

DOI: 10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2022.03.064

植入式脑机接口技术的发展历程与趋势*

陈威良, 郑胜杰, 李骁健

(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 510085)

摘要:作为代表着脑科学研究成果重要转化落地方向的脑机接口技术,近两年成为社会关注的热点。尤其以 Neuralink 公司为代表的高集成度的先进脑机接口设备系统的研发,正在快速提升植入式脑机接口技术在植入电极数量和获取的脑神经信息量等方面的表现。高通量脑机接口硬软件作为脑机接口应用的底层技术,支撑着脑机接口多种可能应用场景的实现。本文将从植入式脑机接口的原理、系统实现与场景应用的角度,在神经信号采集、解码和效应执行等各层面分别做简单介绍。

关键词:植入式脑机接口;神经界面;脑机转码;运动执行器

中图分类号:R318 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**310.61

Development history and trend of implantable brain-machine interface

CHEN Weiliang, ZHENG Shengjie, LI Xiaojian

(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 510085, China)

Abstract: The Brain-machine interface (BMI) technology representing one outstanding direction of the translational neuroscience has drawn a lot of social attention in the past couple years. Particularly the research and development of advanced highly integrated BMI equipment is rapidly breaking through the bottleneck of implanted BMI technology in neural information acquisition and implantation procedure. The high-throughput BMI hardware as the foundation of BMI supports the realization of various possible application scenarios. This paper will briefly introduce the principle, system implementation and application scenario from the aspects of neural signal acquisition, decoding and effector execution.

Keywords: implantable brain-machine interface; neural interface; brain-computer transcoding; movement actuator

0 引言

脑机接口是大脑与外界直接进行信息通讯的方式,它通过计算机作为信息中介,帮助大脑实现和外部的通讯交流。难点在于,在计算机芯片上运行的数字电路信号和脑内的神经信号完全不同。植入式脑机接口,又称有创脑机接口,可以实现高性能的脑机接口技术,它需要通过手术在脑内植入传感器^[1]。

脑机接口的主要工作包括:第一是弥补收发信息器官的带宽差。人们接收信息,通过视、听、嗅、触、味收到信息,再通过说话或动作来表达及发出信息。由于接收信息很多,而发出的信息却较少,就出现收发带宽差的问题,脑机接口可以弥补对外表达能力的不足。第二是感受器官损伤导致瘫痪的病人可以通过脑机接口替代受损伤器官,使病人恢复正常的生活、工作。这个医疗方向是最近正在努力推

动的,在不久的将来,残疾人有望利用该领域获得的成果获得帮助。第三类实现意念交流,人们通过脑直接跟外界沟通,完全不再依靠感官。这种方式的初级应用包括治疗精神疾病^[2],更远的场景,比如“元宇宙”的终极形式实现。在现实中,人们还看不到以上提到的脑机接口形式。科幻电影为人们提供了比较清晰的初步认识,比如电影《阿凡达》展示了两种情况,一个是意识替换,另外一个意识对接。意识替换对意识的遥感和遥控技术要求很高,目前还没有明确的技术路线,用作意识替换的睡眠舱还停留在幻想阶段。另外一种情况是意识对接,需要身上有能进行神经对接的器官,地球生物并不具备。在另一部科幻电影《阿丽塔:战斗天使》中,通过外科手术,将人脑神经和机器人嫁接到了一起。女主角阿丽塔的身体完全是一个机械体,只有脑子是生物体。这种脑神经与电子装置的对接方式,是植入

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFA0701403)项目资助

陈威良,硕士生,主要研究方向为脑机接口。E-mail:wl.chen@siat.ac.cn

郑胜杰,硕士生,主要研究方向为脉冲神经网络。E-mail:sj.zheng@siat.ac.cn

李骁健(通信作者),正高级工程师,主要研究方向为高性能脑机接口和类脑工程。E-mail:xj.li@siat.ac.cn

式脑机接口的高级技术形式。这种对接方式在生理角度上可行性较高^[3]。

1 脑机接口的基础原理与技术

发展高级脑机接口技术需要对人脑的结构和功能有深入理解。脑具有相对独立的功能分区,主要包括额叶、顶叶、额叶、枕叶、小脑和脑干等区域。这些都是人为定义的区域,主要依据的是百余年来科学家们对脑功能的一些基础研究。这些区域不能拆卸,作为一个整体才具有正常功能。脑最基本的功能单元是细胞-神经元,神经生物学会对其进行过深入的研究^[4]。神经元主要由树突、胞体和轴突组成。神经元的树突众多,形似树根吸收水分等养料,树突则是接收其它神经元发出信号的载体。当胞体通过树突收集到足够的化学分子信号后,会通过轴突向末端发送一束化学离子射流,产生了“动作电位”。轴突形状类似于鞭子,在轴突外围层包裹着很多起绝缘作用的细胞,像电线的橡胶绝缘皮层。由于神经元浸泡在脑脊液形成的电解质溶液中,神经元周围均为导电环境,如果没有绝缘体保护,轴突传递的离子流将很快损耗,无法传给下游神经元的树突。人类的大脑包含近千亿个神经元,每个神经元都在进行信息的接收、处理和转发工作,大量神经元通过级联形成了规模庞大的通讯网络,通过信息的收发、处理和传递实现大脑的复杂功能。

为了获得神经元传递的信息,在大脑中放入传感器监听神经元的电活动。传感器应放置到神经元附近,距离越近清晰度就越高。目前常用的有3类传感器:脑电信号采集电极是把传感器放在头皮上,类似于在空中鸟瞰球场^[5],它的优点是不会对身体产生创伤,但由于距离脑神经元远,信号清晰度很低。生物物理学研究表明颅骨和头皮是很强的电信号低通滤波器。要想获得清晰的神经电信号,需要把传感器放到脑内,即采用植入方式。植入式有两种选择,一个是贴在脑皮层的表面,另一种是刺入脑组织内。贴在脑皮层表面的是采集头皮脑电(electrocorticography, ECoG)信号^[6],它比EEG信号清晰度高,但是不如刺入脑组织的采集方式。植入式脑机接口在科学研究方面的主流模式是刺入式采集信号^[7]。虽然信号清晰,但是会对脑组织有一定的损伤。目前来说,神经信号的采集是个“鱼和熊掌”不可兼得的问题。美国的Neuralink脑机接口技术公司,采用了刺入方式。最为理想的采集神经元信号的情况是将传感器紧紧地贴在神经元胞体上,既能

读取神经元信息,也能给神经元写入信息,但是目前技术还远未达到实用效果。

中国科学院深圳先进技术研究院李骁健团队自主研发的宽带植入式脑机接口系统贯通了猕猴脑机接口的技术链^[8-9]。通过脑外科手术,把高通道的神经传感器植入猕猴脑内,传感器连接专用神经电子芯片将神经电信号转换成数字信号,并通过采集器将数据发送到台式计算机,计算机负责采集数据的可视化和存储。计算机实时地完成神经信息的解码,如把采集到的脑神经信号转换成控制机械臂的指令,构建了一个猕猴运动脑机接口。相比于如主流的科研用脑机接口设备,BlackRock Neurotech公司研发的神经信号采集系统的体积较庞大,每一套只能支持96通道神经信号的采集。李骁健团队自主研发的系统可以同时采集超过2000通道的神经信号,且做到了设备的小型化。而Neuralink公司的脑机接口设备可以说实现了微型化。该微型系统同样也有电极传感器和专用的处理器芯片。2019年、2020年至2021年共展示了两款系统。2019年的是一个有线系统,有一个USB Type-c插头,而后边两年展示的是无线系统。这两个系统主要是传输信号的方式不一样,而植入过程是一样的,在颅骨上打个洞,电极就跟种水稻一样插到脑皮层里。无线的优点是脑袋上不需要外部传输线,植入者可以自由活动。但是易导致了采集到数据的巨大差别。因为无线系统进行了很大的数据压缩,而这款无线系统采用的蓝牙通信,无线传输数据的通量非常低。猴子能用脑控两个光杆做打乒乓球类似的游戏,证明传输出来的这点数据是够用的。但是不能说明这些数据足以应付所有的脑控制解码要求,毕竟脑控制游戏对控制信息的需求过低,仅验证了初步的脑控功能。

2 植入式脑机接口发展简史

在人用脑机接口方面,瘫痪病人的使用需求较高,例如渐冻症患者(俗称肌萎缩侧索硬化症),该病症主要侵害运动神经元,导致患者全身肌肉萎缩,是一种致命的神经系统疾病。曾有冰水治疗渐冻症的方法,都无法根治该绝症。美国的神经工程师Phil Kennedy是脑机接口领域的先驱,他从20世纪80年代末开始研究用于人的植入式脑机接口技术,用于开展渐冻症病人的研究,但未获得重要进展,最终肯尼迪将电极植入自己脑中研究渐冻症患者的脑控过程。20世纪60、70年代,美国政府为了帮助残疾退伍军人生活自理,从治疗运动障碍的角度开始

资助研究运动脑机接口技术。

脑机接口已有几十年的研究历史。早在 20 世纪 60 年代,人们发现从猕猴的脑内可以记录到与胳膊运动方向相关的神经元活动。到 80 年代发现,当把采集到众多神经信号放到一起,猕猴群体表现跟手抓的动作方向极为一致,此时脑控运动就有了充分的神经科学基础。直到 2006 年,提出了用于人的运动脑控的 BrainGate 方案^[10],从此植入式脑机接口进入面向实用的研究阶段,当时是一种最简单的脑机接口形式,即初期型脑机接口。是从与运动相关的脑区采集神经信号,将其进行转码成控制机械手的指令。2012 年出现了第一个人脑控机器人^[11],对瘫痪病人 BlackRock 系统的电极放大器插头植入研究。初期型脑机接口只能读取运动指令,没有触觉反馈功能。进一步发展将把机械手的触觉信息反向编码成神经脉冲,再写回到脑内对感觉信息进行处理的大脑,达到运动和触觉的合一。在 2016 年发明了第一个有触觉的人脑控机器人。可以灵活地控制机械手臂,这是运动脑机接口技术的一个重要的里程碑事件^[12]。

3 运动脑机接口的系统构成

3.1 神经界面技术

运动脑机接口系统分成 3 个功能段:第一段是神经界面,它是最表面从脑内传感神经信号的部分。目前残疾人脑内植入的大多是 BlackRock 电极,是一种硅基硬质电极,像一把鞋刷子,借助小气锤,拍入人的脑组织内部,代替了颅骨打开的植入电极方式。新的 Neuralink 系统^[13]是采用柔性的、细如发丝的复杂机器人一点点植入脑皮层中,植入过程相对繁琐。与之比较,硬质电极的排异反应比较强,脑信号衰减明显。柔性丝电极排异反应的较低,需要时间验证。植入脑内的柔性电极丝是采用微纳加工工艺,在与 CPU 芯片类似的硅片上制造。每根电极丝的顶端都有类似针鼻的小环,就是自动植入式电极时缝纫机机器人用钩针钩取电极丝的钩环。微型 ECoG 电极也是采用类似工艺制造。无需刺入脑组织,而是一种贴在脑皮层表面的柔性电极网。

微型 ECoG 薄膜电极网贴在人的脑皮层表面采集神经信号,操作时不用伤害血管。但是贴脑皮层表面不易采集到神经脉冲信号。目前植入式脑机接口学术界已有普遍共识,用刺入式的电极信号清晰度高,研究效果好。但是医疗用的脑机接口更适合贴脑皮层表面的电极,手术难度低,脑创伤小,更安

全。比如中科院深圳先进院李骁健团队成功研发了几款具有高时空精度的微型 ECoG 电极阵列,采用最先进的纳米复合增强技术的电极采集神经信号,比商用微型 ECoG 电极能采集到更为细节的神经信息,对脑信息的解码具有更大帮助,更适合做脑机接口使用。脑机接口专用芯片的主要功能是把微弱的神经模拟电信号放大并转换成合适的数字信号。Neuralink 的一个神经信号采集专用芯片单元可采集 256 个通道的神经电信号。李骁健团队研发的芯片与 Neuralink 芯片不同并不是在一个芯片里放太多的信号采集通道,而是增加了 16 个性能强大的电刺激通道,这种芯片不光是采集神经信号,更着重把信号写到脑神经里,共同实现读和写的功能。

感应神经信号的神经电极和把神经电信号转换成数字信号的电路芯片构成了神经界面技术,构成与脑神经对接进行信号交换的装置。传统人脑控机械手的实验,志愿者的头都预留插头,当需要脑控训练时插入插头,不做训练时拔下插头。Neuralink 无线系统取消了插头,不但实现了微型化,还能把整个神经信号的采集装置完全植入到体内,不但便于使用者一定范围内活动,更避免了金属插头和头皮接触部位的感染。

3.2 脑机转码技术

脑机接口系统的第一个任务是采集脑神经信号;第二个任务是脑机转码,把脑信息转换成机械动作;另一方面是把机械手的触觉信息反馈回大脑。脑机转码的神经科学依据主要是有两个:第一个是神经元群体编码理论^[14],需要记录到足够大量的神经元发出的信号才能做准确解码;另外一个神经的可塑性^[15],是学习神经生长的过程。有人误认为是把采集到的神经信号用计算机进行数据处理,仅需以最快的速度解算出来。实际操作中,用脑机接口做机械手控制和学骑自行车、游泳一样需要慢慢练习。脑控是一个新的技能,需要经过大脑一段时间的学习才能实现。目前美国对瘫痪病人植入脑机接口装置的研究,主要放在脑控学习的过程以及如何神经解码,患者在专业人员陪同下进行多种脑控任务的学习、训练和测试。

3.3 运动执行器技术

通过执行器控制机械臂和手做动作,也可以是其他形式的控制方式。基本有两种情况,一种是失去胳膊的瘫痪者利用仿生的机械臂、机械手替代自己的胳膊和手抓东西或有胳膊但是行动不便的患者,通过电刺激小臂肌肉做出想做的动作,被称作功

能电刺激。通过对特定位置的小臂皮肤和肌肉群进行电刺激,能做出想做的动作。除了通过植入式脑机接口进行脑控抓取,对于渐冻症患者来说,更为实用的是通过讲话、打字、上网等与外界交流,丰富社交生活。斯坦福大学的研究团队在2017和2018年展示了脑控敲键盘打字和上网发邮件的能力^[16]。

4 植入式脑机接口的临床功能验证

美国是植入式脑机接口研究的引领者,无论是基础研究还是临床探索,都奠定了良好的研究基础。中国的植入式脑机接口研究刚刚起步,最近在植入式脑机接口的科研临床研究方面小有成果,比如浙江大学的研究团队使用主流的BlackRock系统实现了一位高龄志愿者的脑控机器人,依靠脑控机械臂抓取油条和喝可乐。

脑机接口除了可以在一定程度上恢复瘫痪病人的运动功能,也可以在视觉、听觉、语言功能的恢复上对患者有所帮助。比如通过对脑神经活动的解码并构建语言合成器来实现聋哑人重新说话。该研究使用的不是BlackRock的硅针电极^[17],而是传统的ECoG薄片电极网。这种电极的优点,除了贴合脑皮层表面、比较薄、基本不损伤大脑外,最重要的优点是不用考虑刺入损伤,且覆盖外,面积较大,符合语音解码需要采集较大面积的脑皮层信号的要求。但是这种电极在脑皮层表面离神经元较远,采集的神经信号的精度比较低,但是采集的信息量是足够的。

通过脑机接口技术治疗精神疾病,如失忆、老年痴呆、焦虑、抑郁、自闭等症状也是可行的,最近脑机接口在难治性抑郁治疗上有所突破^[18-19]。精神疾病对应的脑部病区往往比较深,电极所较长需要植入脑的内部中心区域,相对于个别难治性抑郁病人起到了较好的症状缓解效果。精神类疾病一般会在多个脑区出现异常,往往需要多个靶点协同调控来提高治愈率。目前还需要更深入地研究调控靶点,确定出最准确、最小范围的治疗靶点。

最近出现了一种不需要脑部打洞的植入式脑机接口装置^[19],它是用血管介入支架改装而成,这种电极里只能停留在中缝大血管,或者较粗的旁支血管。所能接触到的脑区很有限,而且隔着血管壁采集神经信号也比较差,仅适合一些简单的脑控任务。

2021年,美国的国家药监局发布了植入式脑机接口医疗器械申请指南,将植入式脑机接口技术推向了医疗应用的快车道。中国的药监部门也在抓紧

准备制定类似的指南,为申请植入式脑机接口作为三类医疗器械提供了可参考的依据。在不久的将来,应该会有越来越多的脑机接口装置问世,造福于深受疾患痛苦的病人。短期内有望造福瘫痪精神障碍病人,给他们带来生活质量的改善。

参考文献

- [1] MARTINI M L, OERMANN E K, OPIE N L, et al. Sensor modalities for brain-computer interface technology: a comprehensive literature review[J]. *Neurosurgery*, 2020, 86(2): 108-117.
- [2] OKUN M S. Deep-brain stimulation for Parkinson's disease[J]. *New England Journal of Medicine*, 2012, 367(16): 1529-1538.
- [3] JOUNG Y H. Development of implantable medical devices: from an engineering perspective[J]. *International Neuropsychology Journal*, 2013, 17(3): 98-106.
- [4] KANDEL E R, SCHWARTZ J H, JESSELL T M, et al. Principles of neural science[M]. New York: McGraw-hill, 2000.
- [5] VIDAL J J. Toward direct brain-computer communication[J]. *Annual review of Biophysics and Bioengineering*, 1973, 2(1): 157-180.
- [6] LEUTHARDT E C, SCHALK G, WOLPAW J R, et al. A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2004, 1(2): 63-71.
- [7] BOUTON C E, SHAIKHOUNI A, ANNETTA N V, et al. Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia[J]. *Nature*, 2016, 533(7602): 247-250.
- [8] YANG M, YANG T T, DENG H J, et al. Poly(5-nitroindole) thin film as conductive and adhesive interfacial layer for robust neural interface[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(49): 2105857.
- [9] LEDESMA H A, LI X, CARVALHO-DE-SOUZA J L, et al. An atlas of nano-enabled neural interfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(7): 645-657.
- [10] HOCHBERG L R, SERRUYA M D, FRIEHS G M, et al. Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia[J]. *Nature*, 2006, 442(7099): 164-171.
- [11] FLESHER S N, COLLINGER J L, FOLDES S T, et al. Intracortical microstimulation of human somatosensory cortex[J]. *Science Translational Medicine*, 2016, 8(361): 361ra141.
- [12] MUSK E. An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels[J]. *Journal of Medical Internet Research*, 2019, 21(10): 16194.
- [13] GEORGOPOULOS A P, KALASKA J F, CAMINITI R, et al. On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex[J]. *Journal of Neuroscience*, 1982, 2(11): 1527-1537.
- [14] DIAMOND M C, KRECH D, ROSENZWEIG M R. The effects of an enriched environment on the histology of the rat cerebral cortex[J]. *Journal of Comparative Neurology*, 1964, 123(1): 111-119.
- [15] NUYUJUKIAN P, SANABRIA J A, SAAB J, et al. Cortical

- control of a tablet computer by people with paralysis[J]. *PloS One*, 2018, 13(11): 0204566.
- [16] CHEUNG K C. Implantable microscale neural interfaces[J]. *Biomedical Microdevices*, 2007, 9(6): 923-938.
- [17] SCANGOS K W, KHAMBHATI A N, DALY P M, et al. Closed-loop neuromodulation in an individual with treatment-resistant depression[J]. *Nature Medicine*, 2021, 27(10): 1696-1700.
- [18] OXLEY T J, YOO P E, RIND G S, et al. Motor neuroprosthesis implanted with neurointerventional surgery improves capacity for activities of daily living tasks in severe paralysis; first in-human experience[J]. *Journal of Neurointerventional Surgery*, 2021, 13(2): 102-108.
- [19] 乔飞, 司帅. 面向智能持续感知的“传感-计算”共融架构和芯片设计[J]. *微纳电子与智能制造*, 2020, 2(4): 14-33.
- QIAO F, SI S. Integration architecture and chips of “sensing with computing” for intelligent continuous perception[J]. *Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2020, 2(4): 14-33.