Y. Improving the performance of fNIRS-EEG dual-mode joint detection in whole brain[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [38] 张冠华, 余昱婧, 陈果, 等. 面向情绪识别的脑电特征研究综述[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(9): 1097-1118.
- ZHANG G H, YU W J, CHEN G, et al. Review of EEG characteristics for emotion recognition[J]. *Science in China, Information Science*, 2019, 49(9): 1097-1118.
- [39] CHANEL G, KIERKELS J J, SOLEYMANI M, et al. Short-term emotion assessment in a recall paradigm [J]. *Int J Hum-comput St*, 2009, 67(8): 607-627.
- [40] FAZLI S, MEHNERT J, STEINBRINK J, et al. Enhanced performance



- by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface[J]. *Neuroimage*, 2012, 59(1): 519-529.
- [41] YIN X, XU B, JIANG C, et al. A hybrid BCI based on EEG and fNIRS signals improves the performance of decoding motor imagery of both force and speed of hand clenching[J]. *J Neural Eng*, 2015, 12(3): 036004.
- [42] KOTA S, YASUKO O, YOSUKE K, et al. The relationship between the superior frontal cortex and alpha oscillation in a flanker task: Simultaneous recording of electroencephalogram (EEG) and near infrared spectroscopy (NIRS)[J]. *Neurosci Res*, 2017, 8(11): 30-35.
- [43] 张垒. 提高连续光近红外脑功能检测灵敏度的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- ZHANG L. Improving the sensitivity of continuous light near-infrared brain function detection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [44] TANVEER T M, ROBERT F H, SOLOMON G D. Modeling neurovascular coupling from clustered parameter sets for multimodal EEG-NIRS[J]. *Comput Math Method M*, 2015, 2015: 1-13.
- [45] 刘卫星. 基于EEG和fNIRS的运动想象信号分析[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
- LIU W X. Analysis of motion imaging signals based on EEG and fNIRS[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2018.
- [46] LANA V, ABACI T E, SILVINA L F, et al. Exploring early human brain development with structural and physiological neuroimaging[J]. *Neuroimage*, 2018, 187(15): 226-254.
- [47] LIU G, WEI X, ZHANG S, et al. Visual evoked nerve cerebral oxygen characteristics analysis based on NIRS-EEG[J]. *Optik*, 2018, 160: 168-175.
- [48] SUN J. Correlation between hemodynamic and electrophysiological signals dissociates neural correlates of conflict detection and resolution in a Stroop task: a simultaneous near-infrared spectroscopy and event-related potential study[J]. *J Biomed Opt*, 2013, 18(18): 6014.
- [49] GAO C, SUN J, YANG X, et al. Gender differences in brain networks during verbal Sternberg tasks: a simultaneous near-infrared spectroscopy and electro-encephalography study[J]. *J Biophotonics*, 2018, 11(3): e201700120.
- [50] TIWARI N, EDLA D R, DODIA S, et al. Brain computer interface: a comprehensive survey[J]. *Biol Inspir Cogn Arc*, 2018, 10(5): 118-129.
- [51] DUAN X, ZHANG D, NIE L, et al. Rapid discrimination of geographical origin and evaluation of antioxidant activity of *Salvia miltiorrhiza* var. *alba* by Fourier transform near infrared spectroscopy[J]. *Spectrochim Acta A*, 2014, 122: 751-757.
- [52] 叶佩霞, 朱睿达, 唐红红, 等. 近红外光学成像在社会认知神经科学中的应用[J]. *心理科学进展*, 2017, 25(5): 731-741.
- YE P X, ZHU R D, TANG H H, et al. Application of near infrared optical imaging in social cognitive neuroscience[J]. *Advances in Psychological Science*, 2017, 25(5): 731-741.
- [53] ROVATI L, SALVATORI G, BULF L, et al. Optical and electrical recording of neural activity evoked by graded contrast visual stimulus[J]. *Biomed Eng Online*, 2007, 6(1): 28.
- [54] EHLIS A C, RINGEL T M, PLICHTA M M, et al. Cortical correlates of auditory sensory gating: a simultaneous near-infrared spectroscopy event-related potential study[J]. *Neuroscience*, 2009, 159(3): 1032-1043.
- [55] NORBERT J, KSENIJA J. Gender related differences in visual and auditory processing of verbal and figural tasks[J]. *Brain Res*, 2009, 1300: 135-145.
- [56] TAKEUCHI M, HORI E, TAKAMOTO K, et al. Brain cortical mapping by simultaneous recording of functional near infrared spectroscopy and electroencephalograms from the whole brain during right median nerve stimulation[J]. *Brain Topogr*, 2009, 22(3): 197-214.
- [57] PFURTSCHELLER G, BAUERNFEIND G, NEUPER C, et al. Does conscious intention to perform a motor act depend on slow prefrontal (de)oxyhemoglobin oscillations in the resting brain?[J]. *Neurosci Lett*, 2011, 508(2): 89-94.
- [58] ALI M, AL MACHOT F, MOSA A H, et al. A novel EEG-based emotion recognition approach for e-healthcare applications[J]. *Symp Appl Comput*, 2016, SAC(16): 162-164.
- [59] DONGMIN S, DONGIL S, DONGKYO S. Development of emotion recognition interface using complex EEG/ECG bio-signal for interactive contents[J]. *Multimed Tools Appl*, 2017, 76(9): 11449-11470.
- [60] BALCONI M, GRIPPA E, VANUTELLI M E. What hemodynamic (fNIRS), electrophysiological (EEG) and autonomic integrated measures can tell us about emotional processing[J]. *Brain Cognition*, 2015, 95: 67-76.
- [61] TAKEDA T, KONNO M, KAWAKAMI Y, et al. Influence of pleasant and unpleasant auditory stimuli on cerebral blood flow and physiological changes in normal subjects[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2016, 876: 303.
- [62] HOSHI Y, HUANG J, KOHRI S, et al. Recognition of human emotions from cerebral blood flow changes in the frontal region: a study with event-related near-infrared spectroscopy[J]. *J Neuroimaging*, 2011, 21(2): e94-e101.
- [63] HERRMANN M J, NEUEDER D, TROELLER A K, et al. Simultaneous recording of EEG and fNIRS during visuo-spatial and facial expression processing in a dual task paradigm[J]. *Int J Psychophysiol*, 2016, 109(13): 21-28.
- [64] LAREAU E, LESAGE F, POULIOT P, et al. Multichannel wearable system dedicated for simultaneous electroencephalography / near-infrared spectroscopy real-time data acquisitions[J]. *J Biomed Opt*, 2011, 16(9): 096014.
- [65] OBRIG H, MOCK J, STEPHAN F, et al. Impact of associative word learning on phonotactic processing in 6-month-old infants: a combined EEG and fNIRS study[J]. *Dev Cogn Neurosci*, 2017, 25(C): 185-197.

(编辑:陈丽霞)