

破解脑机电极易脱出难题—— 他们让新型电极像“窗花”一般在脑中舒展

●本报记者 赵广立

侵入式脑机接口技术,被公认为高带宽人机交互的最佳方案。然而,柔性电极在大脑中易移位、易脱出等问题是该技术长期稳定应用的核心瓶颈。好消息是,中国团队的一项成果有望改变这一局面。

近日,北京脑科学与类脑研究所资深研究员方英团队研制出一款兼具高通量信号采集与生物力学顺应性的可拉伸柔性电极,为侵入式脑机接口技术的长期稳定性提供了解决方案。相关研究成果发表于《自然-电子学》。

侵入式脑机接口的共性难题

埃隆·马斯克创办的 Neuralink 公司是侵入式脑机接口领域的先驱。2024年初,Neuralink 完成世界首例 1024 通道侵入式脑机接口的人体植入,引发轰动。然而,少有人关注到,在轰动的新闻之后,“Neuralink 电极脱出事件”给这一“世界首创”蒙上了一层阴影。

据外媒报道,就在 Neuralink 完成上述侵入式脑机接口人体植入手术的几周后,高达 85%的柔性电极丝从该患者的脑组织中脱出,这引发了业界对侵入式脑机接口技术长期稳定性的深度忧虑。据美国媒体报道,“该设备采集的数据量已出现下降”。

Neuralink 植入的电极为何会大量脱出?方英告诉记者,这其实正是侵入式脑机接口的一个共性难题:传统柔性电极的线性结构设计,无法实现有效的力学拉伸形变。

“我们的大脑并非静止不动,它会随着呼吸与心跳节律性地搏动;而在身体运动的过程中,柔软的脑组织会在颅腔内发生位移和形变。”方英解释道,面对大脑的动态运动,传统线性电极无法实时顺应脑组织的变化,因此容易发生电极移位,甚至从脑组织中脱出。

方英说,电极移位甚至脱出,不仅会直接降低大脑神经信号采集的数量与解码精度,还可能引起脑组织炎症反应。因此,研发能够适应大脑动态运动、实现神经信号长期稳定采集的新型柔性电极,是侵入式脑机接口技术临床应用“亟待破解的关键技术难题”。

设计“可拉伸柔性电极”架构

方英在柔性高通量电极领域深耕多年。10多年前,方英团队在国际上率先证实,侵入式柔性电极能够在啮齿类动物体内实现长时程、高保真的神经信号采集。但她清楚地知道,侵入式脑机接口的终极应用者是人类,而猕猴、人等灵长类动物大脑的生理搏动与颅内位移幅度远远大于啮齿类动物。

“这种量级上的差异,意味着在灵长类大脑中实现长期稳定交互,仍是当前脑机接口领域最具挑战性的科学难题。”方英说。

在后续的攻关过程中,团队创新性地提出并设计了“可拉伸柔性电极”架构。

方英告诉记者,传统线性电极在受力时仅能依赖材料本体的拉伸形变,极易触及应变极限;而可拉伸电极通过应变解

耦,可将拉伸负载转化为弯曲与扭转变形。具体而言,团队通过精密微纳加工工艺,先将电极制成二维螺旋阵列。当电极植入大脑后,在脑脊液环境的作用下,电极会像剪好的窗花般顺势舒展,完成从二维平面(2D)到三维立体(3D)螺旋形态的转变,以适应大脑搏动。

这种设计利用柔性电子薄膜结构极低的弯曲强度,将拉伸应力引导至低能量势垒的失稳变形中。得益于此,电极在植入后能够动态跟随大脑搏动与颅内位移,确保电极在脑组织中的长期稳定性。

“这款可拉伸电极在脑内也比传统线性电极更加柔和。”方英强调,Neuralink 的线性电极拉伸 100 微米需施加 4 毫牛的力,而这款可拉伸电极只需 37 微牛,为前者的 1/100。

同时,这种极致柔软性也意味着电极对脑组织的机械损伤更低,从根源上避免了线性结构柔性电极引发的免疫反应和胶质疤痕等问题。胶质疤痕会导致电极周围神经元密度降低,最终使电极失去信号采集能力。

在灵长类大脑中获得初步验证

为验证可拉伸柔性电极的植入可靠性与长期稳定性,研究团队以猕猴为实验对象开展了系统性验证。经过超 8 个月的实验,结果表明,可拉伸柔性电极能够实现猕猴大脑中的长期稳定记录——可探测神经元数量未见显著减少。

更令人振奋的是,研究团队在为猕

猴植入 256 通道电极后,成功采集到 257 个单神经元信号,神经元得率——单个通道有效采集神经元信号的效率超过 100%,并实现了对大脑运动意图的高精度解码。

“超 100%的神经元得率,对侵入式脑机接口技术的临床转化具有里程碑式的意义。”方英表示,有效采集大脑神经元信号是精准解码的前提,而采集到的信号数量直接决定脑机接口技术的解码精度,进而影响脑机交互的核心交互效能。

为进一步验证该电极架构的大规模信号采集能力,研究团队在灵长类大脑中成功植入了 1024 通道的高密度可拉伸柔性电极——这一规模与 Neuralink 的核心指标持平,并成功采集到大规模、高质量的神经信号,再度印证了可拉伸柔性电极的优异性能。

据方英介绍,基于团队在相关技术上的积累,目前他们已成功研制出基于可拉伸柔性电极的高通量无线侵入式脑机接口系统。该系统通过优化脑机接口系统的生物相容性与信号传输带宽,能有效提升信号的长期稳定性和解码精度,为侵入式脑机接口产品的规模化临床应用奠定了技术基础。

“随着技术迭代与临床落地稳步推进,我国有望在全球侵入式脑机接口赛道抢占核心话语权。”对于相关技术的发展,方英信心满满。

相关论文信息:

<https://doi.org/10.1038/s41928-025-01560-6>

眨眼就能发电,新技术助瘫痪人士“视”界畅通

本报讯 眼球追踪技术能让瘫痪人士仅通过眼部运动就能控制轮椅或进行交流,但这种技术常因设备的体积和重量受到限制。青岛大学教授龙云泽团队与合作者,研制出一套轻量级自供能眼球追踪系统,其运行能量完全来自眼睑眨动时与眼球摩擦产生的电能。相关研究近日发表于《细胞报告-物质科学》。

现有眼动追踪设备普遍体积较大、

依赖外部供电、弱光环境下无法工作,且长时间使用易导致视觉疲劳。基于此,研究人员希望打造更可持续、便于穿戴且用户友好的替代方案,以帮助肌萎缩侧索硬化症等运动功能障碍患者群体。

团队基于摩擦纳米发电机原理构建了新系统,其通过摩擦起电与静电感应将机械能转化为电能,可从眨眼等低频运动中采集能量。该系统不仅可以收集

足够电能实现自供能,还能以 99%的精度检测小至 2 度的眼球运动。摩擦模块在兔子眼睛中能持久保持电荷。同时,该系统在电磁干扰环境下仍能保持高精度。

团队研发的自供能眼动仪不仅能通过眨眼获取能量,还能精准捕捉眼球运动轨迹。这套系统可在暗光环境下工作,无需外接电源,其轻便程度与

舒适性堪比日常佩戴的眼镜。研究人员指出,这证明从人体细微运动中收集能量是可行的。类似技术不仅能融入医疗保健和虚拟现实应用,还可拓展至智能驾驶、太空探索等需要免手动控制的关键领域。

(冯丽妃)

相关论文信息:

<http://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.103026>