

稳态运动视觉诱发电位的诱发及 在脑机接口中的应用进展

李 丽, 陈泉宇, 随 力

(上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于稳态运动视觉诱发电位 (SSMVEP) 的脑机接口 (BCI) 能够减少使用者的视觉疲劳, 但其信号强度和系统性能仍不能代替基于稳态视觉诱发电位 (SSVEP) 的 BCI。本文对提高 SSMVEP 信噪比的两种思路以及 SSMVEP 在 BCI 中的应用进行了综述。首先归纳和总结了影响 SSMVEP 诱导和性能的 3 个主要因素, 即运动视觉刺激方式、运动视觉刺激参数和 SSMVEP 的信号处理方法; 然后介绍了 SSMVEP 在医疗、娱乐等领域的应用; 最后提出了目前使用 SSMVEP-BCI 的限制以及未来发展方向。

关键词: 稳态运动视觉诱发电位; 稳态视觉诱发电位; 脑机接口

中图分类号: R 318 文献标志码: A

Induction of steady-state motion visual evoked potential and its application in brain-computer interface

LI Li, CHEN Xiaoyu, SUI Li

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Brain-computer interface (BCI) based on steady-state motion visual evoked potential (SSMVEP) can reduce user's visual fatigue, but the signal intensity and system performance still cannot replace BCI based on steady-state visual evoked potential (SSVEP). Two directions about how to achieve a high signal-to-noise ratio of SSMVEP and the application of SSMVEP in BCI were reviewed. Firstly, three main factors affecting the induction and performance of SSMVEP were summarized, that was, motor visual stimulation mode, motor visual stimulation parameters and signal processing methods of SSMVEP. Then the application of SSMVEP in medical and other fields was introduced. Lastly, the present limitations of SSMVEP-BCI and the future development direction were proposed.

Keywords: steady-state motion visual evoked potential; steady-state visual evoked potential; brain-computer interface

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11179015, 51173108); 上海理工大学科技发展项目 (2019KJFZ239, 2020KJFZ232)

第一作者: 李 丽 (1994-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 生物医学工程. E-mail: 15800928736@163.com

通信作者: 随 力 (1970-), 女, 教授. 研究方向: 神经工程. E-mail: lsui@usst.edu.cn

视觉诱发电位 (visual evoked potential, VEP) 是视觉刺激引起的枕部大脑皮层的电生理反应^[1]。根据视觉刺激间隔时间的长短或者频率的不同, VEP 分为瞬态视觉诱发电位 (transient visual evoked potential, tVEP) 和稳态视觉诱发电位 (steady-state visual evoked potential, SSVEP)^[2]。tVEP 通常由低于 6 Hz 的视觉刺激诱发, 无法应用于脑机接口 (brain-computer interface, BCI) 系统, SSVEP 则由更高频率的视觉刺激诱发, 具有较强的抗干扰性^[3]。SSVEP 是 BCI 系统中一种较常使用的脑电信号。基于 SSVEP 的 BCI 系统具有平台易于搭建、无需训练及传输速率较高等优点^[4]。传统的 SSVEP 通常采用重复的闪烁刺激来诱发, 具有较高的信噪比。但是, 重复的视觉闪烁刺激容易导致使用者视觉疲劳, 从而降低 BCI 的系统性能。人类的视觉系统不仅对物体的颜色、形状等特征十分敏感, 而且对物体的运动速度、方向等特征也非常敏感^[5], 因此, 研究人员采用运动的刺激来诱发 VEP, 发现运动起始阶段即可诱导出 VEP, 并将其命名为运动启动诱发电位 (motion-onset visual evoked potentials, MVEP), MVEP 具有信噪比高、信号稳定及视觉疲劳度较低等优势。MVEP 对运动起始敏感, 但持续时间短暂^[6]。研究人员在 MVEP 的基础上继而发现周期性的运动视觉刺激可以诱发出持续时间较长的 SSVEP, 这种由运动视觉刺激诱导出来的 SSVEP 被命名为稳态运动视觉诱发电位 (steady-state motion visual evoked potential, SSMVEP), 目前基于 SSMVEP 的 BCI 系统已成为 BCI 研究的焦点之一^[2]。现有的研究表明, 基于 SSMVEP 的 BCI 系统性能和 SSMVEP 的诱导有着很大的关系, 运动视觉刺激方式和刺激参数在 SSMVEP 的诱导中起着重要的作用, 因此, 本文就 SSMVEP 的运动视觉刺激方式、刺激参数以及 SSMVEP 在 BCI 中的应用等方面的研究进展进行了归纳和总结。

1 SSMVEP 的运动视觉刺激方式

传统 SSVEP 的诱发通常采用闪烁刺激模式, 依据刺激硬件的不同, 闪烁刺激方式又分为发光二极管 (light emitting diode, LED) 闪烁刺激和液晶显示 (liquid crystal display, LCD) 闪烁刺激。LED 闪烁刺激 (如图 1(a) 所示) 诱发的 SSVEP 通常需要搭建 LED 硬件电路; LCD 闪烁刺激不需要额外的硬件电路, 且依靠计算机的软件系统来实现视觉刺激的呈现和刺激参数的变换^[7]。目前常用来诱发 SSVEP 的 LCD 闪烁刺激方式有两种: 一是单个图形刺激 (如矩形、正方形或箭头) 在计算机屏幕上以指定的速度出现和消失 (如图 1(b) 所示); 二是黑白两色的棋盘或栅格进行模式翻转 (如图 1(c) 所示)。这些传统的 SSVEP 的诱发方式在 BCI 系统中具有较好的使用价值, 但这类刺激方式易造成视觉疲劳, 甚至有诱发使用者癫痫发作的风险, 最终影响 BCI 系统的性能。

SSMVEP 的诱导建立在传统 SSVEP 诱导的基础上。它由一系列 MVEP 叠加而成, 既保留了传统 SSVEP 的刺激效果, 又显著地降低了眼睛对闪烁刺激的敏感性^[9], 极大地缓解了视觉疲劳, 符合目前 BCI 系统以提高用户舒适度为目标^[10]的发展趋势。学者在探索诱发 SSMVEP 的视觉刺激模式上进行了研究, 本文对这些诱导 SSMVEP 的运动视觉刺激模式进行了归纳和总结, 如表 1 所示。

目前诱导 SSMVEP 的研究中使用的运动视觉刺激呈现界面及刺激方式多样, 并不统一。依据刺激的基本运动方式, 将 SSMVEP 诱导中的视觉刺激的运动方式初步归纳为 5 种方式: a. 径向收缩-扩张运动方式, 具体包括牛顿环、环形棋盘; b. 翻转运动方式, 如实线圆的翻转^[11]、类似硬币翻转、简单图标绕固定轴的翻转^[12]都可以归为此类运动方式; c. 移动, 包括左右平移^[13]、路径不

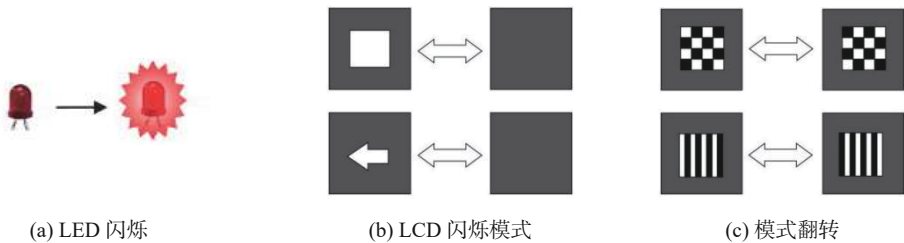
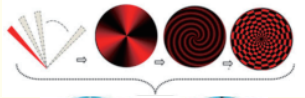
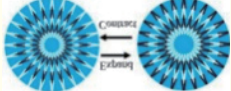
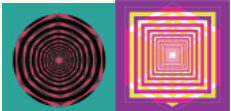
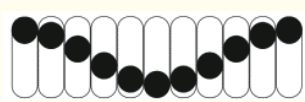
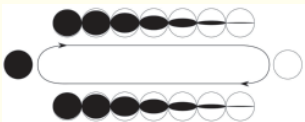
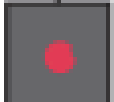


图 1 SSMVEP 的基本刺激模式^[8]
Fig.1 Basic stimulation patterns of SSVEP^[8]

规律的移动^[14] 及结合闪烁的移动^[15] 等; d. 步态序列, 视频中人的步态动作也可诱导出 SSMVEP^[16]; e. 其他运动方式。学者在 SSMVEP 诱导中的视觉刺激多种运动方式中, 试图探索出哪种运动刺激方式较好, 如 Yan 等^[4] 比较了螺旋、摆动、旋转和收缩-扩张运动模式诱导的 SSMVEP, 研究结果表明, 螺旋运动的视觉刺激效果较好。但由于运动方式多种多样, 并且不断有新的运动刺激方式被提出, 因此, 哪种运动刺激方式诱导 SSMVEP 的效果最好, 并没有一个定论。研究表明, 沿视

轴改变距离的径向扩张和收缩运动比无深度变化的运动能引起更强的 SSMVEP 效果^[4]。总体而言, SSMVEP 诱导研究中最常采用的运动刺激模式是基于径向收缩-扩张运动方式(如牛顿环和棋盘格)。近年来, 开发出了更多种运动方式来诱导出 SSMVEP, 如 Wang 等^[17] 采用视觉错觉运动来诱导 SSMVEP, Karimi 等^[18] 采用基于增强现实(augmented reality, AR)的运动方式来诱导 SSMVEP。在诱导 SSMVEP 方面, 不仅采用了不同的运动刺激模式, 而且在探索运动视觉刺激参数方面也开展了

表 1 SSMVEP 运动刺激模式总结
Tab.1 Summary of stimulation patterns of SSMVEP

作者(年份)	刺激方式	刺激呈现界面
Xie等 ^[19] (2012)	牛顿环	
Han等 ^[20] (2017)	环形振荡棋盘格	
Yan等 ^[4] (2018)	扇形, 圆形, 圆形螺旋纹, 环形振荡棋盘格	
Wang等 ^[17] (2019)	圆形箭头纹理	
Karimi等 ^[18] (2019)	圆形, 方形	
Chai等 ^[21] (2019)	圆形牛顿环, 方环	
Stawicki等 ^[10] (2019)	实线圆	
Volosyak等 ^[11] (2020)	实线圆	
Kanoga等 ^[22] (2020)	小方块	
Zhang等 ^[16] (2021)	步态序列	
Rekrut等 ^[12] (2021)	箭头/十字/齿轮/盒子, Word/Excel/Outlook/PDF图标	

一些研究, 研究结果表明, 运动视觉刺激参数对SSMVEP的诱导效果也有一定的影响^[6]。

2 影响SSMVEP的运动视觉刺激参数

在SSMVEP的诱导研究中, 学者一直在致力于提高SSMVEP的信噪比, 增强SSMVEP的信噪比的主要方法之一是运动刺激方式的改进和运动刺激参数的选择。因此, 运动视觉刺激参数对SSMVEP的影响, 对基于SSMVEP的BCI性能的影响也有了相关的研究报道。目前, SSMVEP研

究中涉及的运动刺激参数主要有运动刺激频率、运动刺激频率间隔、运动刺激的屏幕刷新率、运动刺激的大小、颜色、对比度、运动刺激界面的呈现间隔等。表2归纳总结了这些运动刺激参数对SSMVEP信号特性和主观感受的影响。

总体而言, 有关运动刺激参数对SSMVEP信号特性的研究还十分有限, 依旧处于探索阶段。哪种刺激参数或者刺激参数的组合最有利于SSMVEP的诱导、最有利于提高SSMVEP的信噪比和识别精度尚缺少定论。基于现有的研究结果, 有学者提出SSMVEP运动刺激参数的选择趋势很可能集中在小型、绿色、高频刺激上^[6]。

表 2 刺激参数对SSMVEP的影响
Tab.2 Influence of stimulation parameters on SSMVEP

刺激参数	参数取值或范围	SSMVEP的信号特性	主观感受
刺激频率 ^[6]	8~15 Hz(间隔1 Hz)及38~45 Hz(间隔1Hz)	识别准确率无显著差异	高频的刺激,可降低视觉疲劳
频率间隔 ^[6]	0.6, 1 Hz	无显著差异	—
屏刷新率 ^[6]	60, 120 Hz	无显著差异	高刷新率受试者舒适度高
刺激大小 ^[6]	100, 200 px	尺寸小,识别准确率高	—
刺激形状 ^[23]	方形,圆形	无显著差异	方环运动的主观评价优
刺激颜色 ^[6]	白色, 蓝色, 绿色, 灰色	蓝色识别准确率低	绿色刺激降低视觉疲劳
刺激亮度 ^[6]	125, 255 cd/m ²	无显著差异	—
刺激对比度 ^[24]	13.9 : 1, 3.6 : 1, 1 : 1	13.9 : 1和3.6 : 1的信噪比高, 识别精度高	对比度越大, 越容易引起视觉疲劳
刺激间距 ^[25]	视角5.2375°, 8.5308°, 12.2251°	视角小, 性能差	—

3 SSMVEP的信号处理方法

增强SSMVEP的信噪比, 提高基于SSMVEP的BCI的性能不只是依靠运动刺激方式的改进和运动刺激参数的选择, 改进SSMVEP的信号处理方法也是一个很重要的方面。SSMVEP的峰值能量主要集中在运动方向变化率上, 对2个相反方向运动的视觉感知尤为突出^[26], 因此, 方向变化率或者称为运动逆转频率是SSMVEP的基频, 第一次谐波频率就等于运动周期的频率。总体说来, SSMVEP的平均幅值虽然小于传统SSVEP的幅值, 但SSMVEP的能量集中, 频谱中只有1个显著的峰值, 其对应于运动反转频率, SSMVEP这种频率简洁的特点使得SSMVEP更易于从复杂的背景脑电信号中提取出来。SSMVEP信号的识别准确率的提高对于基于SSMVEP的BCI系统性能的提升非常重要^[6]。

SSMVEP的信号处理和特征分析的核心思想就是基于刺激频率的特征识别。目前, SSMVEP的信号特征分析方法有多种。功率谱密度分析^[27](power spectral density analysis, PSDA)是提取SSVEP响应频率的传统方法, 也可以用来分析SSMVEP。PSDA^[28]方法具有计算成本低、鲁棒性强的优点, 但当数据段未被截断为相应激励频率的整数周期时, 存在频谱泄漏严重的缺点^[29]。2006年, Lin等^[30]将典型相关分析(canonical correlation analysis, CCA)应用于SSVEP, 取得了较好的效果。后来此方法广泛应用于SSVEP的信号识别。CCA是对2个多变量矩阵进行线性变换, 使变换后的2个集合具有最大的线性相关性, 是揭示2组多变量矩阵之间线性相关性的非参数方法。与PSDA相比, CCA方法可以将多通道信号的数据进行组合, 提高了SSVEP的信噪比和目标识别精度。值得一提的是, CCA的优势在于分析高通量脑电记录通道

所采集的数据。当脑电记录通道数量较少时,CCA的识别精度可能会急剧下降^[28]。SSMVEP是SSVEP的一种,因此,目前SSMVEP信号的识别算法,绝大部分也都采用CCA。随着机器学习和深度学习在信号处理领域的快速发展,各种深度学习算法也被用在了SSMVEP的分类以及基于SSMVEP的BCI特征提取和模式识别上。Jia等^[31]在2017年提出了一种基于分离特征学习的DBN(deep neural network)结构,用于SSMVEP信号的分类,研究结果表明,与传统的CCA方法相比,此方法具有更强的鲁棒性,能在较短的响应时间内实现较高的SSMVEP判别精度和更低的主体间变异性,表明了DBN结构在SSMVEP检测中的应用能力。目前,基于深度学习的数据处理算法能够较好地提升基于SSMVEP的BCI的系统性能,但尚不能替代CCA,CCA依然是SSMVEP最常用的信号处理方法。

4 SSMVEP在BCI中的应用

基于SSMVEP的BCI系统在医疗及娱乐等领域已有了广泛的应用。SSMVEP是在SSVEP的基础上发展起来的,因此,基于SSMVEP的BCI系统类似于基于SSVEP的BCI系统,其最为广泛的应用是拼写器^[10-11,20,32],基于SSMVEP的拼写器系统可以实现瘫痪患者利用脑电信号与外界交流。国内的学者不仅实现了较常见的基于SSMVEP的英文拼写系统,并且于2017年提出了一个基于SSMVEP的80个目标的中文拼写系统^[20],系统中采用振荡棋盘格来诱导SSMVEP,视觉刺激无闪烁,在线实验取得了良好的BCI效果。基于SSMVEP的BCI系统还可以应用于神经康复训练^[33],SSMVEP诱导中的运动视觉刺激可以有效激活大脑中的镜像神经元系统,提高了脑可塑性能力,有助于患者的神经康复^[34]。基于SSMVEP的BCI系统也有助于临床眼科疾病的诊断或辅助诊断,2019年Zheng等^[35]采用同心圆环的振荡扩张-收缩运动诱发的SSMVEP来评估眼科检查项目中的视力和视敏度,通过改变SSMVEP诱导中的视觉刺激参数,使运动视觉刺激具有不同的频率和对比度,用来评估不同的视敏度,使SSMVEP的诱导成为一种定量测量视敏度的方法。同样,基于SSMVEP的特性,Nakanishi等^[36]设计了一个可以检测出青光眼的设备,即nGoggle设备;徐光华等^[37]通过收缩-

扩张的棋盘格诱发的SSMVEP,设计了一种可以检测弱视的装置。

基于SSMVEP的BCI系统也可应用于娱乐领域,例如,2019年Perez-Valero等^[38]在游戏设计时,将游戏人物的行动轨迹转化为一定频率的可以收缩-扩张的环形棋盘,从而诱发出了SSMVEP。

5 SSMVEP的发展趋势

SSMVEP和基于SSMVEP的BCI系统必将随着脑科学和BCI系统的快速发展而发展,未来SSMVEP可能朝着以下几个方面发展:

在SSMVEP的诱导模式方面,除了进一步深入研究较常使用的运动刺激模式,如径向收缩-扩张运动方式中的牛顿环和棋盘格,探索新的运动刺激模式或者将常规刺激模式偶联新的刺激参数将是SSMVEP的未来发展方向之一。近年来,国内外的科研人员都在围绕这一方向展开研究,例如,Han等^[39]采用立体运动刺激来诱导SSMVEP,立体三维显示器可以呈现出具有双目视差的图像,这些双目视差图像大小的周期性变化即可产生往复性的立体运动刺激,研究结果进一步表明,立体运动刺激诱导的SSMVEP的幅值和信噪比更大、稳态视觉感知反应更为强烈。建立在3D技术上的立体运动刺激来诱导SSMVEP,基于SSMVEP的BCI系统与虚拟现实或增强现实的融合都是值得进一步深入研究的课题方向。

在SSMVEP的信号处理方面,现有的深度学习算法虽不能取代最常使用的CCA方法,但不可否认的是,随着各种框架的深度学习算法的提出,SSMVEP识别精度和基于SSMVEP的BCI性能都在提高。因此,探索更加强大的深度学习算法来处理SSMVEP信号将是未来的发展方向。

在SSMVEP的BCI应用方面,无闪烁刺激诱导的SSMVEP在用户舒适度方面相比于SSVEP前进了一大步,进一步挖掘基于SSMVEP的BCI系统在医疗、娱乐等领域的应用将是未来的研究目标。SSMVEP联合其他脑电信号或者其他人体生理信号,如心电信号、肌电信号及眼电信号等。建立多模态的BCI系统不仅是SSMVEP的发展需求,而且也是整个BCI系统的发展需求。SSMVEP多模态BCI系统的发展将进一步增强基于SSMVEP的BCI系统的性能,提高BCI在复杂现实环境中

的准确性和可靠性, 最终实现基于 SSMVEP 的 BCI 系统的便携性、实用性和大众化。

参考文献:

- [1] VAN VOORHIS S, HILLYARD S A. Visual evoked potentials and selective attention to points in space[J]. *Perception & Psychophysics*, 1977, 22(1): 54–62.
- [2] GAO Z K, GUO W, CAI Q, et al. Characterization of SSMVEP-based EEG signals using multiplex limited penetrable horizontal visibility graph[J]. *Chaos*, 2019, 29(7): 073119.
- [3] KUBA M, KUBOVÁ Z, KREMIÁČEK J, et al. Motion-onset VEPs: characteristics, methods, and diagnostic use[J]. *Vision Research*, 2007, 47(2): 189–202.
- [4] YAN W Q, XU G H, XIE J, et al. Four novel motion paradigms based on steady-state motion visual evoked potential[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2018, 65(8): 1696–1704.
- [5] SNOWDEN R J, FREEMAN T C A. The visual perception of motion[J]. *Current Biology*, 2004, 14(19): R828–R831.
- [6] CHAI X K, ZHANG Z M, GUAN K, et al. Effects of fatigue on steady state motion visual evoked potentials: optimised stimulus parameters for a zoom motion-based brain-computer interface[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2020, 196: 105650.
- [7] ZHU D H, BIEGER J, MOLINA G G, et al. A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2010, 2010: 702357.
- [8] VIALATTE F B, MAURICE M, DAUWELS J, et al. Steady-state visually evoked potentials: focus on essential paradigms and future perspectives[J]. *Progress in Neurobiology*, 2010, 90(4): 418–438.
- [9] YAN W Q, XU G H, LI M, et al. Steady-state motion visual evoked potential (SSMVEP) based on equal luminance colored enhancement[J]. *PLoS One*, 2017, 12(1): e0169642.
- [10] STAWICKI P, VOLOSAYAK I. Comparison of modern highly interactive flicker-free steady state motion visual evoked potentials for practical brain-computer interfaces[J]. *Brain Sciences*, 2020, 10(10): 686.
- [11] VOLOSAYAK I, REZEIKA A, BENDA M, et al. Towards solving of the illiteracy phenomenon for VEP-based brain-computer interfaces[J]. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 2020, 6(3): 035034.
- [12] REKRUT M, JUNGBLUTH T, ALEXANDERSSON J, et al. Spinning icons: introducing a novel SSVEP-BCI paradigm based on rotation[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Intelligent User Interfaces. College Station, TX, USA: ACM Press, 2021: 234–243.
- [13] PUNSAWAD Y, WONGSAWAT Y. Hybrid SSVEP-motion visual stimulus based BCI system for intelligent wheelchair[C]//Proceedings of the 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Osaka, Japan: IEEE, 2013: 7416–7419.
- [14] ZHANG N N, YU Y, YIN E W, et al. Performance of virtual stimulus motion based on the SSVEP-BCI[C]//Proceedings of 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). Xi'an, China: IEEE, 2016: 656–659.
- [15] YAN W Q, XU G H. Brain-computer interface method based on light-flashing and motion hybrid coding[J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2020, 14(5): 697–708.
- [16] ZHANG X, XU G H, RAVI A, et al. Can a highly accurate multi-class SSMVEP BCI induce sensory-motor rhythm in the sensorimotor area? [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2021, 18(3): 035001.
- [17] WANG H C, XU G H, WU Y F, et al. A New brain-computer interface paradigm based on steady-state visual evoked potential of illusory pattern motion perception[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Ubiquitous Robots. Jeju, Korea (South): IEEE, 2019: 38–43.
- [18] KARIMI R, ROSERO L, NIRGHOLAMI M, et al. Study on novel designs with reduced fatigue for steady state motion visual evoked potentials[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). Ottawa: IEEE, 2019: 1–5.
- [19] XIE J, XU G H, WANG J, et al. Steady-state motion visual evoked potentials produced by oscillating newton's rings: Implications for brain-computer interfaces[J]. *PLoS One*, 2012, 7(6): e39707.
- [20] HAN C C, XU G H, XIE J, et al. An eighty-target high-speed Chinese BCI speller[C]//Proceedings of the 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Jeju, Korea (South): IEEE, 2017: 1652–1655.
- [21] CHAI X K, ZHANG Z M, GUAN K, et al. A radial zoom motion-based paradigm for steady state motion visual evoked potentials[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13: 127.
- [22] KANOOGA S, NAKANISHI M, MURAI A, et al. Robustness analysis of decoding SSVEPs in humans with head movements using a moving visual flicker[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2020, 17(1): 016009.
- [23] 刘贵彤, 张志敏, 柴晓珂, 等. 基于 SSMVEP 的脑-机接口

- 视觉刺激探究[J]. [中国医疗器械杂志](#), 2018, 42(5): 313–316.
- [24] YAN W, XU G, XIE J, et al. Study on the effects of brightness contrast on steady-state motion visual evoked potential[C]//2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Jeju, Korea (South): IEEE, 2017:2263–2266.
- [25] GAO Y P, RAVI A, JIANG N. Does inter-stimulus distance influence the decoding performance of SSVEP and SSMVEP BCI? [C]//Proceedings of the 10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering. Italy: IEEE, 2021: 507–510.
- [26] HEINRICH S P, BACH M. Adaptation characteristics of steady-state motion visual evoked potentials[J]. [Clinical Neurophysiology](#), 2003, 114(7): 1359–1366.
- [27] ZHANG Y J, XIE J, XU G H, et al. FPGA implementation of visual noise optimized online steady-state motion visual evoked potential BCI System[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Ubiquitous Robots. Kyoto: IEEE, 2020: 403–408.
- [28] MA T, LI H, YANG H, et al. The extraction of motion-onset VEP BCI features based on deep learning and compressed sensing[J]. [Journal of Neuroscience Methods](#), 2017, 275: 80–92.
- [29] XIE J, HAN X L, XU G H, et al. Recognition of SSMVEP signals based on multi-channel integrated GT^2 circ statistic method[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Jeju, Korea (South): IEEE, 2017: 169–173.
- [30] LIN Z L, ZHANG C S, WU W, et al. Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs[J]. [IEEE Transactions on Biomedical Engineering](#), 2007, 54(6): 1172–1176.
- [31] JIA Y G, XIE J, XU G H, et al. A separated feature learning based DBN structure for classification of SSMVEP signals[C]//Proceedings of the 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Jeju, Korea (South): IEEE, 2017: 3356–3359.
- [32] LIU D K, LIU C, HONG B. Bi-directional visual motion based BCI speller[C]//Proceedings of the 9th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering. San Francisco: IEEE, 2019: 589–592.
- [33] XIE J, XU G H, ZHAO X G, et al. Enhanced plasticity of human evoked potentials by visual noise during the intervention of steady-state stimulation based brain-computer interface[J]. [Frontiers in Neurobotics](#), 2018, 12: 82.
- [34] LIM H, KU J. Flickering exercise video produces mirror neuron system (MNS) activation and steady state visually evoked potentials (SSVEPs)[J]. [Biomedical Engineering Letters](#), 2017, 7(4): 281–286.
- [35] ZHENG X W, XU G H, ZHI Y, et al. Objective and quantitative assessment of interocular suppression in strabismic amblyopia based on steady-state motion visual evoked potentials[J]. [Vision Research](#), 2019, 164: 44–52.
- [36] NAKANISHI M, WANG Y T, JUNG T P, et al. Detecting glaucoma with a portable brain-computer interface for objective assessment of visual function loss[J]. [JAMA Ophthalmology](#), 2017, 135(6): 550–557.
- [37] 徐光华, 郑小伟, 王云云, 等. 一种弱视脑电客观定量检测装置: 中国, CN110367981A[P]. 2019-10-25.
- [38] PEREZ-VALERO E, LOPEZ-GORDO M A, VAQUERO-BLASCO M A. An attention-driven videogame based on steady-state motion visual evoked potentials[J]. [Expert Systems](#), 2021, 38(4): e12682.
- [39] HAN C C, XU G H, JIANG Y M, et al. Stereoscopic motion perception research based on steady-state visual motion evoked potential[C]//Proceedings of the 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Berlin: IEEE, 2019: 3067–3070.

(编辑: 石 瑛)