

脑机接口技术的神经康复与新型应用

明东^{1,2}, 安兴伟¹, 王仲朋², 万柏坤^{1,2}

1. 天津大学医学工程与转化医学研究院, 天津 300072

2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 脑机接口(BCI)是脑认知神经科学与工程技术的新型人机信息交互方式,可无需依赖常规外周神经肌肉便能实现人意念思维与外界环境和设备的信息交互及操作控制,使“思想”直接变成“行动”,现已成为大脑认知机制解密、智能人机交互开发的全新“窗口”,也是未来人-机交互式混合智能发展的核心。本文综述了脑机接口在助力人工智能的科技背景、研究现状、应用领域及未来发展趋势。

关键词 脑机接口;人工智能;神经康复;新型应用

人工智能(artificial intelligence, AI)是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人类智能理论、方法、技术及应用系统的一门新兴技术科学。大脑是人类智能的发源地与统帅部。AI的研发基础是脑认知科学,而其最具代表性的应用成果则是融合人类智能和机器智能的人机交互式混合智能。该智能将充分发挥人类智能所特有的复杂思维意向、模糊决策和快速学习、自觉能动性、纠错与行动能力的优势,以及机器智能在大规模快速准确记忆与检索、大规模快速高精度计算等方面的优势,实现更高等级的智能方式。人-机混合智能发展的核心是脑机接口(brain-computer interface, BCI)技术^[1-4]。

随着科技发达国家纷纷吹响探索大脑奥秘的号角,中国亦提出以解密大脑认知功能、攻克大脑神经疾病为科研导向和以发展类脑人工智能技术为目标的“中国脑计划”^[2]。其中,脑机接口研究与开发是“脑计

划”的重要内容之一。BCI通过解码大脑神经活动信号获取思维信息(图1)^[5],实现人脑与外界直接交流,可较严谨定义为:一个通过检测中枢神经系统(central ner-

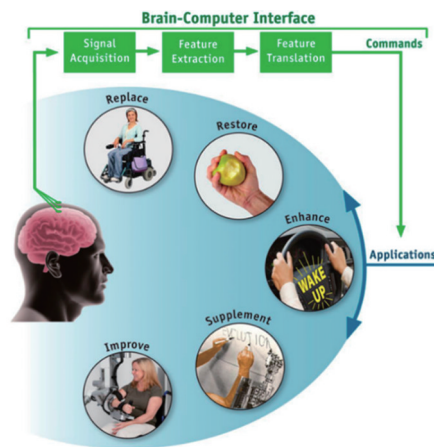


图1 BCI基本应用设计

Fig. 1 Basic design of the BCI system

收稿日期:2018-05-10;修回日期:2018-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(81630051,91648122,81601565,61603269);天津市科技支撑计划项目(17ZXRGX00020,16ZXHLSY00270)

作者简介:明东,教授,研究方向为神经传感与成像、神经接口与康复、神经刺激与调控等,电子邮箱:richardming@tju.edu.cn

引用格式:明东,安兴伟,王仲朋,等.脑机接口技术的神经康复与新型应用[J].科技导报,2018,36(12):31-37;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.12.005

vous system, CNS)活动并将其转化为人工输出来替代、修复、增强、补充或改善 CNS 正常输出,由此改变 CNS 与内外环境之间持续交互作用的系统^[5],即 BCI 通过在脑与计算机之间建立一条直接的信息通路,实现脑机之间的直接对话。一方面,BCI 通过检测神经活动模式识别大脑的思维意图并将其转化为可被计算机接收的机器指令;另一方面,BCI 通过适当的感官刺激或认知事件诱发相应的中枢神经活动可实现机器意图对大脑思维模式的诉求表达。

1 国内外研究现状

早期 BCI 以其独特优势应用于残疾人群辅助或替代其肢体运动功能,弥补或恢复其基本生活能力^[6-9]。近十几年来,BCI 快速拓展其应用成果,已在众多领域显示出广阔潜在前景。在军事、航天等特殊环境场合,BCI 能够发挥其不可替代的优势作用^[10-11]。这也是美国国防高级研究计划局等机构大力支持发展 BCI 技术的重要原因,以该计划局为代表的军事技术研究机构在 BCI 领域的投入持续增加,尤其在各国“脑计划”陆续启动之后更为明显。

除高新科技、军事场景外,BCI 系统应用在神经机制研究及有效性评价方面亦具显著优势,主要在于 BCI 对神经功能活动的检测和反馈使人脑运作过程变得可观察,国外为此纷纷开展面向人脑信息解读与调控相关技术产品的研发^[12-14]。2017 年 4 月,Facebook 公司创始人兼首席执行官马克·艾略特·扎克伯格(Mark Elliot Zuckerberg)在年度开发者大会上曝出了秘密 B8 计划中开展的 BCI 研究,预期在 18 个月内研制出可每分钟输入 100 个字符的脑控拼写器原型系统,力图实现意识控制一切(图 2);素有科学狂人之称的埃隆·马斯克(Elon Musk)在 2017 年初也宣布创办全新的 Neuralink 公司,将在 4 年内开发出首个用于治疗脑部疾病的 BCI 产品,未来将开发高生物相容性的植入神经接口,以实现人工智能植入人脑,取代人类的自然语言交流,实现颠覆性的智能人机接口技术^[15-17]。

相比欧美发达国家,中国在 BCI 方面的研究虽起步稍晚,但得力于国家大力支持,近些年来发展势头良好、速度迅猛,也取得了长足的进步,在民用或国防领域都显示出不俗的研究潜力,尤其在航天、康复等领

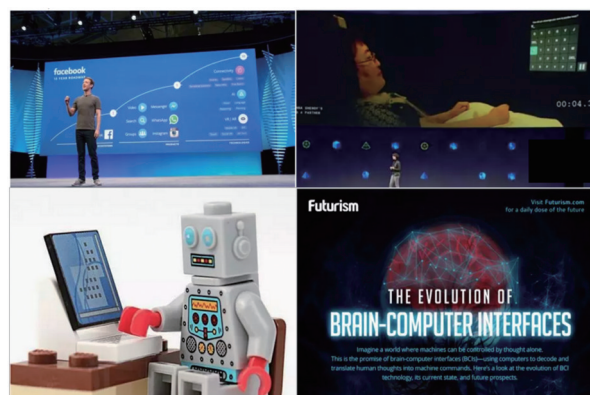
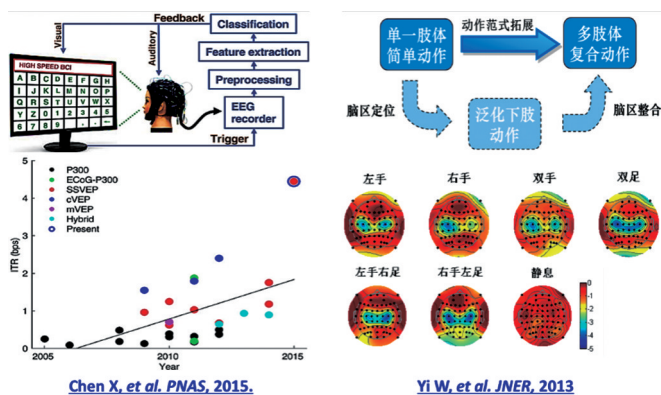


图 2 BCI 结合人工智能开发的广阔市场

Fig. 2 Broad market of BCI combined with AI

域,国内 BCI 研究涌现了一批突出的技术成果。例如实现了目前世界上最快的视觉诱发 BCI 技术,创造了平均超 300 bit/min 的最高信息传输速率记录(图 3(a))^[18];实现了国际最大指令集的复合运动想象 BCI 技术并率先应用于中风病人的临床康复(图 3(b))^[19];开展了国际首例航天员在轨 BCI 的空间适用性测试及应用研究。包括清华大学、华南理工大学、国防科技大学、电子科技大学、浙江大学、华东理工大学、上海交通大学、西安交通大学、北京师范大学及天津大学等在内的很多国内高校和研究机构的 BCI 团队均在基础技术和应用研究中有优秀的成果。从总体上看,国内的 BCI 技术已与国际保持同步发展,并在部分领域处于国际领先地位。



(a) 目前信息传输速率最快的视觉诱发 BCI 技术

(b) 大指令集复合运动想象 BCI 研究

图 3 中国 BCI 研究成果举例

Fig. 3 BCI applications in China

2 BCI应用领域扩展

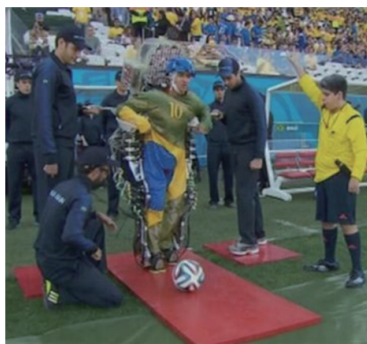
BCI研究初衷是为残疾人提供一个仅用思维即可与外界进行信息交流的通信新方式而无需依赖常规的外周神经肌肉系统,令其通过该系统只用意念不仅可对外会话交谈、打字通信,而且能操控轮椅、使用假肢等^[20-22]。但随着人工智能控制技术的日益成熟及虚拟现实(virtual reality, VR)、机械外骨骼(exoskeleton, Exo)、经颅电刺激(transcranial electric/magnetic stimulation, TE/DS)等外设技术的产生与发展^[23-25],人们对智能机器人的需求逐渐增加,BCI机器人的概念也应运而生,其应用范围也不再局限于临床康复与辅助,而是扩展到工业控制、军事航天、生活娱乐等诸多领域,进一步凸显了人-机智能交互的优越前景,不断为BCI技术领域乃至整个人工智能领域开辟全新格局^[26-27]。

2.1 基于BCI的神经康复与接口控制应用

在神经康复或辅助医学领域,BCI机器人可以帮助肢体运动障碍患者提高生活质量。如:1) 信息交流,BCI机器人可以帮助残疾人使用电子计算机、拨打电话等;2) 环境控制,BCI机器人可以帮助残疾人或老年人

驾驶轮椅、操控家用电器等;3) 康复护理,BCI康复机器人可以帮助失去运动能力的残疾人或体弱病患、老年人进行主动康复训练,BCI护理机器人可以从事基本护理工作,提高被护理人的生活质量。

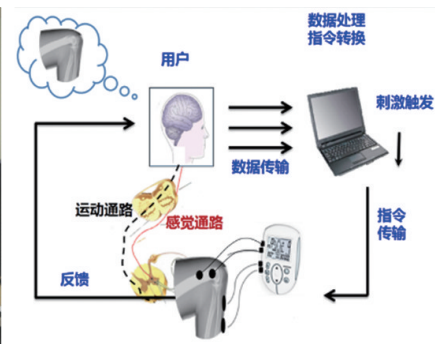
另外,BCI在脑部外伤、肢体残疾、神经系统疾病等患者的康复和功能重建中也发挥着重要作用。如:奥地利Graz科技大学应用BCI控制电刺激帮助手部瘫痪病人完成了日常生活中最基本的抓杯、举杯、倒水入口的连续动作,被认为是BCI应用于助残事业的里程碑事件;在2014年巴西世界杯足球赛开幕式上,一名腰部以下完全瘫痪的少年通过BCI控制下肢外骨骼完成了开球表演,一时轰动全世界,这得益于长期的虚拟训练与外骨骼技术的发展^[28];天津大学神经工程团队于2014年研制成功首台适用于全肢体中风康复的人工神经机器人系统——“神工一号”,该系统融合了运动想象BCI和物理训练康复疗法,在中风患者体外仿生构筑了一条人工神经通路,经过模拟解码患者的运动康复意念信息,进而驱动多级神经肌肉电刺激技术产生对应动作,在运动康复训练的同时,促进患者受损脑区功能恢复以及体内神经通路的可塑性修复和重建(图4)^[15,19]。



(a) 巴西世界杯瘫痪少年开球



(b) “神工一号”系列康复机器人应用



(c) “神工一号”系统原理示意

图4 BCI神经康复与接口应用

Fig. 4 Neural rehabilitation and interface application of BCI

因此,BCI在医学康复领域的应用已经逐步兴起,除了能帮助具有严重功能障碍的患者建立与外界的交流通道,还可将康复训练中很多的被动运动转换成患者的主动运动,进一步提高患者的主观能动性,从而提高康复效果,克服了传统康复手段被动单一介导的缺陷。BCI让患者通过自己的思想控制外界设备进行训练,这样不仅能够提高患者的主动性,还可在患者受损的中枢神经中形成反馈,刺激脑的重塑或代偿,从而提

高康复疗效。随着VR技术的普及,患者可在更加接近现实的环境中产生质量更高的大脑信息,进而提高BCI的性能。并且诸多学者基于BCI技术研发出视觉、听觉神经假体恢复病人视听觉神经功能,帮助意识障碍人群恢复原有意识状态,治疗自闭症、多动症、抑郁症等疾病人群等。

2.2 基于BCI的航天、军事、生活娱乐等应用

当然,BCI机器人的用途决不仅仅限于康复医学,

在其他诸多领域也已得到广泛应用^[29-31]。

1) 特殊环境作业。BCI 特种机器人可以在危险或不适宜人工操作的环境中(航空航天等领域)有巨大的应用价值,能够为航天员等特殊人群提供肢体约束环境下的“第三只手”和神经功能层面融合的自适应自动化人机协作,帮助他们完成更多更复杂的工作任务。如,2016 年在天宫二号空间实验室与神舟十一号飞船交汇任务中,天津大学神经工程团队开发了航天员脑力负荷等神经工效测试技术及装置,并在天宫二号空间站试验任务中实现初步应用,成功完成人类在轨史上首次脑机交互实验,为中国载人航天工程的新一代医学与人因保障系统提供了关键技术支撑(图 5)。

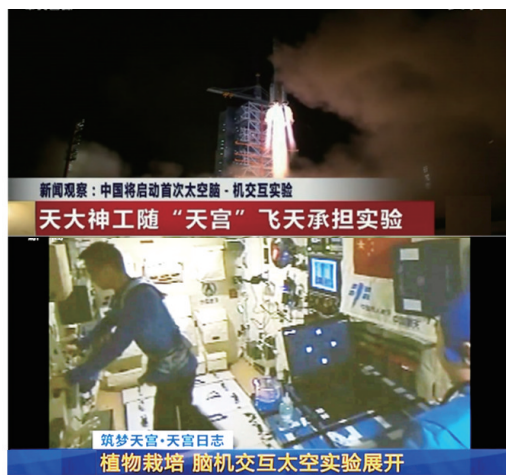


图 5 首次在轨脑机交互实验

Fig. 5 First on-orbit brain computer interaction experiment

2) 特殊领域及前沿技术开发。BCI 机器人有望实现无人驾驶或脑控操作的梦想,这不仅在军事领域意义重大,同时将为全人类开辟更广阔的活动空间。如,美国佛罗里达大学研发的脑控无人机技术也为相关电子竞技行业增添了全新的竞技概念;而 Facebook 和 Neuralink 公司的未来发展规划均充满了基于 BCI 的脑控操作幻想。

3) 为电子游戏增加新的娱乐功能。用“思想”控制电子游戏是传统鼠标、键盘控制电子游戏的有益补充,会显著增加游戏的娱乐效应。脑机接口机器人是智能机器人的更新换代,有效的人机交互方式会极大提高机器人的智能化与灵活性。如 Neurosky 公司用其智能脑控式嵌入芯片推出的 Star Wars Force Trainer 玩具,是成功的 BCI 营销案例,此后还推出了智能脑电玩具 Mindflex、情绪猫耳 Nekomimi 等。

以上这些范例真正实现了 BCI 技术作为人类“第三只手”的功能,体现其在各个领域辅助控制方面的诸多应用可能,预示未来将会有更多人性化、实用化、安全化的 BCI 应用成果步入人们的日常生活工作之中^[32-36]。

3 未来发展趋势

BCI 将在近中期主要围绕解决其现有技术瓶颈和提高解码信息维度两个方向发展,而长远发展趋势则是从目前脑机单向“接口”进化为脑机双向“交互”并最终“智能”融合。

近中期需攻克刺激范式依赖性难题,摆脱现有强视听觉刺激调制弊端(被动式、易疲劳),改用感觉意念(主动式、自然放松)、多模态(肌电、心率、血氧等多生理信号组合)诱发范式实现高准确性、大指令集、快速无创的 BCI 技术;提高解码信息维度,即从现有低维度离散信息(一维或二维视听)解码扩展至更复杂(多组分、高维度)、更自然交互所需信息(视图、记忆、语言等高级思维)解码的 BCI 技术。除努力改进无创脑电信号采集、处理技术之外,植入式 BCI(将检测电极埋入大脑皮层组织内)因其所得皮层脑电信源优质而将是一个重要发展方向,有赖于植入电极关键技术取得突破性改进提高^[37-39]。

从长远发展来看,现有 BCI 技术主要是单向解读大脑信息,尚难以顾及将来必须建立起人脑智能与人工智能、生物智能与机器智能之间有机交互融合的最终目标。因此,BCI 技术最重要的长远发展趋势将是从目前脑→机单向“接口”(interface)进化为脑↔机双向“交互”(interaction)并最终实现脑机完全“智能”融合(intelligence)(图 6),将生物智能的模糊决策、纠错和快速学

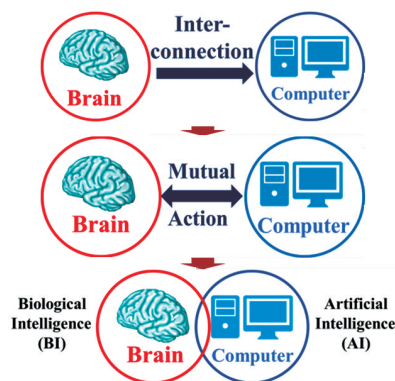


图 6 脑机智能的发展趋势

Fig. 6 Development trend of the brain computer intelligence

习能力与人工智能的快速、高精度计算及大规模、快速、准确的记忆与检索能力结合,从而发展出更先进的人工智能技术,并组建由人脑与人脑及与智能机器之间交互连接构成的新型生物人工智能网络,必将彻底改变现有人类与智能机器之间的关系,为人类创造出前所未有的智能信息时代新生活^[40-41]。

4 结论

尽管目前脑机接口技术水平尚处于发育成长期,但作为人机交互的新生一代,确信其未来发展潜力无限。21世纪是脑科学的时代,世界主要科技强国均启动了目标宏大的“脑计划”,脑机接口技术将伴随脑科学的发展而成长壮大,相信未来BCI将成为新一代颠覆性信息技术,成为融合人脑智能和人工智能不可分割与替代的坚固桥梁。作为一种构建人脑与外界直接信息交互联系的新技术,脑机接口正在向与人们生活息息相关的众多方面拓展其应用领域,如智能医疗、智能家居、智能娱乐等近年来均出现了非常有创新意义的研究开发。随着这些技术的不断进步,可以预见未来BCI将如现在的鼠标、键盘一样非常普遍地应用于各种需要人机交互的日常生活与工作场合。

参考文献(References)

- [1] 唐孝威. 脑科学导论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
Tang Xiaowei. Introduction to brain science[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [2] Poo M M, Du J L, Ip N Y, et al. China Brain Project: Basic neuroscience, brain diseases, and brain-inspired computing[J]. *Neuron*, 2016, 92(3): 591-596.
- [3] Wolpaw J R, Birbaumer N, McFarland D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2002, 113(6): 767-791.
- [4] Wolpaw J R, Birbaumer N, Heetderks W J, et al. Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting[J]. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 2000, 8(2): 164-173.
- [5] Wolpaw J, Wolpaw E W. Brain-computer interfaces: Principles and practice[M]. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- [6] Müller-Putz G R, Daly I, Kaiser V. Motor imagery-induced EEG patterns in individuals with spinal cord injury and their impact on brain-computer interface accuracy[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 035011.
- [7] Mainsah B O, Collins L M, Colwell K A, et al. Increasing BCI communication rates with dynamic stopping towards more practical use: An ALS study[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2015, 12(1): 016013.
- [8] Höhne J, Holz E, Staiger-Sälzer P, et al. Motor imagery for severely motor-impaired patients: Evidence for brain-computer interfacing as superior control solution[J]. *PLoS One*, 2014, 9: e104854-e104854.
- [9] Burns A, Adeli H, Buford J A. Brain-computer interface after nervous system injury[J]. *Neuroscientist*, 2014, 20(6): 639-651.
- [10] Thompson D E, Quitadamo L R, Mainardi L, et al. Performance measurement for brain-computer or brain-machine interfaces: A tutorial [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 035001.
- [11] Cecotti H. Spelling with non-invasive Brain-computer interfaces-current and future trends[J]. *Journal of Physiology-Paris*, 2011, 105(1): 106-114.
- [12] Kaiser V, Kreilinger A, Müller-Putz G R, et al. First steps toward a motor imagery based stroke BCI: New strategy to set up a classifier[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2011, 5: 86.
- [13] Tangwiriyasakul C, Mocioiu V, Van Putten M J, et al. Classification of motor imagery performance in acute stroke[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 036001.
- [14] Nicolas-Alonso L F, Corralejo R, Gomez-Pilar J, et al. Adaptive stacked generalization for multiclass motor imagery-based brain computer interfaces[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2015, 23(4): 702-712.
- [15] 明东, 王坤, 何峰, 等. 想象动作诱发生理信息检测及其应用研究: 回顾与展望[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(9): 1921-1931.
Ming Dong, Wang Kun, He Feng, et al. Study on physiological information detection and application evoked by motor imagery: Review and prospect[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(9): 1921-1931.
- [16] Mccane L M, Heckman S M, Mcfarland D J, et al. P300-based brain-computer interface (BCI) event-related potentials (ERPs): People with amyotrophic lateral sclerosis (ALS) vs. age-matched controls[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2015, 126(11): 2124-2131.
- [17] Xu M, Chen L, Zhang L, et al. A visual parallel-BCI speller based on the time-frequency coding strategy[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(2): 026014.
- [18] Chen X, Wang Y, Nakanishi M, et al. High-speed spelling with a noninvasive brain-computer interface[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(44): E6058-E6067.
- [19] Yi W, Shuang Q, Qi H, et al. EEG feature comparison and

- classification of simple and compound limb motor imagery[J]. *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation*, 2013, 10(8): 541–544.
- [20] Simon N, Käthner I, Ruf C A, et al. An auditory multiclass brain–computer interface with natural stimuli: Usability evaluation with healthy participants and a motor impaired end user [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, 8(1039): 1039.
- [21] Kaufmann T, Herweg A, Kübler A. Toward brain–computer interface based wheelchair control utilizing tactually–evoked event–related potentials[J]. *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation*, 2014, 11(1): 7.
- [22] Elnady A M, Zhang X, Xiao Z G, et al. A single–session preliminary evaluation of an affordable BCI–controlled arm exoskeleton and motor–proprioception platform[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, 9: 168.
- [23] Sczesny–Kaiser M, Höffken O, Aach M, et al. HAL® exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2015, 12(1): 68–78.
- [24] Van Asseldonk E H, Boonstra T A. Transcranial direct current stimulation of the leg motor cortex enhances coordinated motor output during walking with a large inter–individual variability[J]. *Brain Stimulation*, 2015, 9(2): 182–190.
- [25] Torres J, Drebing D, Hamilton R. TMS and tDCS in post–stroke aphasia: Integrating novel treatment approaches with mechanisms of plasticity[J]. *Restorative Neurology & Neuroscience*, 2013, 31(4): 501–515.
- [26] Chen L, Wang Z, He F, et al. An online hybrid brain–computer interface combining multiple physiological signals for webpage browse[C]//Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE. Piscataway NJ: IEEE, 2015: 1152–1155.
- [27] Throckmorton C S, Colwell K A, Ryan D B, et al. Bayesian approach to dynamically controlling data collection in P300 spellers[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2013, 21(3): 508–517.
- [28] Smith S. Mind–controlled exoskeleton kicks off world cup[J]. *New Scientist*, 2014, 6(13): 2973.
- [29] Xu M, Qi H, Wan B, et al. A hybrid BCI speller paradigm combining P300 potential and the SSVEP blocking feature[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2013, 10(2): 026001.
- [30] Rupp R. Challenges in clinical applications of brain computer interfaces in individuals with spinal cord injury[J]. *Frontiers in Neuroengineering*, 2014, 7(7): 38.
- [31] Kindermans P J, Tangermann M, Müller K R, et al. Integrating dynamic stopping, transfer learning and language models in an adaptive zero–training ERP speller[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 035005.
- [32] Cantillo–Negrete J, Gutierrez–Martinez J, Carino–Escobar R I, et al. An approach to improve the performance of subject–independent BCIs–based on motor imagery allocating subjects by gender[J]. *Biomedical Engineering Online*, 2014, 13(1): 158.
- [33] Woehrle H, Krell M M, Straube S, et al. An adaptive spatial filter for user–independent single trial detection of event–related potentials[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, 62: 1696–1705.
- [34] Bryan M J, Martin S A, Cheung W, et al. Probabilistic co–adaptive brain–computer interfacing[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2013, 10(6): 066008.
- [35] Kee C Y, Chetty R M K, Khoo B H, et al. Genetic algorithm and bayesian linear discriminant analysis based channel selection method for P300 BCI[J]. *Communications in Computer & Information Science*, 2012, 330: 226–235.
- [36] Huggins J E, Wolpaw J R. Papers from the fifth international brain–computer interface meeting[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 030301–1–2.
- [37] Pfurtscheller G, Neuper C, Müller G R, et al. Graz–BCI: State of the art and clinical applications[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering*, 2003, 11(2): 177–180.
- [38] Im H, Ku J, Kim H J, et al. Virtual reality–guided motor imagery increases corticomotor excitability in healthy volunteers and stroke patients[J]. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 2016, 40(3): 420–431.
- [39] Kaplan A, Shishkin S, Ganin I, et al. Adapting the P300–based brain–computer interface for gaming: A review[J]. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2013, 5(2): 141–149.
- [40] Miralles F, Vargiu E, Dauwalder S, et al. Brain computer interface on track to home[J]. *Scientific World Journal*, 2015, doi: 10.1155/2015/623896.
- [41] Holz E M, Botrel L, Kaufmann T, et al. Long–term independent brain–computer interface home use improves quality of life of a patient in the locked–in state: A case study[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2015, 96(3): S16–S26.

Neural rehabilitation and new application of brain-computer interface technology

MING Dong^{1,2}, AN Xingwei¹, WANG Zhongpeng², WAN Baikun^{1,2}

1. Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China

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

Abstract As a new interactive combination technique of the brain cognitive neuroscience and engineering technology, the brain computer interfaces serve the connection between the human and the outer devices without the contact of the limb or neuromuscular system, and turn what is in the mind to real actions. BCIs are a new "window" of the brain science research, the brain cognitive mechanism and the intelligent human computer interaction application development. This paper reviews the research background, the research status and the future development trend of the BCIs technology.

Keywords brain computer interface; artificial intelligence; neural rehabilitation; new application ●



(责任编辑 刘志远)