

脑机接口研究综述

刘珈汐, 高威

北京工业大学, 北京

收稿日期: 2022年10月27日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月27日

摘要

21世纪被称为“脑研究世纪”, 随着脑科学和认知科学的发展, 人脑和计算机的界限逐渐被打破, 新型智能设备——脑机接口出现。这是一种基于大脑神经活动的新型交流方式, 可实现人脑与计算机的直接交流。本文对脑机接口发展概况、当前技术研究进展和未来发展预测进行研究综述。

关键词

脑机接口, 侵入式脑机接口, 非侵入式脑机接口, 脑机双向交互

Review of Brain-Computer Interface Technology

Jiayi Liu, Wei Gao

Beijing University of Technology, Beijing

Received: Oct. 27th, 2022; accepted: Feb. 17th, 2023; published: Feb. 27th, 2023

Abstract

The 21st century is known as the “brain research century”. With the development of brain science and cognitive science, the boundary between human brain and computer is gradually broken, and a new type of intelligent device—brain-computer interface appears. This is a new way of communication based on the neural activity of the brain, which can realize the direct communication between the human brain and the computer. This paper summarizes the development of BCI, the current technology research progress and the future development forecast.

Keywords

Brain-Computer Interface, Invasive Brain-Computer Interface, Non-Invasive Brain-Computer Interface, Brain-Computer Interaction

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,人类不断探索和发现大脑的奥秘,并且试图通过脑电信号来了解大脑的活动规律。随着计算机技术、电子信息技术、心理学、通信处理技术等技术的发展,脑机接口技术BCI应运而生。该技术涉及的研究领域较为广泛,包括生物学、计算机、通信工程、临床医学以及教育领域等等。脑机接口技术在人脑和计算机之间搭建了一条直接沟通和交流的通道,颠覆了传统技术认知,真正实现人机的双向交互、协同作业,改变人类传统生活方式。

2. 脑机接口发展概况

脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)是美国教授 Jacques Vidal 在 1973 年最早提出[1]。他首次尝试利用脑电图在人脑和计算机之间进行交流,将脑机接口技术定义成是一项不依赖于正常的外周神经和肌肉组成的输出通路的通信系统。在当时,脑机接口的实验仅在灵长类动物身上开展,加之受到计算机技术和生物学技术发展的局限,脑机接口技术进展缓慢。1998年,布朗大学 John Donoghue 教授和所在团队利用电脑芯片和人脑连接,实现远程控制人脑[2]。进入 21 世纪以来,得益于脑科学、认知科学以及相关技术的飞速进步,脑机接口技术才能够实现跨越式发展。2000年, M. Nicolelis 已通过科学实验实现对灵长类动物的神经解码控制;2006~2017年间,施瓦茨和安德森等人研制了人类脑控假肢[3];2019年, E. F. Chang 提出了脑机接口生成语言,同年4月,美国加州大学旧金山分校广泛征集志愿者,将电极植入他们的大脑运动区,完成了解码脑电波、在大脑中直接合成语音等工作;2021年,科林格尔(J. L. Collinger)打造双向闭环脑机接口,谢诺伊(K. V. Shenoy)实现了意念手写。

目前,我国已在战略层面对脑机接口做出了规划与设想。2021年,“中国脑计划”申报指南正式公布,将“脑科学与类脑研究”列为科技创新 2030 重大项目的试点项目之一,还提出了“新型无创脑机接口技术”“柔性脑机接口”“面向运动和意识障碍康复的双向-闭环脑机接口”等相关重点项目。

3. 脑机接口研究进展

3.1. 信号处理

大脑由成千上亿个神经元构成,并且每个神经元之间都相互连接,刺激信号在神经元之间传递,最终形成神经冲动。在产生神经冲动的过程中,大脑神经系统的电磁活动会发生相应的变化,并体现出某种节律和空间分布的特征。因此可利用传感器采集并放大这些神经电生理信号,可以收集到头皮脑电信号、皮层脑电信号和局部场电位[4]。脑机接口技术正是通过采集脑电信号,并对其进行处理、特征提取和模式识别[5]一系列步骤来完成信号处理,破解大脑状态或意图,将处理后的信息编码并转化为具体指令,以此来控制外部设备应用,实现信息交流、运动辅助和功能恢复等,最终又将神经反馈信号传输给人脑,完成通信系统的闭环处理(见图 1)。

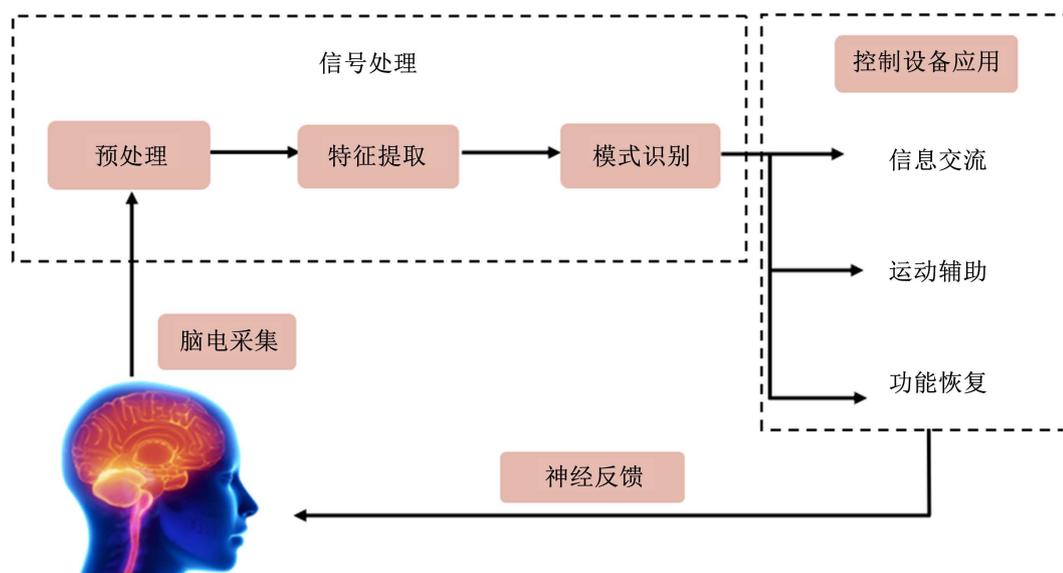


Figure 1. Brain-computer interface signal processing process

图 1. 脑机接口信号处理过程

3.2. 系统分类

3.2.1. 侵入式脑机接口

按照系统采集信号方式的不同, 脑机接口技术可分为侵入式脑机接口和非侵入式脑机接口。侵入式脑机接口需采用神经外科手术方法将微电极阵列植入大脑, 实时记录大脑神经群体活动信号, 从神经信号中解码出活动意图, 利用解码出的信号控制外设。目前, 侵入式脑机接口在多个方面都已取得突破性进展[6]。在国外, 匹兹堡大学的科学家已完成通过植入式脑机接口操控机械手产生多种不同手势, 来满足日常生活中可能需要的的基本抓取功能, 并通过安置在机械手上的传感器反馈接收到的微小电流刺激体感皮层, 以达到恢复高位截瘫患者手部触觉的目的, 进而实现脑机接口的闭环控制[7]。2019年, 马斯克的 Neuralink 公司发布一款可扩展的高带宽侵入式 BCI 系统[8], 通过微创小孔, 将超细线缝进大脑, 再通过微电极 Utah 阵列对大脑信号解码。在国内, 有关侵入式脑机接口的研究也取得了一定的进展。2020年, 浙江大学研究团队已利用 Utah 阵列电极实现了高位截瘫患者用意念控制机械臂完成握手、饮水和进食等动作[9]。2021年, 中科院上海微系统所的陶虎团队提出“免开颅微创植入式高通量柔性脑机接口”技术, 将一根超细线植入人脑[10]。2022年, 首都医科大学附属北京天坛医院研发出一种 BCI 柔性电极技术, 将仅有 2 微米的电极点组成的新型柔性电极放到大脑上, 不仅能精确地分辨出大脑的神经核团、皮层功能区等, 而且最大限度降低了患者的病死率, 提高安全系数[11]。

3.2.2. 非侵入式脑机接口

非侵入式脑机接口通过头皮穿戴设备从头部表面记录大脑活动, 无需手术和设备植入。比较具有代表性的技术有: 经颅直流电刺激、经颅磁刺激和经颅超声刺激, 这些经颅刺激手段较为安全, 减少脑部手术风险, 可用于治疗多种神经系统疾病, 更可用于探索双向脑机接口和脑脑接口系统[6]。目前, 基于脑电图(EEG)式的非侵入式脑机接口是各国关注的重点。它将电极阵列贴附于人脑头皮上, 运用精密仪表实现多路 EEG 信号的同时采集和分析, 广泛用于大脑信号监测[12]。通过 EEG, 基于非感觉运动节律侦测脑信号的相关研究取得了很大进展, 包括事件相关电位(ERP)、稳态视觉诱发电位(SSVEP)、听觉诱发电位(AEP)和稳态触觉诱发电位(SSSEP)等。其中 SSVEP 可为基于 EEG 的非侵入式 BCI 提供最高的信息

传输速度[13]。此外, 基于运动想象(MI)以及运动执行(ME)等感觉运动节律的脑机接口研究在疾病康复和机器人等辅助设备控制方面进展迅速, 常被用于脑卒中或四肢瘫痪患者的肢体功能和运动想象能力的康复训练之中[14], 当确认被试者有运动意图时, 脑机接口会驱动外部设备及时辅助肢体进行相应的运动训练, 这对于运动障碍患者的行动恢复具有重要意义。

3.2.3. 应用算法

脑机接口技术的应用算法也取得突破性进展。卡内基梅隆大学与合作研究团队利用低维神经流形的对齐, 开发了一种基于流形的神经信号稳定器, 以实现脑机接口信号的稳定输入, 以便在神经信号不稳定时依然能维持脑机接口性能的稳定[15]。斯坦福大学及合作研究团队提出一种时间约束的稀疏组空间模式(temporally constrained sparse group spatial patterns), 通过同时优化共空间模式中滤波器频带和时间窗长, 进一步提高想象运动脑机接口的性能[16]。清华大学研究团队发布了基于稳态视觉诱发电位的脑机接口的BETA数据集, 为个体水平的脑机接口性能评估梳理了信噪比与信息传输率的关系, 极大推动了解码算法的发展[17]。华中科技大学的研究团队提出一种新颖的流形嵌入知识迁移方法, 通过最小化源域和目标域之间的联合概率分布偏移来实现域自适应, 可同时处理一个或多个源域, 实现高效计算[18]。

4. 脑机接口发展预测

4.1. 发展脑机双向交互

脑机交互的信息按照交互方式可分为: “从脑到机”——将脑信号转换成意图运动指令和“从机到脑”——将从外部环境交互设备捕获到的感觉信息传递至大脑[19]。当前以后者“从机到脑”为主, 鲜有“从脑到机”的交互。近年来, 美国相继启动“革命性假肢”、“下一代非侵入性神经技术(N3)”等双向脑机接口计划[20], 并陆续进入临床应用。日前, 匹兹堡大学合作研究团队通过体感皮层内微电刺激来恢复触觉感知反馈, 使具有双向脑机接口的受试者在使用神经控制的假肢完成物体运输任务中的表现得到改善[21]。因此, 笔者认为在未来脑机接口的发展中, 脑机双向交互或成为研究焦点, 通过技术的发展实现脑机之间信息的实时交互和传输, 以真正达到人工智能的最高境界。

4.2. 临床医学的治疗

脑机接口在医疗领域的应用较为广泛, 可用于检查与诊断、运动康复和辅助性功能替代[22], 帮助脑卒中患者、肌肉萎缩、神经受损的患者实现功能恢复。近日, Neuralink公司宣布将开展人体试验, 若试验成功将大大降低精神和神经疾病的治疗难度, 为老年痴呆症、癫痫、自闭症、抑郁症等疾病的诊断治疗和康复打开一扇新大门。此外, 可通过脑机接口监测患者的焦虑情绪状态, 并适时提供有效干预训练, 有效改善焦虑情绪状态[23]。可见, 脑机接口在老年痴呆症、自闭症、抑郁症等精神障碍的治疗方面展现出广阔发展前景。

4.3. 智能设备的应用

随着人们需求的日趋多元化, 也更加希望通过智能化的设备来提高生活的便利程度。脑机接口作为一种新颖的人机交互方式, 在自动驾驶、疲劳检测、智能家居控制等领域都大有可为。通过脑机接口技术的进步, 有望改变传统的生活方式, 引领新的生活风尚。

5. 结语

脑机接口融合了计算机技术、生物学技术、通信处理技术以及心理学等相关知识, 成为当今一种新型的交流和控制方式, 实现由大脑控制外界设备, 在脑机双向交互、临床医学治疗和智能设备应用方面

都显示出广阔发展空间。但科技是把双刃剑, 脑机接口技术也引发了安全性与有效性、人格同一性与真实性、脑隐私保护、决策自主权和责任归属等伦理问题[24]。因此, 我们应该在保证安全性的前提下, 进一步发展脑机接口技术, 造福于人类。

参考文献

- [1] Jacques, V.J. (1973) Toward Direct Brain-Computer Communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, **2**, 157-180. <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>
- [2] 祝晓平. 植入式脑-机接口锋电位实时处理算法研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [3] Nasmyth, K. (2022) The Magic and Meaning of Mendel's Miracle. *Nature Reviews Genetics*, **23**, 447-452. <https://doi.org/10.1038/s41576-022-00497-2>
- [4] 闵栋, 李静雯, 王秀梅. 脑机接口技术在医疗健康领域应用白皮书[R]. 北京: 中国人工智能产业发展联盟, 2021.
- [5] 于淑月, 李想, 于功敬, 孙健, 张忠海, 成蒴委. 脑机接口技术的发展与展望[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 5-12.
- [6] 孙从众. 脑机接口进展、挑战及展望[J]. 智能物联网技术, 2022, 5(3): 1-6+29.
- [7] Flesher, S., Downey, J.E., Weiss, J.M., et al. (2021) A Brain-Computer Interface that Evokes Tactile Sensations Improves Robotic Arm Control. *Science*, **372**, 831-836. <https://doi.org/10.1126/science.abd0380>
- [8] Neuralink, M.E. (2019) An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels. *Journal of Medical Internet Research*, **21**, e16194. <https://doi.org/10.2196/16194>
- [9] 脑机接口——未来生命科学和信息技术交叉融合的主战场[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(3): 113.
- [10] 甄敏蔚. 未来已来, 几多思考——2021年世界人工智能大会观察[J]. 上海质量, 2021(7): 11-13.
- [11] 脑机接口领域迎来新型柔性电极[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(2): 15.
- [12] 蒋丽勇, 刘术, 刁天喜, 赵宇伟, 董罡. 脑机接口技术进展及潜在军事医学应用[J]. 军事医学, 2021, 45(10): 780-785.
- [13] Chen, X., Wang, Y., Nakanishi, M., et al. (2015) High Speed Spelling with a Noninvasive Brain-Computer Interface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, e6058-e6067. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508080112>
- [14] 梁文栋, 郭晓辉, 程波, 乐赞. 脑机接口在康复医学中的应用进展[J]. 医疗装备, 2022, 35(21): 193-196.
- [15] Degenhart, A., Bishop, W.E., Oby, E.R., et al. (2020) Stabilization of a Brain-Computer Interface via the Alignment of Low-Dimensional Spaces of Neural Activity. *Nature Bio-Medical Engineering*, **4**, 672-685. <https://doi.org/10.1038/s41551-020-0542-9>
- [16] Zhang, Y., Nam, C.S., Zhou, G., et al. (2019) Temporally Constrained Sparse Group Spatial Patterns for Motor Imagery BCI. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **49**, 3322-3332. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2841847>
- [17] Liu, B., Huang, X., Wang, Y., et al. (2020) BETA: A Large Bench-Mark Database toward SSVEP-BCI Application. *Frontiers in Neuroscience*, **14**, 627. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00627>
- [18] Zhang, W. and Wu, D. (2020) Manifold Embedded Knowledge Transfer for Brain-Computer Interfaces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **28**, 1117-1127. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2985996>
- [19] 陈小刚, 杨晨, 陈菁菁, 高小榕. 脑机接口技术发展新趋势——基于 2019-2020 年研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(19): 56-65.
- [20] 高越. 美国脑机接口技术研究及应用进展[J]. 信息通信技术与政策, 2020(12): 75-80.
- [21] Flesher, S.N., Downey, J.E., Weiss, J.M., et al. (2019) Restored Tactile Sensation Improves Neuroprosthetic Arm Control. <https://doi.org/10.1101/653428>
- [22] 付佳钰, 王丽平. 基于脑电图的无创脑机接口的临床应用进展[J]. 医学综述, 2021, 27(23): 4619-4623.
- [23] 柯清超, 王朋利. 脑机接口技术教育应用的研究进展[J]. 中国电化教育, 2019(10): 14-22.
- [24] 顾心怡, 陈少峰. 脑机接口的伦理问题研究[J]. 科学技术哲学研究, 2021, 38(4): 79-85.