

神经义肢技术在脊髓损伤患者康复中的应用进展

公维军

【摘要】 神经义肢技术基于脑机接口,通过分析脑电信号获得控制命令直接作用于肌肉系统或外部设备,从而代偿脑-脊髓-肌肉传出通路,恢复脊髓损伤患者运动功能。该项技术涉及脑科学、认知科学、生物医学工程、信息与通信工程、控制科学与工程等多学科。本文拟对近年来神经义肢技术在脊髓损伤患者康复中的应用进展进行概述。

【关键词】 神经义肢(非 MeSH 词); 脊髓损伤; 康复; 综述

Application progress of neural prosthesis in rehabilitation of patients with spinal cord injury

GONG Wei-jun

Neurological Disease Rehabilitation Center, Beijing Rehabilitation Hospital, Capital Medical University, Beijing 100144, China (Email: gwj1971@163.com)

【Abstract】 Neural prosthesis is based on brain-computer interface (BCI), which directly acts on the muscle system or an external device by analyzing EEG control commands, so as to compensate the efferent pathway of brain-spinal cord-muscle and recover motor function of patients with spinal cord injury. The technology involves comprehensive research of multiple disciplines such as brain science, cognitive neuroscience, biomedical engineering, information and communication engineering, control science and engineering. This paper reviews recent advances of neural prosthesis in the rehabilitation treatment of patients with spinal cord injury.

【Key words】 Neural prosthesis (not in MeSH); Spinal cord injuries; Rehabilitation; Review

脊髓损伤(SCI)发生率呈逐年增高趋势。脊髓损伤是脊柱损伤最严重的并发症,系指各种原因引起的脊髓结构和功能损害,导致损伤平面以下运动、感觉和自主神经功能障碍^[1]。胸髓以下损伤致躯干、下肢和盆腔脏器功能障碍而未累及上肢的截瘫患者,可以借助轮椅、截瘫专用辅助器具实现转移、站立和行走等日常生活和活动,功能恢复和代偿较好^[2];颈髓损伤致上肢运动障碍患者,功能恢复较差,无法行走,且大部分患者明显依赖他人,严重影响生活质量^[3],可以通过神经义肢技术恢复和代偿上肢运动功能。脊髓损伤修复迄今仍是医学难题,如何规避损伤的脊髓传递神经信号即成为研究焦点。近年来,随着脑科学、认知科学、信号处理技术的不断发展,国内外学者对神经义肢技术进行深

入研究。神经义肢技术主要基于脑机接口(BCI),通过采集和分析脑电信号获得控制命令直接作用于肌肉系统或外部设备,代偿传统脑-脊髓-肌肉传出通路,重塑脊髓损伤患者运动功能^[4],该项技术可以有效帮助脊髓损伤患者进行康复治疗和功能重塑。本文拟对近年来神经义肢技术在脊髓损伤患者康复治疗中的应用进展进行简要概述。

一、脑机接口技术

基于脑机接口的神经义肢技术不依赖正常的神经传导通路,通过记录和分析脑电信号[分为有创式和无创式,有创式将微电极植入大脑皮质以获取皮质脑电图(ECoG),无创式则直接从头皮表面获取头皮脑电图],将采集到的生物电信号转化为控制命令直接对肌肉系统或外部设备进行控制^[5]。典型的脑机接口系统包括四部分,分别为信号采集、处理单元、外部设备和反馈部分^[6]。通常采用功率谱分析等信号处理方法提取脑电信号特征,以及人工神经网络等模式识别方法进行分类,最终获得命

doi: 10.3969/j.issn.1672-6731.2017.06.002

作者单位: 100144 首都医科大学附属北京康复医院神经疾病康复中心, Email: gwj1971@163.com

令编码并传输至外部设备以完成控制作用^[5]。目前基于脑机接口的外部设备控制系统应用广泛,且有较高的信息传输率和准确性。

二、脑机接口在康复工程领域的应用

基于脑机接口的康复技术包括以下几方面:(1)通过脑机接口直接与外部设备进行通讯,如控制智能轮椅进行移动^[7]、控制家居设备开关^[8]、控制电脑屏幕上光标移动^[9]等。(2)对于肢体完好但神经传导通路阻断的患者通过脑机接口控制肢体肌肉,如控制神经义肢手实现抓握等动作^[10]、完成日常生活基本动作、实现瘫痪患者运动功能代偿^[11]等。此外,从康复角度看,基于脑机接口的康复设备也在临床广泛应用,用于多种疾病的运动功能康复,如偏瘫、截瘫、脑瘫和截肢,可以通过人机交互在虚拟现实(VR)情景中基于脑机接口的反馈系统进行下肢运动功能康复训练^[12]。对于脑卒中患者,康复训练可以促进神经功能重塑,减轻残疾,提高生活质量^[13];对于脊髓损伤患者,神经修复极为困难,通过脑机接口技术实现运动功能代偿即成为重要治疗方法。

三、神经义肢技术在脊髓损伤患者康复中的应用

通过脑机接口技术可以实现脊髓损伤患者对机械臂、下肢外骨骼矫形器、步行支具等辅助运动设备和自身失神经支配肌肉的控制,代偿上肢和下肢运动功能,提高生活自理能力。目前基于脑机接口应用于脊髓损伤患者的治疗方法主要有两种,一种是脑机接口控制康复机器人技术,另一种是脑机接口控制失神经肌肉技术^[11,14-15]。

1. 脑机接口控制康复机器人技术 康复机器人主要分为康复训练机器人和辅助型康复机器人两种类型,康复训练机器人主要帮助患者完成各种训练,辅助型康复机器人主要帮助患者完成各种肢体动作。控制康复机器人以帮助脊髓损伤患者进行康复训练或功能代偿,是脑机接口技术的重要应用。一方面,使用自动辅助型康复机器人进行康复治疗,可以减轻康复治疗师工作负担,提高工作效率;另一方面,自主控制康复机器人进行康复训练可以使患者主动参与,取得更好疗效^[16]。孟宪鹏^[17]采用事件相关电位(ERP)P300和运动想象控制多关节(腕、肘、肩、腰关节)机械臂,经过一定训练的患者可以较好地控制机械臂完成各种动作和任务。任宇鹏等^[18]通过脑机接口机械手闭环控制系

统实现机械手握水杯、倒水、将水杯放回原处和机械手复位等动作,可以为多自由度假肢、外骨骼矫形器、护理机器人等运动辅助器提供新的技术和思路。Yahud和Osman^[19]研发了基于脑机接口并拥有16个自由度的机械手,可以完成圆柱体抓取、钥匙捏取、两手指夹取纸片、三手指夹取鸡蛋等动作,但该系统也存在缺陷,如信号处理速度、识别率和控制精确率不高,干扰现象严重,且患者需经过严格训练。对于脊髓损伤部位较高导致上肢功能障碍的患者,脑机接口有助于通过稳态视觉诱发电位(SSVEP)或自发性运动想象结合 α 波以自主控制光标移动和单击实现网页浏览^[9],并能够控制文字输入^[20],通过P300^[21]、稳态视觉诱发电位^[22]、闭眼放松^[23]或双手运动想象^[24],实现对智能轮椅的控制,其优点是不通过肢体动作即可实现对轮椅运动方向的控制,适用于功能障碍严重的脊髓损伤患者,且成本较低、实用性较强^[5],然而,P300需要必要的外部装置以刺激视觉,故实时性较差,同时易给受试者带来视觉疲劳;基于稳态视觉诱发电位的智能轮椅也同样存在刺激目标数目少、刺激时间长、易诱发疲劳和癫痫发作等缺点,从而导致系统稳定性较差、信息传输率较低,影响患者对外部真实环境做出正确判断;基于运动想象的智能轮椅虽然能够克服视觉长时间刺激的影响,但在特征提取和信号识别率、信号处理效率方面尚待进一步提高。对于不完全性高位脊髓损伤患者,残留部分腕关节功能,可以采用具有辅助功能的操纵杆控制轮椅或应用基于手势识别控制^[25]和表面肌电控制^[26]等脑机接口的智能轮椅,最大限度利用患者残留功能,在时效性和识别率方面较脑机接口更高。目前,康复机器人仍存在较多问题,主要集中于机构设计,控制精度和速度,机械设备灵巧性、响应性和实用性等方面,且缺乏客观评价体系,尚待进一步研究。

2. 脑机接口控制失神经肌肉技术 功能性电刺激术(FES)在脊髓损伤患者的康复中业已得到广泛应用^[27],但该项技术主要是局部刺激患者末端神经,不能根据患者主观运动意愿活动,基于脑机接口-功能性电刺激(BCI-FES)技术系指在脑与失神经肌肉之间建立直接联系,不依赖脑-外周神经-肌肉这一正常神经传导通路^[28],同时能够克服单纯功能性电刺激适应性差、难以控制等不足,从而达到理想康复治疗效果。Vidaurre等^[14]采用无创式运动想象联合脑机接口,通过功能性电刺激使健康成年人

模拟并控制上肢活动,首次证实脑机接口-功能性电刺激线性实时控制的可行性,准确率达(82.50±3.16)%。Vuckovic等^[15]首次将脑机接口-功能性电刺激用于2例颈髓(C₅)损伤致四肢瘫患者,使其实现手的张开和闭合,准确率达83.5%和83.8%。Bouton等^[11]将这种技术称为神经旁路系统(NBS),并将微电极植入颈髓(C₅₋₆)损伤患者大脑运动皮质内部,手臂穿戴定制的装有130个电极的柔性前臂套筒,可以实现根据患者意识实时做出动作,如抓握、握住水杯移动、倒水、捏住勺子并搅拌等,经过15个月的康复训练,相当于C₇~T₁损伤患者的运动功能,显著改善日常生活活动能力。Rohm等^[29]基于脑机接口设计一款混合功能性电刺激的上肢外动力矫形器,并成功用于C₄完全性损伤患者,通过运动想象联合脑机接口-功能性电刺激完成物品抓握、释放、移动,借助脑机接口控制的上肢外动力矫形器完成肘关节屈伸动作,以及文件签署、吃冰激凌和饼干等日常生活和活动。周鹏等^[30]研发一种可供瘫痪患者根据自身运动意愿控制其残肢运动的智能康复系统,该系统采集并分析患者左右手运动想象动作电位信号,以95%以上正确率分析运动意愿,控制功能性电刺激仪完成手掌伸展、四肢弯曲同时拇指伸展、弯曲拇指侧捏等动作。手部运动功能的重建对于脊髓损伤致瘫痪患者,特别是C₅或C₆损伤患者具有重要意义,能够使其恢复基本日常生活活动能力,促进瘫痪肢体运动功能康复。Osuagwu等^[31]将脑机接口-功能性电刺激与传统功能性电刺激比较,12例亚急性期四肢瘫患者分为两组,测量患者尝试运动时尺神经和正中神经事件相关电位、体感诱发电位(SEP)、腕关节和指间关节活动度,结果显示,脑机接口-功能性电刺激更有利于脊髓损伤患者神经修复和肌力恢复,建议将该项技术用于脊髓损伤患者的康复治疗。Do等^[32]首次证实,将脑机接口-功能性电刺激用于下肢功能重塑是可行的,利用脑电信号成功驱动健康人胫前肌收缩,实现足背屈动作,然而该项技术尚存在诸多局限性,例如,所使用的脑电信号是一条腿运动引起的脑电变化,通过控制功能性电刺激系统,实现另一条腿(胫前肌)运动,对偏瘫患者具有重要意义。姚林等^[33]采用基于稳态视觉诱发电位的脑机接口技术对2位健康受试者进行脑机接口-功能性电刺激控制小腿摆动与行走试验,实现对5种运动意愿的识别以及小腿摆动和行走,但仍存在一些问题,

例如,驱动下肢运动所需的电刺激强度较大,可能产生轻微疼痛;行走过程中受试者难以全神贯注地注视电脑屏幕中的刺激信号,识别率低于70%,尚待进一步改善。King等^[34]首次证实基于运动想象的脑机接口-功能性电刺激用于胸髓(T₆)损伤患者的可行性,嘱患者先在跑步机悬吊支撑和外骨骼矫形器辅助下于虚拟现实环境中训练19周,训练完成后可在助行器辅助下独立行走3.66米。

四、展望

随着神经义肢技术和脑机接口技术的迅速崛起以及临床试验的成功,神经义肢技术、脑机接口技术已经成为神经科学和神经工程研究的重要分支,在临床工作中将会有更广泛的应用^[35]。目前已有许多国内外研究团队正在进行基于脑机接口技术的机械臂应用于上肢运动功能重塑的研究,可能由于控制下肢行走的大脑皮质位置较深、脑电信号较弱,而且,轮椅、截瘫矫形器作为瘫痪患者广泛应用的稳定可靠的移动、步行工具,均在一定程度上限制脑机接口-功能性电刺激在下肢运动功能康复中的研究。目前已有较多基于脑机接口控制外部设备的系统研究,但采用脑机接口-功能性电刺激控制脊髓损伤患者的失神经肌肉以恢复其运动功能方面,尚待进一步深入研究。相信随着脑机接口精度和速度的不断提高以及相关学科和技术的不断发展与完善,脊髓损伤患者运动功能康复的实现指日可待。

参 考 文 献

- [1] Lei DQ, Zhao HY, Liu RE, Deng XL. Progress in treatment of spinal cord injury. Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi, 2008, 8:71-74.[雷德强,赵洪洋,刘如恩,邓兴力.脊髓损伤的治疗进展.中国现代神经疾病杂志,2008,8:71-74.]
- [2] Jiang JL. Treatment of spinal cord injury. Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi, 2004, 4:280-281.[姜金利.脊髓损伤的治疗.中国现代神经疾病杂志,2004,4:280-281.]
- [3] Feng YP. Early treatment of spinal cord injury. Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi, 2016, 16:118-122.[封亚平.脊髓损伤早期处理.中国现代神经疾病杂志,2016,16:118-122.]
- [4] Wang W, Collinger JL, Perez MA, Tyler-Kabara EC, Cohen LG, Birbaumer N, Brose SW, Schwartz AB, Boninger ML, Weber DJ. Neural interface technology for rehabilitation: exploiting and promoting neuroplasticity. Phys Med Rehabil Clin N Am, 2010, 21:157-178.
- [5] Abdulkader SN, Atia A, Mostafa MM. Brain computer interfacing: applications and challenges. Egypt Inf J, 2015, 16: 213-230.
- [6] Schwartz AB, Cui XT, Weber DJ, Moran DW. Brain-controlled interfaces: movement restoration with neural prosthetics. Neuron, 2006, 52:205-220.
- [7] Chen ZC, Pang XY, Sun TL, Li HZ, Yu S, Yin SM. Intelligent

- wheelchair control system. *Dian Zi Ji Shu Ying Yong*, 2014, 40: 126-129.[陈真诚, 庞雪燕, 孙统雷, 李宏周, 喻双, 殷世民. 脑控智能轮椅控制系统. 电子技术应用, 2014, 40:126-129.]
- [8] Xing X. Research on the control system of smart home based on portable brain computer interface. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2014.[邢潇. 基于便携式脑-机接口的智能家电控制系统研究. 天津: 天津职业技术师范大学, 2014.]
- [9] Dong YL. Brain-computer interface of website browsing system based on EEG signals. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2014.[董燕丽. 基于脑电信号的网页浏览脑-机接口系统. 天津: 天津职业技术师范大学, 2014.]
- [10] Li YN, Zhang XD, Wang YX. Development of a control system of neural prosthesis hand driven by BCI. *Zhongguo Yi Liao She Bei*, 2011, 26:5-8.[李耀楠, 张小栋, 王云霞. 脑-机接口驱动神经义肢手系统的研究. 中国医疗设备, 2011, 26:5-8.]
- [11] Bouton CE, Shaikhouni A, Annetta NV, Bockbrader MA, Friedenber DA, Nielson DM, Sharma G, Sederberg PB, Glenn BC, Mysiw WJ, Morgan AG, Deogaonkar M, Rezaei AR. Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia. *Nature*, 2016, 533:247-250.
- [12] Ma Y, Wang YJ, Gao XR, Gao SK. Virtual reality rehabilitation training platform based on brain computer interface (BCI). *Zhongguo Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Bao*, 2007, 26: 373-378.[马贇, 王毅军, 高小榕, 高上凯. 基于脑-机接口技术的虚拟现实康复训练平台. 中国生物医学工程学报, 2007, 26: 373-378.]
- [13] Daly JJ, Wolpaw JR. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *Lancet Neurol*, 2008, 7:1032-1043.
- [14] Vidaurre C, Klauer C, Schauer T, Ramos - Murguialday A, Müller KR. EEG-based BCI for the linear control of an upper-limb neuroprosthesis. *Med Eng Phys*, 2016, 38:1195-1204.
- [15] Vuckovic A, Wallace L, Allan DB. Hybrid brain - computer interface and functional electrical stimulation for sensorimotor training in participants with tetraplegia: a proof - of - concept study. *J Neurol Phys Ther*, 2015, 39:3-14.
- [16] Cheng M, Ren YP, Gao XR, Wang GZ, Ji LH, Gao SK. A rehabilitation robot control technique based on brain-computer interface (BCI). *Ji Qi Ren Ji Shu Yu Ying Yong*, 2003, 4:45-48.[程明, 任宇鹏, 高小榕, 王广志, 季林红, 高上凯. 脑电信号控制康复机器人的关键技术. 机器人技术与应用, 2003, 4:45-48.]
- [17] Meng XP. An exploration of brain-computer control method of multi-joint robot arm. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.[孟宪鹏. 多关节机械臂的脑机控制方法探索. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.]
- [18] Ren YP, Wang GZ, Cheng M, Gao XR, Ji LH. The control on the artificial limb based on brain-computer interface. *Zhongguo Kang Fu Yi Xue Za Zhi*, 2004, 19:330-333.[任宇鹏, 王广志, 程明, 高小榕, 季林红. 基于脑-机接口的康复辅助机械手控制. 中国康复医学杂志, 2004, 19:330-333.]
- [19] Yahud S, Osman NA. Prosthetic hand for the brain-computer interface system. *IFMBE Proceedings*, 2007, 15:643-646.
- [20] Farwell LA, Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event - related brain potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1988, 70:510-523.
- [21] Liu Y. The research of technology of multi-pattern recognition on signal of brain - computer interface. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2015.[刘杨. 脑机接口信号的多模式识别融合技术研究. 重庆: 重庆理工大学, 2015.]
- [22] Xu GH, Zhang F, Wang J, Xie J, Li YP, Zhang SC. Research on key technology on time series combination coding-based high-frequency SSVEP in intelligent wheelchair BCI navigation. *Ji Xie Gong Cheng Xue Bao*, 2013, 49:21-29.[徐光华, 张锋, 王晶, 谢俊, 李叶平, 张四聪. 面向智能轮椅脑机导航的高频组合编码稳态视觉诱发电位技术研究. 机械工程学报, 2013, 49:21-29.]
- [23] Zhou GS. EEG power wheelchair control method of multiple motion based on combination of imagination. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.[周光省. 基于多种运动想象组合的脑电控制电动轮椅方法研究. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.]
- [24] Huang XY. The research and FPGA implementation of brain-computer interface technology of intelligent wheelchair. Quanzhou: Huaqiao University, 2014.[黄学业. 智能轮椅中脑-机接口技术的研究及FPGA实现. 泉州: 华侨大学, 2014.]
- [25] Luo Y, Xie Y, Zhang Y. Design and implementation of a gesture-driven system for intelligent wheelchairs based on the Kinect sensor. *Ji Qi Ren*, 2012, 34:110-113.[罗元, 谢彧, 张毅. 基于Kinect传感器的智能轮椅手势控制系统的设计与实现. 机器人, 2012, 34:110-113.]
- [26] Li LW. SEMG signal action recognition of intelligent wheelchair man-machine interface. Jiaozuo: He'nan Polytechnic University, 2015.[李林伟. 智能轮椅人机接口中表面肌电信号动作识别. 焦作: 河南理工大学, 2015.]
- [27] Gorman PH, Wuolle KS, Peckham PH, Heydrick D. Patient selection for an upper extremity neuroprosthesis in tetraplegic individuals. *Spinal Cord*, 1997, 35:569-573.
- [28] McFarland DJ, Wolpaw JR. Brain - computer interfaces for communication and control. *Commun ACM*, 2011, 54:60-66.
- [29] Rohm M, Schneiders M, Müller C, Kreiling A, Kaiser V, Müller-Putz GR, Rupp R. Hybrid brain-computer interfaces and hybrid neuroprostheses for restoration of upper limb functions in individuals with high-level spinal cord injury. *Artif Intell Med*, 2013, 59:133-142.
- [30] Zhou P, Cao HB, Xiong Y, Ge JY, Zhang S, Wang MS. Design of intelligent rehabilitation system based on brain - computer interface. *Ji Suan Ji Gong Cheng Yu Ying Yong*, 2007, 43:1-4.[周鹏, 曹红宝, 熊屹, 葛家怡, 张爽, 王明时. 基于脑机接口的智能康复系统的设计. 计算机工程与应用, 2007, 43:1-4.]
- [31] Osuagwu BC, Wallace L, Fraser M, Vuckovic A. Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: a randomised pilot study. *J Neural Eng*, 2016, 13:E065002.
- [32] Do AH, Wang PT, King CE, Abiri A, Nenadic Z. Brain - computer interface controlled functional electrical stimulation system for ankle movement. *J Neuroeng Rehabil*, 2011, 26:49.
- [33] Yao L, Zhang DG, Wang Y. Study on brain-computer interface controlled functional electrical stimulation system for lower limbs. *Zhongguo Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Bao*, 2012, 31:690-696.[姚林, 张定国, 王颖. 脑机接口控制的下肢功能性电刺激系统研究. 中国生物医学工程学报, 2012, 31: 690-696.]
- [34] King CE, Wang PT, McCrimmon CM, Chou CC, Do AH, Nenadic Z. The feasibility of a brain - computer interface functional electrical stimulation system for the restoration of overground walking after paraplegia. *J Neuroeng Rehabil*, 2015, 24:80.
- [35] Huang MK, Wang GS, Zhang XQ, Wang YC. The role of 5-lipoxygenase in ischemic brain tissue and spinal cord injury and Alzheimer's disease. *Zhongguo Nao Xue Guan Bing Za Zhi*, 2016, 13:213-215.[黄茂葵, 汪根树, 张相强, 王跃春. 5-脂氧合酶在缺血脑组织和脑脊髓损伤及阿尔茨海默病中的作用. 中国脑血管病杂志, 2016, 13:213-215.]

(收稿日期:2017-03-24)