



作者简介: 公维军, 首都医科大学附属北京康复医院、康复医学院副院长, 主任医师、教授、研究生导师。现任: 北京康复医学会副会长, 中西医结合专业委员会主任委员; 北京医学会物理医学与康复学分会常务委员; 中国康复医学会脑血管病康复专业委员会常务委员, 重症康复专业委员会、帕金森病与运动障碍康复专业委员会副主任委员; 中国医师协会康复医师分会中西医结合康复专业委员会副主任委员; 中华医学会心身医学分会心身康复学组委员; 中国老年医学学会分级诊疗学术委员会副主任委员; 中国残疾人康复协会神经伤残康复专业委员会常务委员。主持参与省部级以上科研课题10项; 发表论文40余篇, 其中SCI论文5篇; 主编或参编专著7部。

脑机接口的研究现状

公维军

100144 首都医科大学附属北京康复医院神经康复中心

通信作者: 公维军, Email: gwj1971@163.com

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2019.08.002

【摘要】 脑机接口(BCI)是一种突破常规的外周神经肌肉传出通路限制,使人可以通过脑信号直接控制外部设备的新型人-机交互方式或技术。BCI通常使用表面脑电图获得特征性脑电信号。基本流程为信号采集、预处理、特征提取、分类和设备控制。BCI能辅助患者与外界交流、活动,实时控制假肢、矫形器、护理机械人等康复辅助器械,帮助其重建运动功能和减少生活依赖,或者进行反馈训练,激活或提高神经可塑性,重建神经功能。

【关键词】 脑机接口; 神经康复

Research status of brain-computer interface Gong Weijun

Neural Rehabilitation Center, Beijing Rehabilitation Hospital, Capital Medical University, Beijing 100144, China

Corresponding author: Gong Weijun, Email: gwj1971@163.com

【Abstract】 Brain-computer interface (BCI) is a new human-computer interaction method or technology that breaks through the conventional limitation of peripheral neuromuscular efferent pathway and enables people to directly control external devices through brain signals. BCI usually uses surface electroencephalogram to obtain characteristic EEG. The basic process includes signal collection, pre-processing, feature extraction, classification and equipment control. BCI usually uses surface electroencephalogram to obtain characteristic EEG signals. BCI can assist patients to communicate with the outside world and move, real-time control of prosthetic limbs, orthosis, nursing robots and other rehabilitation aids, help them rebuild motor function and reduce life dependence, or carry out feedback training, activate or improve nerve plasticity, and rebuild nerve function.

【Key words】 Brain-computer interface; Neural rehabilitation

脑机接口(brain-computer interface, BCI)是一种突破常规的外周神经肌肉传出通路限制,在脑与计算机或其他设备建立联系,使人可以通过脑信号直接控制外部设备的新型人-机交互方式或技术^[1]。在神经康复医学领域,BCI不仅可以帮助神经传导功能异常而肌肉组织收缩功能正常或部分正常的这类患者执行特定的任务,而且可以通过负反馈训练

重塑神经功能。另外,在判断意识水平和进行意识障碍的重新分类方面,BCI又为科学研究和临床诊疗提供新的思路。BCI是新兴技术,跨计算机科学、神经病学、软件工程学、康复科学等多个学科,原理和技术设计相当复杂。鉴于BCI在神经康复医学领域具有重要的应用价值,而康复工作者对其认识不足,现对BCI的研究现状作一介绍。

一、BCI流程

BCI流程基本相同,大致可分为信号采集、预处理、特征提取、分类、设备控制几个部分^[2]。目前来说,BCI信号可通过功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图(electroencephalography, EEG)、功能性近红外光谱(functional near infrared spectroscopy, fNIRS)来获得。尽管EEG空间分辨率、信号频率范围、抗噪能力、信号衰减等参数仍不能满足临床要求,但具有较高的时间分辨率、价格低廉、操作简单、携带方便的优点,仍然使EEG成为临床应用和科学研究最常见的脑电信号测量方法。现以EEG途径的BCI为例,简要描述BCI的基本流程,大体为:参与者进行某项思维任务或者接受视觉刺激或者在安静状态下,佩戴装有电极的帽子或者经手术植入电极后,接收设备收集参与者的脑电信号,放大器将获得的脑电信号进行放大以便获得细微的信号,接下来进行初步滤波、A/D转换等数字化处理,之后提取反映参与者意图信号的时域、频域特征,分类器通过特征转换函数进行分类,最后输入到控制设备中,将脑电信号转换为实际动作,比如在spellers上选择字母^[3]。

二、BCI的分类

根据BCI采集信号的方式,可将其分为侵入性与非侵入性两类^[4]。侵入性BCI是通过手术将电极植入患者大脑,电极长期稳定放置,直接记录神经元电活动,信号衰减基本可以忽略,时间、空间分辨率高。但这种方式需要经颅植入,技术难度大,存在继发感染可能性。一旦发生颅脑感染、电极故障或者电极寿命结束,需将电极取出,造成二次损伤。非侵入性脑机接口是通过头皮电极或者红外线或者磁共振采集信号,安全、方便、无创。脑电信号受大脑的容积导体效应的影响,传递至头皮表面时明显削弱,时间、空间分布信息大量丢失,红外线、功能磁共振采集信号耗时较长,操作麻烦,受场地限制大。

根据信息交流的方式分为单向BCI、双向BCI^[5]。前者是指计算机或其他外界设备单纯接受发自我大脑的信号或者单向向大脑发送相关信息,后者则能实现大脑与外界之间双向信息交流、反馈。

根据BCI的应用分为辅助性BCI(assistive BCI)和康复性BCI(rehabilitative BCI)^[6]。辅助性BCI指患者通过BCI获取指令,实现对外部设备的连续控制,常见的有BCI speaker(用于言语康复的一种BCI);康复性BCI具有反馈能力,可通过BCI提取患者脑电波特征,在训练过程中实时反馈给患者,激活其大脑神经可塑性,提高患者运动再学习能力。

三、BCI的理论基础

大脑可塑性是指在内、外环境因子的作用下,神经元之间的相互联系发生改变,神经功能发生重

组的能力,分为结构可塑性和功能可塑性,前者是指脑神经元之间的联系可以通过学习和经验的影响产生新的连接,从而影响个体的功能,后者是指脑某一代表区的功能通过学习和训练可以由相近脑区代替。Soekadar等^[7]将BCI应用于脑卒中患者康复,通过刺激-强化-惩罚的类似于学习的过程,明显改善神经功能。另外,通过fMRI获得脑信号,研究者发现,BCI训练可以提高损伤脑区皮质的激活^[8-10]。比如脑卒中患者通过4周的运动想象(motor imagery, MI)-BCI训练,病灶侧大脑代偿功能恢复,对侧大脑泛化激活减少,患者手功能提高,fMRI显示大脑皮质重塑^[10]。因此神经可塑性可能是BCI改善脑功能的原因之一。在此理论基础上,研究者通过BCI改变大脑信号的特征直接产生正常的脑信号或者通过BCI的反馈利用其外接设备进行反复训练,产生正常的运动模式,间接促进正常的脑信号产生,促进大脑重塑^[11-12]。

四、脑信号获取方法

BCI可通过EEG、fMRI和fNIRS获取大脑皮层功能活动信息,fNIRS的成像原理是特定频谱近红外光红外线穿透大脑组织后被血液组织中某些基因(如氧合血红蛋白和去氧血红蛋白)特异性吸收,测量大脑皮层组织的血液动力学变化,进而大脑皮层活动的能量供应和新陈代谢信息^[13-15]。具有性价比高、低噪声、使用便捷且可连续测量的优点,缺点是图片质量较差,空间辨别率较差。fMRI利用注射造影剂、灌注加权、弥散加权及血样水平依赖等方法获得神经元、神经传导束、血流的磁信号,进而获得细胞功能图像。fMRI的空间分辨率高,可精确定位大脑功能区域,并可以选择某一个大脑区域来分析一个具体的思维活动。但是fMRI花费高,场地限制大,成像数据维数高,数据分析难度大,因此fMRI在BCI上的应用相对较少^[16]。EEG是通过表面电极或植入电极获得脑部生物电位加以放大记录而获得的图形^[17]。表面EEG无创价廉、操作简便,植入电极获得的EEG需要进行外科手术,有感染、免疫排斥风险。直接EEG的空间分辨率高于表面EEG,但比起前两种方式,空间分辨率远远不足。总体来说,这3种信号获取方式均存在缺陷和优势,目前倾向于综合运用各种手段,比如将EEG和fMRI结合起来,其空间、时间分辨率明显提高。

五、EEG常采取的电信号类型

目前EEG仍然是最为常见的BCI信号获取方式,fNIRS和fMRI脑机接口研究较少。因此,本文重点介绍BCI所需采集的电信号。我们常说的脑电信号实际上指的是特征性脑电信号,即人脑在特定的外部刺激或思维任务下可以产生具有一定时间或频率特征的脑电信号。应用于BCI的特征脑电信号有

3类。第一类是内源性的事件相关电位(event-related potential, ERP)信号,包括P300成分^[18]、N200成分^[19]、N400成分等^[20-21]。这些ERP成分需要人脑高级认知加工的参与才能被诱发,即需要完成一定的思维任务,但无需经过长时间的反复训练。第二类是外源性的诱发电位(evoked potential, EP)信号,包括视觉诱发电位(visual evoked potential, VEP)与稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)^[22]等。这类信号患者不需要训练,被动接受外界信息,特征提取简单、准确率高,但需要刺激装置提供刺激或者提供结构化的环境,依赖于人的某种知觉。第三类是靠对自发脑电节律的调节产生的信号,包括皮层慢电位(slow cortical potential, SCP)^[23],以及运动想象任务中事件相关同步/去同步(event-related synchronization and desynchronization potential, ERSP/ERDP)^[24]。这类信号依赖于自发的精神活动,需要患者执行特定的精神任务,进行大量的训练来产生特定模式的脑电活动,受主观因素影响较大^[25]。ERP信号由外部刺激(字符、图像、声音)诱发产生,具有一定潜伏期,要求连续出现的两个刺激之间有足够的时间间隔,故多用于拼写器中字符选择等状态选择与控制^[26],SSVEP信号反映了快速呈现的视觉刺激的频率特征,具有时间连续性,因此SSVEP的BCI连续性控制,如控制计算机光标移动或操纵轮椅导航。这里需要特别提及的是在单边的肢体运动或想象运动过程中,大脑对侧产生ERDP,同侧产生ERSP,两者是相伴而生的。MI实现简单,易于掌握,重要的是MI具有神经重塑作用^[10],与BCI结合,脑与外部设备之间直接进行通信和控制,可以实现患者特别是运动神经元病的患者肢体和脑联系重建。

六、BCI在神经康复领域的应用

目前BCI在医学康复领域应用十分有前景,可以用于众多方面。总的来说,研究者利用BCI帮助患者与外界交流、活动,实时控制假肢、矫形器、护理机械人等运动康复辅助器械,帮助其重建运动功能和减少生活依赖,或者进行反馈训练,激活或提高神经可塑性,重建神经功能。在运动功能方面,患者可以通过BCI训练改善肢体功能。接受BCI功能性治疗(functional electrical stimulation, FES)的脑卒中偏瘫患者的Fugl-Meyer评分(FMA)、改良Bathel指数(BI)评分及下肢徒手肌力评估(MMT)均较治疗前提高^[28],上肢手功能障碍的脑卒中患者经过1个月的BCI的康复训练上肢Fugl-Meyer评估和运动功能状态量表评分较治疗前均有所提高^[29]。研究者曾经在第5颈椎完全性损伤的患者进行BCI康复训练,患者可以通过应用BCI系统控制P波,实现在虚拟情况下行走训练^[30]。闭锁硬化症患者可通过BCI

训练其控制显示屏上光标的移动,从而进行交流^[31],甚至能通过BCI实现简单语言交流^[32-33]。在意识障碍领域,BCI可以协助检测意识水平。在一项研究中,Martin等^[35]对54例重型脑损伤患者(植物状态23例,最低意识状态31例)进行了fMRI检查,并进行运动和空间图像任务检测,发现5例创伤性脑损伤患者在执行任务时,相应脑区能产生自主的、可靠的、可重复的血氧生成水平依赖反应,来调节他们的大脑活动,还有1例患者在行fMRI检查过程中能够利用BCI技术回答“是”或“否”的问题。这些结果表明,利用fMRI-BCI技术可以帮助意识障碍的重新分类。

七、BCI技术的缺陷与难点

BCI作为一个综合的大型系统,涉及的知识相当复杂,要真正应用于实际事务中,还有许多需要解决的问题。第一,脑表面电极所能采集到的大脑表面电活动有限,脑电活动的干扰因素较多,思维和脑电信号十分复杂,将脑电信号进行特征提取并进行相应的分类尚无统一标准。第二,BCI传输效率不高,尤其是单位时间内的传输量不足以达到人日常生活的需求,在真正应用到实际生活中时,会出现信息的滞后和响应时间过长等问题。第三,BCI技术没有一个很好的反馈信息来维持自身系统的稳定性,引入反馈机制来强化控制精度存在争议。第四,BCI内部结构极其复杂,维护和保养难度大。第五,将信号特征与患者自身心理活动联系起来困难,需要不断训练,才可以完成一个动作的提取,信号采集周期延长。第五,样本的差异性决定设置的个性化,即使是同一个人,情绪因素、目的变化、生理状况等改变可能会使已设计好的BCI装置不匹配。

综上所述,BCI突破传统大脑信息输出通路对脑信号输出的限制,在神经康复领域前景广阔,但目前的BCI技术尚不成熟,存在一定的不足和缺陷。相信多学科合作,尤其是神经心理学、计算机科学的共同协作,BCI将日趋成熟。

利益冲突 文章所有作者共同认可文章无相关利益冲突

作者贡献声明 论文撰写及论文修订为公维军

参 考 文 献

- [1] Huggins JE, Guger C, Ziat M, et al. Workshops of the Sixth International Brain-Computer Interface Meeting: brain-computer interfaces past, present, and future[J]. Brain Comput Interfaces (Abingdon), 2017, 4(1/2): 3-36. DOI: 10.1080/2326263X.2016.1275488.
- [2] Lazarou I, Nikolopoulos S, Petrantonakis PC, et al. EEG-Based Brain-Computer Interfaces for Communication and Rehabilitation of People with Motor Impairment: A Novel Approach of the 21st Century[J]. Front Hum Neurosci, 2018, 12: 14. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00014.
- [3] Shih JJ, Krusienski DJ, Wolpaw JR. Brain-computer interfaces in medicine[J]. Mayo Clin Proc, 2012, 87(3): 268-279. DOI:

- 10.1016/j.mayocp.2011.12.008.
- [4] Thakor NV. Translating the brain-machine interface[J]. *Sci Transl Med*, 2013, 5(210): 210ps17. DOI: 10.1126/scitranslmed.3007303.
- [5] 陈树耿, 贾杰. 脑机接口在脑卒中手功能康复中的应用进展[J]. *中国康复理论与实践*, 2017, 23(1): 23-26. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2017.01.006.
- Chen SG, Jia J. Application of Brain-computer Interface in Rehabilitation of Hand Function after Stroke (review) [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2017, 23(1): 23-26.
- [6] Jaillard A, Martin CD, Garambois K, et al. Vicarious function within the human primary motor cortex? A longitudinal fMRI stroke study[J]. *Brain*, 2005, 128(Pt 5): 1122-1138. DOI: 10.1093/brain/awh456.
- [7] Soekadar SR, Birbaumer N, Slutzky MW, et al. Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke[J]. *Neurobiol Dis*, 2015, 83: 172-179. DOI: 10.1016/j.nbd.2014.11.025.
- [8] Young BM, Nigogosyan Z, Walton LM, et al. Dose-response relationships using brain-computer interface technology impact stroke rehabilitation[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 361. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00361.
- [9] Stoeckel LE, Garrison KA, Ghosh S, et al. Optimizing real time fMRI neurofeedback for therapeutic discovery and development[J]. *Neuroimage Clin*, 2014, 5: 245-255. DOI: 10.1016/j.nicl.2014.07.002.
- [10] 刘小莹, 毕胜, 高小榕, 等. 基于运动想象的脑机交互康复训练新技术对脑卒中大脑可塑性影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2013, 28(2): 97-102. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2013.02.001.
- Liu XB, Bi S, Gao XR, et al. A new technique of rehabilitation training based on motor imagine using brain computer interface-functional electric stimulation system and it's effect on plasticity of brain of a stroke patient[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2013, 28(2): 97-102.
- [11] Daly JJ, Wolpaw JR. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation[J]. *Lancet Neurol*, 2008, 7(11): 1032-1043. DOI: 10.1016/S1474-4422(08)70223-0.
- [12] Folcher M, Oesterle S, Zwicky K, et al. Mind-controlled transgene expression by a wireless-powered optogenetic designer cell implant[J]. *Nat Commun*, 2014, 5: 5392. DOI: 10.1038/ncomms6392.
- [13] Naseer N, Hong KS. Classification of functional near-infrared spectroscopy signals corresponding to the right- and left-wrist motor imagery for development of a brain-computer interface[J]. *Neurosci Lett*, 2013, 553: 84-89. DOI: 10.1016/j.neulet.2013.08.021.
- [14] Zimmermann R, Marchal-Crespo L, Edelmann J, et al. Detection of motor execution using a hybrid fNIRS-biosignal BCI: a feasibility study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2013, 10: 4. DOI: 10.1186/1743-0003-10-4.
- [15] Hong KS, Naseer N, Kim YH. Classification of prefrontal and motor cortex signals for three-class fNIRS-BCI[J]. *Neurosci Lett*, 2015, 587: 87-92. DOI: 10.1016/j.neulet.2014.12.029.
- [16] Sato JR, Basilio R, Paiva FF, et al. Real-time fMRI pattern decoding and neurofeedback using FRIEND: an FSL-integrated BCI toolbox[J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e81658. DOI: 10.1371/journal.pone.0081658.
- [17] Rezeika A, Benda M, Stawicki P, et al. Brain-Computer Interface Spellers: A Review[J]. *Brain Sci*, 2018, 8(4). DOI: 10.3390/brainsci8040057.
- [18] Pace A, Carver LJ, Friend M. Event-related potentials to intact and disrupted actions in children and adults[J]. *J Exp child psychology*, 2013, 116(2): 453-470. DOI: 10.1016/j.jecp.2012.10.013.
- [19] Howe AS. Meta-analysis of the endogenous N200 latency event-related potential subcomponent in patients with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment[J]. *Clin Neurophysiol*, 2014, 125(6): 1145-1151. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.10.019.
- [20] Jackson F, Foti D, Kotov R, et al. An incongruent reality: the N400 in relation to psychosis and recovery[J]. *Schizophr Res*, 2014, 160(1/3): 208-215. DOI: 10.1016/j.schres.2014.09.039.
- [21] Chen L, Jin J, Zhang Y, et al. A survey of the dummy face and human face stimuli used in BCI paradigm[J]. *J Neurosci Methods*, 2015, 239: 18-27. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2014.10.002.
- [22] Gao S, Wang Y, Gao X, et al. Visual and auditory brain-computer interfaces[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2014, 61(5): 1436-1447. DOI: 10.1109/TBME.2014.2300164.
- [23] Bayasgalan B, Matsushashi M, Fumuro T, et al. We could predict good responders to vagus nerve stimulation: A surrogate marker by slow cortical potential shift[J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128(9): 1583-1589. DOI: 10.1016/j.clinph.2017.05.019.
- [24] Baghdadi G, Towhidkhal F, Rostami R. A mathematical model to mimic the shape of event related desynchronization/synchronization[J]. *J Theor Biol*, 2018, 453: 117-124. DOI: 10.1016/j.jtbi.2018.05.026.
- [25] 杨帮华, 陆文字, 郑晓明, 等. 一种运动想象脑机接口训练系统的设计[J]. *北京生物医学工程*, 2012, 31(1): 72-76. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208(2012)01.16.
- Yang BH, Lu WY, Zheng XM, et al. Training system for brain computer interface based on motor imagery[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2012, 31(1): 72-76.
- [26] Treder MS, Blankertz B. (C)overt attention and visual speller design in an ERP-based brain-computer interface[J]. *Behav Brain Funct*, 2010, 6: 28. DOI: 10.1186/1744-9081-6-28.
- [27] 刘铁军, 张锐, 徐鹏. 基于运动想象的脑机接口关键技术研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2014, 33(6): 644-651. DOI: 10.3969/j.issn.0258-8021.2014.06.02.
- Liu TJ, Zhang R, Xu P. Key Techniques in Motor Imagery Based Brain-Computer Interface[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2014, 33(6): 644-651.
- [28] 方文堃, 刘昊, 杨柳, 等. 脑机接口技术在脑卒中偏瘫患者下肢运动功能康复治疗中的应用[J]. *山东医药*, 2018, 58(10): 66-68. DOI: 10.3969/j.issn.1002-266X.2018.10.020.
- [29] 陈树耿, 束小康, 贾杰. 基于闭环脑机接口的脑卒中患者的手功能康复研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2016, 31(11): 1189-1194. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2016.11.003.
- Chen SG, Shu XK, Jia J. Research on closed-loop-based brain computer interface for hand rehabilitation in stroke patients[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2016, 31(11): 1189-1194.
- [30] Enzinger C, Ropele S, Fazekas F, et al. Brain motor system function in a patient with complete spinal cord injury following extensive brain-computer interface training[J]. *Exp Brain Res*, 2008, 190(2): 215-223. DOI: 10.1007/s00221-008-1465-y.
- [32] Kübler A, Kotchoubey B, Kaiser J, et al. Brain-computer communication: unlocking the locked in[J]. *Psychol Bull*, 2001, 127(3): 358-375.
- [33] Birbaumer N. Breaking the silence: brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control[J]. *Psychophysiology*, 2006, 43(6): 517-532. DOI: 10.1111/j.1469-8986.2006.00456.x.
- [34] Zickler C, Riccio A, Leotta F, et al. A brain-computer interface as input channel for a standard assistive technology software[J]. *Clin EEG Neurosci*, 2011, 42(4): 236-244. DOI: 10.1177/155005941104200409.
- [35] Monti MM, Vanhaudenhuyse A, Coleman MR, et al. Willful modulation of brain activity in disorders of consciousness[J]. *N Engl J Med*, 2010, 362(7): 579-589. DOI: 10.1056/NEJMoa0905370.

(收稿日期: 2018-07-05)

(本文编辑: 赵金鑫)