



## 脑机接口在元宇宙中的应用研究进展

王雪 李莎 李荣洋 宁焕生

### Advances in the application of a brain-computer interface to the Metaverse

WANG Xue, LI Sha, LI Rongyang, NING Huansheng

引用本文:

王雪, 李莎, 李荣洋, 宁焕生. 脑机接口在元宇宙中的应用研究进展[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(9): 1528–1538. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2023.02.15.001

WANG Xue, LI Sha, LI Rongyang, NING Huansheng. Advances in the application of a brain-computer interface to the Metaverse[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(9): 1528–1538. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2023.02.15.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.02.15.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 面向老人迟滞性特征的可靠情感计算

Trusted affective computing based on hysteresis characteristics of the elderly

*工程科学学报*. 2017, 39(10): 1591 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.10.019>

#### 振动触觉编码的研究现状

Current situation of vibration tactile coding

*工程科学学报*. 2021, 43(9): 1261 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.01.12.007>

#### 视线追踪中一种新的由粗及精的瞳孔定位方法

A new pupil localization method from rough to precise in gaze tracking

*工程科学学报*. 2019, 41(11): 1484 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.09.06.005>

#### 复合定形相变材料的封装及应用研究新进展

Research progress in encapsulation and application of shape-stabilized composite phase-change materials

*工程科学学报*. 2020, 42(11): 1422 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.03.26.002>

#### 纳米技术在镁质耐火材料中的应用的研究进展

Progress in the application of nanotechnology to magnesia refractories

*工程科学学报*. 2021, 43(1): 76 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.05.09.001>

#### 金属塑性成形中的韧性断裂微观机理及预测模型的研究进展

Research progress on the micro-mechanism and prediction models of ductile fracture in metal forming

*工程科学学报*. 2018, 40(12): 1454 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.12.003>

# 脑机接口在元宇宙中的应用研究进展

王雪, 李莎<sup>✉</sup>, 李荣洋, 宁焕生

北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: [shalee@ustb.edu.cn](mailto:shalee@ustb.edu.cn)

**摘要** 近期,随着元宇宙研究重心转向内容交流和社会互动,如何打破当前视听媒体交互瓶颈成为了亟待解决的问题,使用脑机接口进行感官模拟就是解决方案之一。目前,脑机接口已经作为生理信号采集工具在元宇宙诸多领域表现出了不可替代的应用潜力。研究三个应用场景,元宇宙艺术中的生成艺术、元宇宙医学中医疗保健严肃游戏、元宇宙虚拟社会中的虚拟人表情合成中脑机接口应用现状,调查已经存在的商业产品和专利(MindWave Mobile、GVS、Galea),类比网络安全和神经安全、生物伦理学和神经伦理学的发展过程,探讨脑机接口成熟并被广泛应用后可能面临的挑战和潜在问题,展望未来脑机接口在元宇宙中深入多样应用的可能性。

**关键词** 脑机接口;元宇宙;人机交互;生成艺术;严肃游戏;情感计算;神经安全;神经伦理学

**分类号** TP399

## Advances in the application of a brain–computer interface to the Metaverse

WANG Xue, LI Sha<sup>✉</sup>, LI Rongyang, NING Huansheng

School of Computer and Communication, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: [shalee@ustb.edu.cn](mailto:shalee@ustb.edu.cn)

**ABSTRACT** The brain–machine interface has been an integral component of the metaverse since the inception of the latter, in his classic science fiction novel “True Names,” Vernor Vinge, the American mathematician and computer science Professor, describes a virtual world that can be accessed and experienced *via* a brain–machine interface. Following the introduction of this idea, the science fiction novel “Avalanche” formally proposed the concept of a metaverse, where a virtual world constructed by humans using digital technology can be mapped onto and interact with the real world. Large companies such as Meta, Apple, Sony, Microsoft, and Samsung have launched new metaverse-related hardware and software products. Domestic giants such as Tencent, Alibaba, and Baidu have also integrated themselves into the metaverse, confirming its future development and commercial value. Goldman Sachs estimates that trillions of dollars will be invested in the development of the metaverse over the next few years. As the focus of metaverse research shifts toward content exchange and social interaction, the issue of addressing the current bottlenecks in audiovisual media interaction has become an urgent matter, and the brain–computer interface is one of its solutions. Brain–computer interfaces are becoming increasingly complex. As a physiological signal acquisition tool, it has demonstrated indispensable application potential in numerous fields of the metaverse. A non-invasive brain–computer interface possesses the advantages of being easy to obtain and having good performance and accuracy. It is the preferred method for detecting brain signals in brain–computer interfaces. The Electroencephalogram is a unique physiological signal conducive to reflecting people's psychological state. By reading and categorizing the relevant papers in the paper database, including Web of Science, CNKI, IEL, and ACM Digital Library; investigating the products and functional parameters of Neuralink, Synchron, OpenBCI, and Emotiv; studying three application scenarios, namely, the generative art in the metaverse art, the serious game of medicine and healthcare in the medical metaverse, and the application status of the brain–machine interface in virtual

收稿日期: 2023–02–15

基金项目: 北京科技大学教改项目(JG2020Z08)

human expression synthesis in the social metaverse; and by investigating the existing commercial products and patents (MindWave Mobile, GVS, Galea), this paper discusses the challenges and potential problems that brain-computer interfaces may face with their widespread use by drawing parallels with the development process of network and neural security and bioethics. Furthermore, the possibility of in-depth and diverse applications of brain-computer interfaces in the future is explored, for instance, the use of sensory simulation technology to simulate olfactory sensation, gustatory sense, and tactile sensation, and the use of motor imagery to assist disabled people in participating in the metaverse.

**KEY WORDS** brain-computer interface; metaverse; human-computer interaction; generative art; serious game; affective computing; neurosecurity; neuroethics

元宇宙并非新生概念,在1992年的科幻小说《雪崩》中已经提出<sup>[1]</sup>,但是元宇宙概念在近两年才走上风口,以Meta公司为代表的科技巨头纷纷涌入,传统企业也开始积极拥抱元宇宙技术,数字经济开始围绕着元宇宙展开全球新一轮科技博弈。元宇宙是利用物联网、云计算、扩展现实等科技手段,创造出来的映射现实世界、能够与现实交互的虚拟空间。从技术角度上,元宇宙是在设计的特定场景下由多种技术完成的综合性应用,网络及运算技术是元宇宙交互与信息传递的基础;X 联网、身份建模、社会计算、去中心化管理技术实现了元宇宙中虚拟社会的构建;扩展现实、脑机接口等技术完成虚实世界感官的统一,是虚实融合的基石。从构成角度上,元宇宙可以分为硬件、软件与内容。从方法角度上,元宇宙由用户之间的互动、虚拟空间的实现、各种丰富的应用组成。以往元宇宙研究重心更偏向于虚拟世界本身结构,如今人们越来越关注元宇宙的内容交流与社会互动功能,赋予了元宇宙更多交互功能上的期望,为了实现元宇宙对现实世界中交互模式更加真实的模拟,感官模拟研究愈发重要,脑机接口(Brain-computer interface, BCI)就是方向之一<sup>[2]</sup>。目前并没有将脑机接口感觉模拟技术与元宇宙技术相结合的应用实例,脑机接口在元宇宙中更多是作为生理数据采集工具。

对元宇宙中脑机接口技术应用现状和面临的问题进行调查,进而展望未来脑机接口感觉模拟技术发展的可能性。

## 1 脑机接口在元宇宙中的应用研究进展

脑机接口早期定义为不依靠周围神经系统和肌肉的大脑通信系统<sup>[3]</sup>。2012年,Wolpaw与Wolpow<sup>[4]</sup>对脑机接口进行了重新定义,拓宽了范围,定义为测量中枢神经系统(Central nervous system, CNS)活动并转化为人工输出的系统。脑机接口有着多种分类方式,依据信号采集方法的不同,可以分为侵

入式脑机接口(Electrocorticography, ECoG)和非侵入式脑机接口(Electroencephalogram, EEG);依据使用者是否在使用时自愿控制,将脑机接口分为主动脑机接口和被动脑机接口;依据脑与计算机之间信息通路方向的不同,将脑机接口分为单向脑机接口和双向脑机接口。

近几年,脑机接口技术在前端接口、后端算法、可穿戴设备、干式脑电图等领域都取得了巨大进步<sup>[5]</sup>,随着技术更新换代,脑机接口应用逐渐成熟,典型例子就是脑机接口拼写器和神经义肢,大大改善了残疾人士的生活;对于健康用户,脑机接口也有用途,比如在游戏领域,依据运动想象(Motor imagery, MI)和稳态视觉诱发电位(Steady-state visual evoked potentials, SSVEP)设计出的游戏范例中,玩家可以通过运动想象来匹配不同的游戏命令,通过注视闪烁时产生的SSVEP事件做出特定游戏操作<sup>[6]</sup>。这种连续控制相对于普通键盘、游戏手柄等交互方式更具有沉浸感,有更优秀的游戏体验。

脑机接口从实验成果到现实运用不断落地,展示着它在元宇宙领域的应用潜力。依据采集方法分类的两种脑机接口中,侵入式脑机接口技术更为复杂并且涉及创伤性的手术,非侵入式脑机接口相比较之下具有无创性,更易于获取,同时也有着良好性能与准确度,是首选脑电检测方法,也是主要研究与讨论对象。通过对元宇宙艺术、元宇宙医学、元宇宙虚拟社会进行研究调查,展示元宇宙不同应用场景中脑机接口技术的功能与成效。

### 1.1 元宇宙艺术

元宇宙由硬件技术和内容设计两大部分构成,硬件技术是科学技术的代表,而内容设计是艺术的代表,艺术与技术同根同源,相辅相成,元宇宙起源于艺术领域,其蓬勃发展也反过来丰富了艺术领域,创造出了虚实相生的元宇宙艺术。元宇宙艺术包括数字孪生艺术、数字原生艺术、物理孪生艺术,是采用虚拟现实(Virtual reality, VR)、

增强现实 (Augmented reality, AR)、混合现实 (Mixed reality, MR)、全息投影、非同质化通证 (Non-fungible token, NFT) 等数字技术, 以现实世界为灵感源泉的艺术形式. 2022 年在南宁举办的清明上河图科技艺术沉浸特展, 就是典型的元宇宙艺术展, 特展通过全息动态投影技术激活了千年古画的生命力, 使用 VR 技术使游客可以身临其境地穿越到画作中, 突破了以往艺术展览的严肃与距离感, 赋予文物在科技时代的新活力, 给游客新颖生动的美育体验. 因为元宇宙艺术在交互与沉浸参与感上的优势, 使普罗大众可以轻松地艺术的个人表达, 并且深入理解、参与元宇宙艺术家的作品之中, 脑机接口作为一种特殊的交互技术, 成为了艺术创作者与艺术欣赏者之间合作与交流的桥梁<sup>[7]</sup>.

脑机接口与元宇宙艺术交汇在生成艺术 (Generative art) 领域, 生成艺术是指艺术家将创作者身份交给自治系统, 比如计算机程序和机器, 使其主导或者辅助一个完整艺术作品诞生<sup>[8]</sup>. 生成艺术和脑机接口通过生成艺术所需的自主性启动联结起来, EEG 采集脑电信号输入生成艺术装置, 启动装置, 由于脑电信号的动态性、独特性, 不同人在不同时间里艺术装置产生的输出结果都不同. 在 2021 年, 已经有研究者做出了成功的系统设计, 如图 1 所示, 使用 NeuroSky 脑立方耳机二代作为信号采集工具, 通过蓝牙将采集到的脑电波数据传给计算机上的 ThinkGear Connector 程序, 它采用用户数据报协议 (User datagram protocol, UDP) 将数据发送给 Unity 引擎, 随后 Unity 引擎依据数据进行即时渲染, 产生的动画效果同步投影到佩戴耳机的被试者面前. 即时渲染在部分自治的同时, 也具有一定规律, 研究者的灵感来自大自然, 依据植物叶序规律进行渲染程序设计, 使用了向日葵花朵的简单模型, 发现通过改变花朵角度可以产生不同图案变化, 便使用角度作为变量来生成可变

图案, 通过对脑波数据进行特征提取, 用不同注意力程度映射不同花朵图案角度, 用不同冥想程度映射不同花朵颜色, 用这种特殊方式向被试者可视化了自己的平静程度, 可以应用于冥想和艺术治疗<sup>[9]</sup>. 这项实验通过二维平面的投影展示, 还没有发展到元宇宙的虚拟空间, 通过将元宇宙这种虚拟空间作为生成艺术的画布, 比起普通的二维、三维现实空间中的生成艺术有了更多的自由度、更少的经济成本, 能给予艺术家更广阔的灵感发挥空间<sup>[10]</sup>, 元宇宙在计算机的辅助下极具高效性, 大大简化了原本复杂的艺术创造流程<sup>[11]</sup>.

脑机接口与元宇宙艺术的结合, 让人的大脑活动成为了艺术作品的构成部分, 因为大脑活动的因人而异性、因时而异性, 创造出了这种独特, 动态的艺术, 通过进一步了解脑电信号特征的生理原因、象征意义, 相信科学家和艺术家通过脑机接口, 可以进一步增进群众对大脑功能的理解, 发展出成熟的艺术治疗手段.

## 1.2 元宇宙医学

元宇宙医学最早的概念源头是远程医疗, 随着传感器、可穿戴设备、云计算等物联网技术的不断发展, 功能上更为强大的物联网医学继承了移动医疗将医疗与信息相结合的特性, 在医疗资源不均衡、患者就诊困难的社会背景下应运而生, 在协助疾病诊断、慢性疾病管理、康复训练等方面发挥了巨大作用, 物联网医学使用便携物联网设备远程采集患者数据, 通过基于人工智能技术的信息处理系统来高效地管理患者, 将云计算技术应用在社区医院、区医院、医学中心的分工场景中, 高效联动, 完成级别分明又相互协作的疾病诊疗. 元宇宙医学是物联网医学的真子集, 复旦大学附属中山医院教授白春学将元宇宙医学定义为通过 AR 技术实施的物联网医学, 使用传感器来实时监测机体的生理和病理变化, 再通过数字孪生

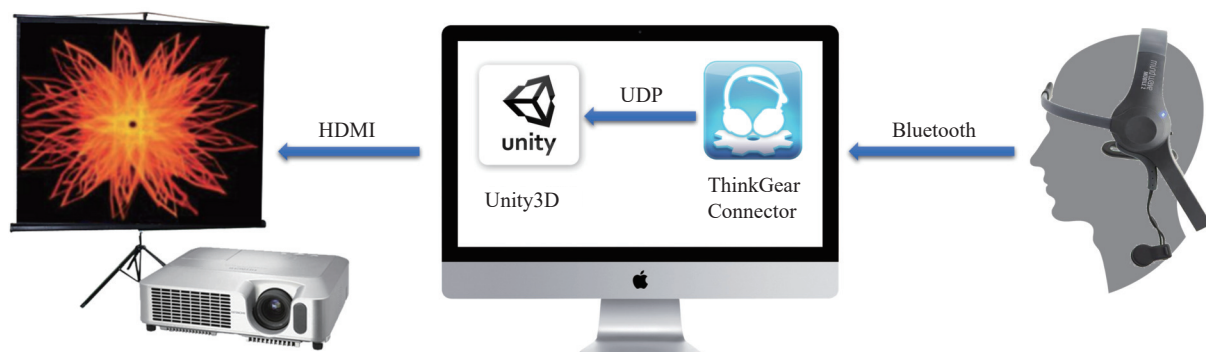


图 1 脑电数据驱动的生成艺术范例

Fig.1 EEG data-driven generative art application

技术完成虚拟建模和患者身体的虚实联动. 白春学教授在 2018 年开创了世界首个元宇宙医学原型的临床研究, 带领团队开发了 BRM 一体机, 医生可以在系统中使用 AR 设备收集并查看患者的全息医学资料, 从而达到高效精准的诊疗<sup>[12]</sup>.

除了基于 AR 的高效诊疗系统外, 元宇宙医学还通过基于 VR、MR 的严肃游戏改善了医疗保健的质量. 严肃游戏并非传统意义上供人消遣娱乐的游戏, 它通过应用游戏设计技术来解决现实生活中各个领域的问题, 提供创造性解决方案, 严肃游戏可以通过模拟现实环境, 给学习者提供在现实中因为安全、时间、成本等因素不可能实现的学习条件. 其中, 医疗保健严肃游戏可以对个人生理与心理产生直接或间接的积极影响, 比如锻炼身体的舞蹈和体育锻炼游戏, 养成患者或幼儿生活技能的自我管理游戏, 提高患者运动技能的康复训练游戏, 以及确诊和治疗精神疾病的诊断治疗游戏. 医疗保健严肃游戏领域广阔且具有强大的生命力, 为了讨论脑机接口技术在其中的应用潜力, 以孤独症谱系障碍 (Autism spectrum disorders, ASDs) 的严肃游戏治疗作为实例, 进行现状阐述和未来展望<sup>[13]</sup>.

孤独症 (Autism) 是一种神经发育综合症, 其症状包括缺乏社会互惠和交流, 以及不寻常的限制性重复行为, 因为感觉知觉和社会功能上的障碍, 普通生活场景对于 ASDs 患者也潜藏着各种危险, 给患者本人和家人都带来了沉重负担. 早期强化行为干预 (Early intensive behavioral intervention, EIBI) 是目前较为成熟的一种治疗手段, 能够降低症状严重程度, 提高部分患者的智商、适应行为和语言能力, 训练者年龄要在 5 岁以下<sup>[14]</sup>, 对于超过 EIBI 治疗年龄的 ASDs 患者, 通常采用康复训练等非药物治疗手段或心理治疗手段, VR 沉浸式严肃游戏是其中一种新颖的治疗手段, VR 创造出完全可控的训练环境, 达到锻炼社交技能、矫正注意力缺陷、改善恐怖情绪、提高躯体运动技能的训练效果<sup>[15]</sup>, 同时由于患者在日常认知活动中视觉皮层相较于典型神经发育者的高活跃度, VR 提供的视觉辅助对训练 ASDs 患者有显著帮助<sup>[16]</sup>. 目前 VR 训练系统具有不足之处, 首先, VR 眩晕和视觉疲劳不良反应会在感知觉异常的 ASDs 患者身上进一步放大; 其次, 目前 VR 训练系统的训练模式都是对 ASDs 患者某一症状进行干预, 没有综合性和阶梯性<sup>[17]</sup>.

对于 VR 不良反应问题, 早在 2016 年, 梅奥诊

所 (Mayo Clinic) 的专利前庭电刺激 (Galvanic vestibular stimulation, GVS) 就给出了解决方案, GVS 可以营造完整运动感觉, 平衡 VR 使用者视野变化与体感之间的不匹配, 缓解其 3D 眩晕综合征. 这种技术已经得到产业化, vMocion 的 3vTM 平台运用了这项专利, 提供完整三维运动感觉, 包括从左到右旋转、向前向后移动, 向左向右移动, 三者的组合反映了人体所有潜在的运动模式. 同时 vMocion 公司的 REMOVESTM 技术可以安全地抑制前庭系统, 不产生额外运动感觉<sup>[18]</sup>.

对于 VR 训练系统设计综合性和阶段性上的欠缺, 由于目前的 VR 系统侧重于对 ASDs 患者行为上的训练, 无法确认能否在神经生理层面上影响患者, 往往依据对患者行为的主观观察来判定患者的训练成效, 缺少客观的训练成果指标. ASDs 患者镜像神经元存在功能性失调, 自身实际运动时镜像神经元活跃, 观察他人运动时镜像神经元不活跃, 而镜像神经元功能正常的典型神经发育者在这两种情景之下镜像神经元都活跃, 感觉运动皮层上方  $\mu$  频率 (8~13 Hz) 的脑电信号频率受抑制的程度反映了镜像神经元活跃程度,  $\mu$  频率下镜像神经元对实际运动和观察到的运动反应性差距可以反映镜像神经元功能失调程度<sup>[19]</sup>. 在确认患者经过 VR 训练后有显著行为层面成效的前提下, 依据权威诊断量表设计出科学的行为改善量化标准, 同时将 VR 训练前后两组脑电数据进行对比, 观察 ASDs 患者的镜像神经元功能性失调是否在训练中得到改善, 如果确有改善, 通过分析行为改善量化结果与镜像神经元功能改善程度的相关性, 判断是否能将镜像神经元功能上的变化视为训练成果指标之一; 如果没有改善, 在训练过程中对脑电数据采集研究, 也为进一步了解 ASDs, 设计出综合性、阶段性的训练系统打下了基础.

对于因为自身智力带来的社交补偿, 行为症状较少而尚未诊断出的 ASDs 患者, 如图 2 所示, VR 训练系统与脑机接口的结合提供了高效简易的诊断方案<sup>[20]</sup>, 普通的 VR 诊断往往会设计一个社会互动场景, 将被测的头部运动、眼睛凝视、注视焦点等非语言行为作为生物标志物<sup>[21]</sup>, 但对于具有良好社交技巧和贫乏心智理论的社交补偿型 ASDs 患者, 此诊断方式可能会失效, 可以使用脑机接口采集  $\mu$  频率脑电波做更深一步的诊断. 现阶段 VR 设备与脑机接口技术的初步结合, 提供了硬件基础, 在 2020 年 11 月 19 日, OpenBCI 公司在其官网上发布了新产品 Galea 的公告, Galea 将 AR、VR 头戴

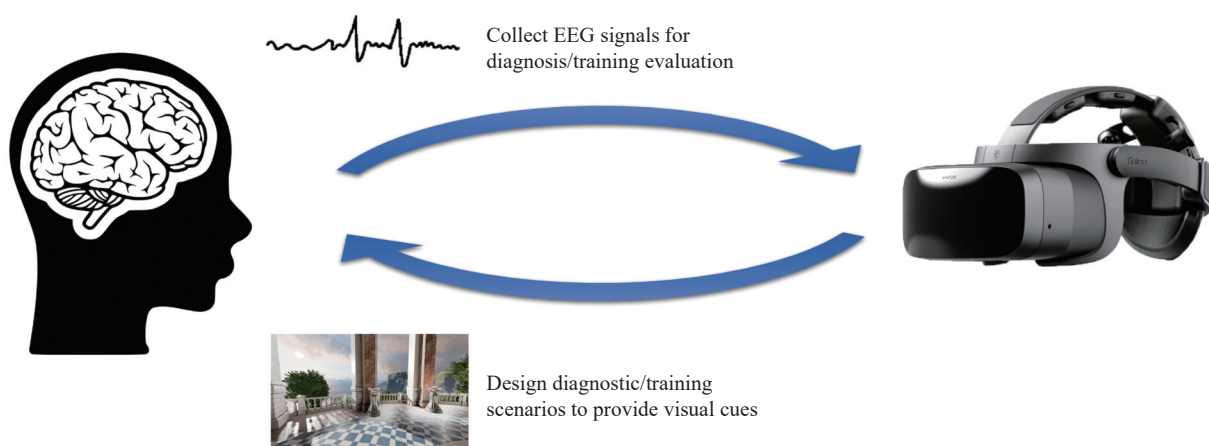


图 2 基于 VR 与 EEG 的 ASDs 训练/诊断系统

Fig.2 ASDs training/diagnosis system based on VR and EEG

式显示器和 EEG、眼电图 (EOG)、肌电图 (EMG)、皮肤电活动 (EDA)、光电容积脉搏波 (PPG)、Varjo Aero 眼动追踪技术相结合, 将生物特征数据即时传输给开发引擎, 为研究人员提供探索人类思维和生理规律的便捷手段. 如图 2 所示, 在 ASD 患者的 VR 训练场景下, Galea 这种将生物信号采集装置和 VR 显示器相结合的设计, 比起普通的将 VR 显示和信号采集器相分离的实验方式更加便捷方便, 同时也提高了实验沉浸程度, 降低了患者心理压力.

### 1.3 社交虚拟现实

社交虚拟现实 (Social virtual reality) 使全球各地的用户能够在一个可以共享、互动的虚拟环境中进行交互与社交, 在虚拟社交世界, 用户使用 3D 建模生成的数字化身 (Avatar) 代替自己进行社交活动, 作为建立元宇宙的重要基础, 社交虚拟现实已经被计算机图形学和人机交互社区广泛研究<sup>[22]</sup>. 对目前比较流行的 5 个社交虚拟平台进行调研与信息整理, 展示在表 1 中.

在现实社交生活中, 语言是核心工具, 表情和肢体动作是重要辅助, 在虚拟社交世界中复现用户现实表情是十分有价值的问题. 以 Horizon Worlds

为例, 在 Meta 公司之前释出的概念影片中, 用户虚拟形象虽然因为技术限制只有上半身, 却有着灵动真实的面部表情; 然而, 目前 Horizon Worlds 中真正的虚拟形象面部建模和表情复现并不理想, 对于面部表情的实时变化, Meta 公司采用对用户语音进行情感分析, 再映射到对应面部变化的方法, 由于面部建模的技术限制, 这种表情变化仅限于扬眉、嘴的张合、眨眼等面部子区域动作的组合, 效果僵硬不自然. 为了进一步提升虚拟形象面部表情模拟效果, 不仅需要仿生美观的面部建模, 还需要贴近自然效果的表情复现方法.

复现人类表情的方法可以依据情感识别方法分为两类, 第一类方法基于面部表情图像、声音信号等非生理信号, 第二类方法基于 EEG、EMG、心电图 (ECG) 等生理信号, 第一类方法中基于面部表情的方法效果最佳, 元宇宙中的社交活动要求参与者佩戴头戴式 VR 设备, 会遮挡住部分面部, 并且 VR 设备对人脸的束缚影响了参与者自由地做出各种表情. 第二类基于生理信号的方法不受外部 VR 设备限制, 并且不需要摄像头进行图像采集, 更具灵活性, 价格成本也更为低廉, 体现出了独特优势. 在用于情感识别的各种生理信号中, 脑

表 1 5 个流行社交虚拟平台

Table 1 Five popular social virtual platforms

Platform	Company	Status	Initial release	Genre
AltspaceVR	Microsoft	Shut down	May 2015	Virtual social community
Horizon Worlds	Meta	Operating	December 2021	Game creation system, massively multiplayer online
Mozilla Hubs	Mozilla	Operating	April 2014	Virtual collaboration platform
Rec Room	Rec Room	Operating	June 2016	Game creation system, massively multiplayer online
VRChat	VRChat	Operating	January 2014	Massively multiplayer online

电信号是最常用的生理信号之一,它直接从大脑皮层捕获,有利于反映心理状态<sup>[23]</sup>.

基于脑电信号的表情复现方法依赖两种技术,分别是脑电信号情感识别和情感的面部表情效果映射.基于脑电信号的情感识别采用 EEG 技术,一个完整的脑电情感识别流程如图 3 所示,首先要确定科学的实验规程,采集固定电极位置、固定波段脑电信号,最常用的电极是放置在额叶的电极,即图 4 中用红色标注的电极;采集到最初的

信号后,需要使用手动删除、盲源分离 (Blind source separation, BSS)、独立元素分析分离 (Independent component analysis, ICA) 等方法删除被测眼球运动、肌肉运动产生的信号伪影,得到滤波后信号;对滤波后的信号进行特殊波段信号特征提取,最后依据提取出的信号特征对被测情绪状态进行分类<sup>[24]</sup>.也许有人会因为个人情感表达独特性来质疑分类结果,实际上,只要在进行分类前,通过同时采集被测表情图像数据、生理信号和脑电数据,

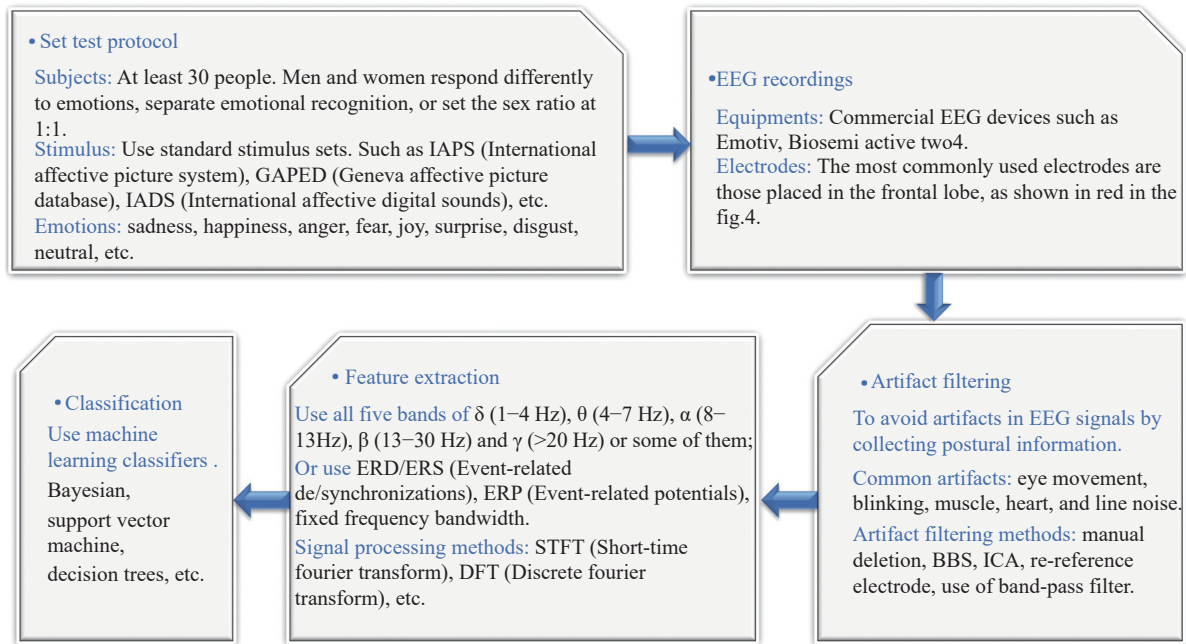


图 3 脑电情感识别流程图

Fig.3 EEG emotion-recognition flowchart

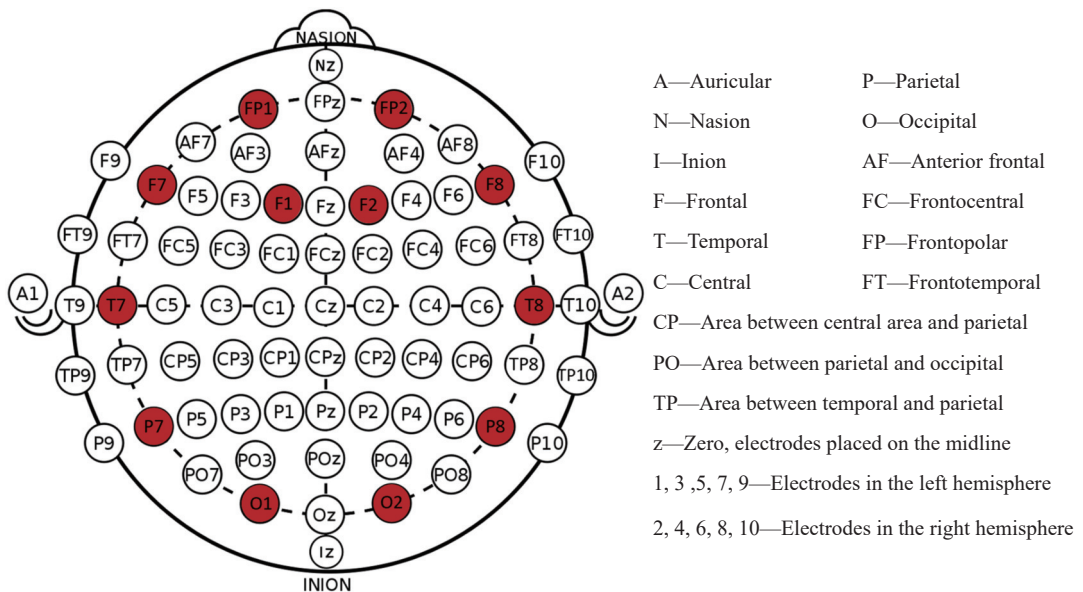


图 4 10-10 脑电极导联系统

Fig.4 10-10 electrode placement system

形成个体独一无二的标准, 就能确定脑电信号和情感表达的对应关系。

这种情感识别方式也存在着问题. 对采集的脑电信号进行情感识别时, 识别出来是个体情绪状态, 即正在经历一种情绪时的动态状态, 在我们的社交生活中, 实际参与个体社交行为的是个体情感表达, 如表情、肢体语言、说话声调, 情绪状态无法被他人直接观察, 使用者在不同社交场合下, 情绪状态对应的情感表达不可能完全相同<sup>[25]</sup>, 因此, 基于脑电信号的情感识别方法与其作为元宇宙中虚拟形象表情复现的基础, 更适合作为一种补充或辅助方式, 解决面部表情识别方法遇到的 VR 设备遮挡和肌肉运动不自然的问题。

## 2 脑机接口技术面临的挑战

从安全性角度来看, BCI 还处于早期和不成熟阶段, 有可能对使用者产生生理、心理、个人隐私及经济上的危害, 神经安全 (Neurosecurity)、神经隐私 (Neuroprivacy)、神经保密 (Neuroconfidentiality)、脑黑客 (Brain-hacking)、神经伦理学 (Neuroethics) 等与 BCI 安全相关联的术语已经出现, 在其中选择神经安全问题和神经伦理学问题进行调查与论述<sup>[26]</sup>。

### 2.1 神经安全问题

类似于网络安全的定义, 神经安全的定义是为保护神经设备机密性、完整性与可用性, 使其免受恶意方攻击, 保护人的神经机制、神经计算与自由意志的安全. 机密性指攻击者不能利用设备属性来获取私人信息, 完整性指攻击者不能更改设

备设置或启动未经授权的操作, 可用性指攻击者不能够完全禁用设备并使其无效. 网络安全问题由于在最初设计互联网时没有得到足够重视, 已经无法圆满解决, 有了这个前车之鉴, 神经安全问题在现在这个时期就显得至关重要<sup>[27]</sup>。

想要深入了解神经安全问题, 就要先理清脑机接口功能周期, 因为在不同功能周期, 发生各种攻击的可能性和影响都不同, 笼统地在整个周期上进行描述并不准确, 2021 年, Bernal 等<sup>[26]</sup>将双向脑机接口的功能周期细分为 5 个环节, 2 个方向的循环. 如图 5 所示, 正方向循环是神经数据采集过程, 5 个环节分别为产生神经活动、获取大脑信号、对大脑信号进行向数字信号的转换、将数字信号解码为意图活动、运行应用, 同时第五个环节会对神经活动的产生具有反馈作用, 形成闭环; 反方向循环是神经刺激过程, 5 个环节分别为运行应用、将外部活动依据大脑神经细胞放电模式编码成数字信号、对数字信号进行向模拟信号的转换、对相应神经元进行电刺激、产生神经活动. 在数据采集和刺激的两个循环中, 犯罪者可能在每一个环节发起破坏神经设备机密性、完整性、可用性、安全性的攻击, 列举几个常见攻击类型, 说明其不同环节攻击神经设备对使用者造成的影响和危害, 依据神经安全问题的共性和不同攻击类型的特性, 讨论各自的解决方法。

#### 2.1.1 误导性刺激攻击

误导性刺激攻击 (Misleading stimuli attacks) 是基于神经系统特性诞生的新型攻击类型, 其他针

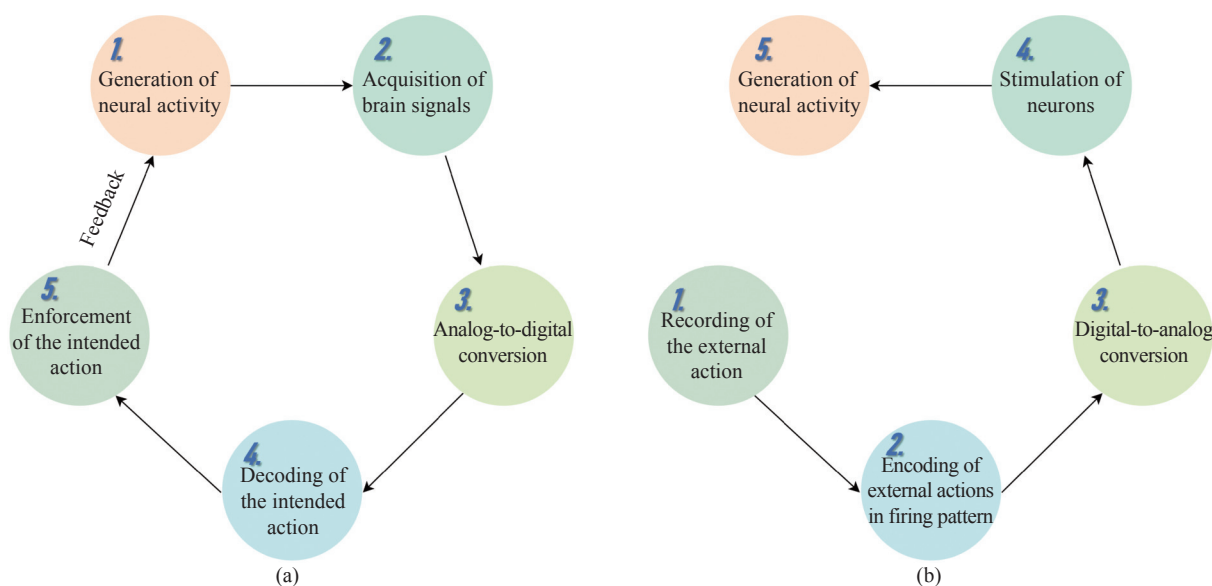


图 5 双向脑机接口功能周期. (a) 正循环; (b) 逆循环

Fig.5 Bidirectional brain-computer interface functional cycle: (a) positive cycle; (b) counter cycle



对脑机接口的攻击大多由针对计算机的攻击模仿而来,攻击主体是外部设备,误导性刺激攻击却不一样,它以产生特定神经反应为目的,向使用者提供恶意感觉或运动刺激,攻击主体是使用者的大脑.在正循环产生神经活动的环节中,刺激序列(Odd-ball paradigm)<sup>[28]</sup>、犯罪知情检测法(Guilty knowledge test)、启动效应(Priming)等方法为误导性刺激攻击提供了理论基础,刺激序列和犯罪知情检测法有着熟悉刺激与不熟悉刺激产生的反应可以相互区别开的相同原理,通过这种方式可以窃取到使用者的隐私信息或敏感数据;而启动效应的原理是利用特殊刺激让使用者产生内隐记忆效应,影响其他刺激,从而达成一种诱导效果<sup>[26]</sup>.

此外,在逆循环的每个环节中,误导性刺激攻击都有可能对神经设备使用者造成生理学上、精神病学上、心理学上的损害.第一种攻击方式通过破坏深部脑刺激(Deep brain stimulate)正常环节,过度刺激行为或阻止治疗来损伤使用者神经组织,此外,使用者本人也可能通过滥用深部脑刺激技术来刺激大脑奖励中心,获得快感或提高情绪,这将形成类似于毒品的效果,没有培训过的使用者的不规范操作可能会导致神经损坏,更何况深部脑刺激技术本就具有一定副作用;第二种攻击侧重于从精神和心理上蚕食使用者,使用恶意刺激诱发使用者产生抑郁焦虑等负面状态,这种攻击的目的是从心理上操纵使用者或者削弱其抑制力和抵抗力从而方便窃取隐私信息.其中,针对光敏性癫痫患者的攻击是元宇宙中极有可能发生的神经安全问题,一方面,元宇宙中广泛运用了VR技术,一项对老鼠的研究显示,在虚拟现实导航时,海马体(一种对空间导航很重要的颞叶结构)中脑细胞的发射频率与现实世界相比降低了68%,这对VR安全性的重要性尚不清楚,但是在VR环境中抑制性(保护性)神经元被抑制,可能增加大脑兴奋性并导致癫痫发作;另一方面,取决于不同光敏性癫痫综合征的类型,0.6%~30%的癫痫患者都具有急性光敏反应,潜在受害群体基数庞大<sup>[29]</sup>.在脑机接口神经数据采集正循环中,攻击者可以在产生神经活动环节对使用者施加可能诱发光敏性癫痫的误导性刺激,通过在获取大脑信号环节窃取脑电数据,观察有无光敏性癫痫相关脑电图特征,从而确定使用者是否有光敏性癫痫,泄露隐私疾病对使用者本人非常危险.

对于误导性刺激攻击,主要有训练神经设备使用者和控制监视神经设备两类防御手段.将人

作为预防攻击的切入点时,可以基于潜在的异常场景设计出提高使用者安全意识、训练使用者应对技能的严肃游戏;将外部设备作为预防攻击的切入点时,可以在神经设备使用过程中完全禁用当前活动不涉及的电极,将攻击风险在物理层面上控制到最小,或是使用外部的监视设备和能够探测出异常行为的机器学习系统,即时预测,拦截潜在的风险.

### 2.1.2 恶意软件攻击

恶意软件攻击(Malware attacks)是通过硬件、软件、固件,获取计算设备访问权限来故意执行恶意行为的攻击.在正循环中,恶意软件可能在除了产生神经活动的其余四个环节发起攻击,恶意软件可以在这些环节中通过掌握BCI系统完全控制权、恶意篡改前期数据或者数据与意图行为的映射方式、窃取使用者隐私数据等方式破坏神经设备完整性、机密性、可用性、安全性.在逆循环中产生的神经活动和运行应用两个环节中,恶意软件可能会窃取隐私数据.

对于恶意软件攻击,通常采用的应对措施为设置周边安全机制,如防火墙,或使用机器学习异常检测系统来识别潜在恶意软件威胁.对于能够绕过常见应对措施的恶意软件攻击,可以采用沙盒、应用程序强化、恶意软件可视化等一系列缓解技术,为研究出应对措施争取时间.

### 2.1.3 注入式攻击

注入式攻击(Injection attacks)是利用系统输入验证漏洞,向解释器提供包含可以修改其解析方式特定元素输入的攻击.注入式攻击可以发生在正循环除了产生神经活动的其余四个环节,也可能发生于逆循环中产生神经活动和运行应用两个环节中.通过对数据库中数据恶意操作,达到篡改应用功能、破坏数据库数据、窃取用户隐私数据等目标.

对于注入式攻击,通常采用严格的输入验证进行防范,或是对不同的子系统或用户进行权限管理来规避风险.

## 2.2 神经伦理学问题

学科伦理学与学科本身的整合是充满意义的,两者互相影响,促进彼此发展,伦理整合使得科学研究正确地投入现实生活中的应用和实践,使科学相关的伦理学更加贴近科学研究,做出更有意义的贡献.比如生物伦理学与生物学的整合,起初遭到了生物学领域科研人员的抵制,因为当时的生物学家们没有意识到科研成果与现实应用之间

的鸿沟,在以往的生物学领域,生物学家们将生物伦理学家视作没有话语权的“局外人”,科学家们仅采纳来自于领域内同行的评价,这种内部评价受限于对领域内权威者的尊敬和同行之间的友好氛围,而来自生物伦理学家的外部评价没有以上限制,可以直接激进地进行评价,并谈论一些内部评价不涉及的话题,比如研究目的与终极价值.科学家们慢慢意识到这种局限性,科学领域与伦理学领域最终融合达成平衡,生物学也就发展成了更加健全完整的学科<sup>[30]</sup>.

与生物伦理学相比更为年轻的神经伦理学在这几年饱受争议,2006年以来,大量神经科学家表示支持神经伦理学,美国国家卫生研究院脑计划(Brain initiative)也将神经伦理学列为重点,但是在神经伦理学整合到神经科学的过程中,出现了一系列争议性问题,列举与脑机接口技术相关度高的动物实验问题和神经技术商业化问题,讨论现有解决方案.

### 2.2.1 动物实验问题

2022年12月5日,据路透社报道,脑机接口科技公司Neuralink面临美国联邦部门审查,因为公司的动物实验涉嫌侵犯了动物福利,自2018年,该公司进行的侵入式脑机接口动物实验总共杀死了约1500只动物.公司为了快速抢占市场份额,与竞争对手Synchron分庭抗礼,拒绝了研究人员建议在动物实验之前先得到相关结论的传统实验方法,选择在完善结论之前快速连续地做动物实验,造成了大量实验动物死亡,然而它的对手Synchron公司的侵入式脑机接口研究中只有大约80只羊被杀死.

动物实验争议早就存在,2018年美国脑计划中,神经伦理学小组提出了神经伦理学路线图,其中关于动物研究的章节受到了从事非人类动物研究的科研人员反对,认为对非人类动物研究进行进一步道德调查是不必要的,拒绝神经伦理学小组过度干涉<sup>[30]</sup>.支持当前实验室研究指导方针的两个伦理框架分别是道义论与功利主义,人类实验依赖于道义论,而动物实验依赖于功利主义.2019年,有研究组织根据功利主义在动物实验领域的不足之处——实验动物受到的广泛伤害,主张使用基于道义论的动物实验方法.以非人灵长类动物实验为例,该研究组织提出,为了让生物医学研究使用非人类动物更有效,选择野生动物作为实验对象更好,野生动物生活环境复杂性更为贴近人类患者生活环境,这样尊重了实验自治原则;通过训

练实验动物,使其可以逃避实验可能造成的痛苦,尊重了实验自主原则.通过对实验范式进行改善,不仅对参与实验动物进行了尊重与保护,还提高了实验数据质量和实验结果可靠性<sup>[31]</sup>.

### 2.2.2 神经技术商业化问题

神经技术商业化问题的核心在于目标,即为什么要将这种技术商业化,提高人们对神经系统的理解这一回答并不可靠,毕竟并没有那么多人对自己大脑如何运转感兴趣.对三家典型神经技术公司NeuroSky、OpenBCI、Emotiv的脑机接口商业化产品进行调查,结果展示在表2中,目前脑机接口技术商业化领域还比较局限,更多集中于医疗领域,在其他领域的应用,比如游戏和保健领域,都是小众而不成熟的,比如Neurosky脑立方耳机系列,公司设计的应用领域是注意力训练、冥想和脑控游戏,这个系列的产品只能采集单通道数据,不具备科研级别的信号采集质量,比起实用性,更突出的是新颖性和趣味性,性价比不算高,适合娱乐和科学教育;而OpenBCI推出的一系列EEG脑电模块产品受众更为狭窄,仅限于一些本身对脑电开发感兴趣的极客,数据采集通道更多,精度更好,与此同时使用门槛也更高,对使用者硬件组装和软件编程能力都有要求,但是在软硬件方面都拥有较高开发自由度;Emotiv的产品具备高精度信号采集质量和对使用者友好的配套软硬件,更加适合于科学研究.可以看出目前脑机接口商业化产品受众限制于研究人员和科技爱好者,而此类产品相对高昂的价格进一步阻碍了其流行与传播.要改善目前情况,需要神经技术公司做好用户研究,结合现实生活中人群的广泛需求,探索更加常见、实际的应用场景,同时在数据质量、价格、成本上找到平衡点,才能设计出更符合日常生活的硬件和软件系统.

比起受众群体小和实用性不强的问题,将来更加可能普遍存在的是商业公司对用户脑电数据的隐私保护问题<sup>[32]</sup>,2019年各大科技公司开始格外重视人工智能技术带来的数据隐私问题,但是英国《卫报》在2019年的一篇文章抨击道,大型科技公司表现出的对数据伦理的关心,只是一种说服政府的方式,以此来逃避即将到来的法律监督.文章中以谷歌公司道德咨询委员会的虚有其表和不作为为例,谴责了这些大型科技公司的虚伪与贪婪,谷歌曾明确表示,它的“道德”重视“人们的权力,而不包括LGBTQ人群(Lesbians、Gays、Bisexuals、Transgender、Queer)、移民等社会少数群体

表2 神经技术商业化产品

Table 2 Neurotechnology commercialization products

Product	Company	Price/\$	Outputs (bit)	Sampling rate/Hz	Channel	Application
MindWave Mobile 2	NeuroSky	109.99	12	512	1	Games, education, wellness, research, develop
Ganglion Board	OpenBCI	499.00	24	200	4	Research, develop
Cyton Biosensing Board	OpenBCI	999.00	24	250	8	Research, develop
Cyton+Daisy Biosensing Boards	OpenBCI	1999.00	24	125/250	16	Research, develop
Insight2	Emotiv	499.00	16	128	5	Research, develop
EPOC X	Emotiv	849.00	14/16	128/256	14	Research, develop
EPOC Flex	Emotiv	1699.00 /2099.00	14/16	128	32	Research, develop

的福祉。谷歌通过各种不彻底的“道德”举措,意图让使用群体感到更加安全,没有采取任何实际措施来改善安全<sup>[33]</sup>。从这个例子可以得知,对于数据隐私问题,最彻底的解决方案就是国家出台相关法律,进行规范化管理从而保护民众数据安全。

### 3 展望未来

脑机接口中人脑到计算机的单向数据通路,从本质上,除了采集数据不同,和其他生理信号传感器没有差别,脑电信号特殊性在于包含了使用者的“意图”信息,在未来,利用特定区域和波段脑电信号,通过情感计算可以让使用者与元宇宙之间交互更加高效,创造出能够理解和适应使用者需求和情绪的虚拟空间,实现更加动态和个性化的元宇宙;通过运动想象和深度神经网络,将 EEG 信号分类并映射到元宇宙中不同行为动作,可以让残疾人士在虚拟空间里操纵化身,摆脱现有设备需要用现实中的肢体操作的限制<sup>[34]</sup>;通过将脑机接口技术和人工智能技术结合,人类智能和人工智能结合成独立统一体,元宇宙虚拟空间中的化身能够拥有现实生活中使用者同步的知觉、认知、想法与思维,通过在元宇宙中映射物理空间,使用者的化身可以辅助完成工作<sup>[35]</sup>。

脑机接口中计算机到人脑的单向数据通路,在元宇宙中主要应用场景是对嗅觉、味觉、触觉等一系列感官的模拟,今天元宇宙和真实世界交互主要依赖于视听媒体,不能够捕获和刺激嗅觉、味觉、触觉感官,沉浸感和真实感较差<sup>[36]</sup>。基于计算机到人脑的单向数据通路的感官模拟应用实例较少,因为其安全性要差于另一条数据通路,从人脑到计算机的单向数据通路不会对人体直接施加影响,计算机到人脑的单向数据却需要对人体进行谨慎、安全的电刺激。在触觉模拟领域,2020年 Ganzer 等<sup>[37]</sup>利用闭环解复用 BCI,将初级运动皮

层亚知觉信号解码为意识知觉,几乎完全恢复了脊髓损伤患者手的触觉,进而显著改善了患者运动功能;在嗅觉模拟领域,2021年 Brooks 等<sup>[38]</sup>设计出了一种外形类似于鼻环的新型嗅觉装置,横跨鼻中隔,通过刺激三叉神经来模拟或者增强嗅觉。可以窥见感官模拟技术在元宇宙中未来发展的极限,类似于假想模型缸中之脑,通过对人体进行特定电刺激来产生与真实生活完全相同的感觉,营造一种逼真的、身临其境的沉浸感。

### 4 总结

脑机接口目前在元宇宙中更多地作为生理信号采集工具,不是元宇宙交互技术的研究主流,并且在安全性和伦理道德上并不成熟。但是随着人们未来对元宇宙沉浸程度和功能上需求的增加,脑机接口技术有着独特优势和巨大应用潜力,可能成为打破元宇宙交互瓶颈的有力工具。

### 参 考 文 献

- [1] Stephenson N. *Snow Crash*. New York: Bantam Dell, 2003
- [2] Wang W X, Zhou F, Wan Y L, et al. A survey of metaverse technology. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 744  
(王文喜, 周芳, 万月亮, 等. 元宇宙技术综述. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 744)
- [3] Wolpaw J R, Birbaumer N, McFarland D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clin Neurophysiol*, 2002, 113(6): 767
- [4] Wolpaw J R, Wolpaw E W. *Brain-Computer Interfaces*. Oxford: Oxford University Press, 2012
- [5] Aricò P, Sciaraffa N, Babiloni F. Brain-computer interfaces: Toward a daily life employment. *Brain Sci*, 2020, 10(3): 157
- [6] Wang Z H, Yu Y, Xu M, et al. Towards a hybrid BCI gaming paradigm based on motor imagery and SSVEP. *Int J Human-computer Interact*, 2019, 35(3): 197
- [7] Cheng Q M. Structural forms of metaverse and the characteristics of metaverse art. *J Zhejiang Shuren Univ*, 2022, 22(4): 78

- (成乔明. 元宇宙的结构形态与艺术特征探析. *浙江树人大学学报*, 2022, 22(4): 78)
- [8] Christiane Paul. *A Companion to Digital Art*. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2016: 146
- [9] Lin C T, Rajapakse R P C J, Tokuyama Y. Development of EEG data-driven generative art application for real-time and dynamic interaction. *J Robotics Netw Artif Life*, 2021, 8(2): 117
- [10] Lee L H, Lin Z J, Hu R, et al. When creators meet the metaverse: A survey on computational arts [J/OL]. *arXiv preprint* (2021-11-26) [2023-2-15]. <https://arxiv.org/abs/2111.13486>
- [11] Gao F. Meta-universe—a new ecology for the future development of computing art. *Art Obs*, 2022(4): 24  
(高峰. 元宇宙——未来计算艺术发展的新生态. *美术观察*, 2022(4): 24)
- [12] Sun M T, Yang D W, Xie L S, et al. Research progress on the application of metaverse in chronic diseases health management. *Fudan Univ J Med Sci*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1885.R.20230312.2036.006.html>  
(孙梦婷, 杨达伟, 谢林杉, 等. 元宇宙医学在慢性疾病健康管理中应用的研究进展. *复旦学报(医学版)*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1885.R.20230312.2036.006.html>)
- [13] Susi T, Johannesson M, Backlund P. *Serious Games: An Overview*. Skovde: Institutionen for Kommunikation Och Information, 2007: 28
- [14] Hepburn S. Early Intensive Behavioral Intervention (EIBI). *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders*. 2nd Ed. London: Springer International Publishing, 2021
- [15] Mesa-Gresa P, Gil-Gómez H, Lozano-Quilis J A, et al. Effectiveness of virtual reality for children and adolescents with autism spectrum disorder: An evidence-based systematic review. *Sensors*, 2018, 18(8): 2486
- [16] Bozgeyikli L, Raij A, Katkooi S, et al. A survey on virtual reality for individuals with autism spectrum disorder: Design considerations. *IEEE Trans Learn Technol*, 2018, 11(2): 133
- [17] Chen J, Du Y S. Advances on the application of immersive virtual reality technology in the treatment of autism spectrum disorders. *Chin J Child Health*, 2020, 28(5): 543  
(陈静, 杜亚松. 沉浸式虚拟现实技术在孤独症谱系障碍治疗中的应用进展. *中国儿童保健杂志*, 2020, 28(5): 543)
- [18] Cevette M J, Stepanek J, Cocco D, et al. Oculo-vestibular recoupling using galvanic vestibular stimulation to mitigate simulator sickness. *Aviat Space Environ Med*, 2012, 83(6): 549
- [19] Oberman L M, Hubbard E M, Mcleery J P, et al. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*, 2005, 24(2): 190
- [20] Livingston L A, Colvert E, Bolton P, et al. Good social skills despite poor theory of mind: Exploring compensation in autism spectrum disorder. *J Child Psychol Psychiatry*, 2019, 60(1): 102
- [21] Robles M, Namdarian N, Otto J, et al. A virtual reality based system for the screening and classification of autism. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2022, 28(5): 2168
- [22] Cheng R Z, Wu N, Varvello M, et al. Are we ready for metaverse? A measurement study of social virtual reality platforms // *Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference*. Nice, 2022: 504
- [23] Song T F, Zheng W M, Song P, et al. EEG emotion recognition using dynamical graph convolutional neural networks. *IEEE Trans Affect Comput*, 2020, 11(3): 532
- [24] Allison B, Luth T, Valbuena D, et al. BCI demographics: How many (and what kinds of) people can use an SSVEP BCI? *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2010, 18(2): 107
- [25] Picard R W. *Affective Computing*. Cambridge: MIT press, 2000
- [26] Bernal S L, Celdrán A H, Pérez G M, et al. Security in brain-computer interfaces: State-of-the-art, opportunities, and future challenges. *ACM Comput Surv*, 2020, 54(1): 1
- [27] Denning T, Matsuoka Y, Kohno T. Neurosecurity: Security and privacy for neural devices. *Neurosurg Focus*, 2009, 27(1): E7
- [28] Hu R, Zhang L Q, Meng P, et al. The neural responses of visual complexity in the oddball paradigm: An ERP study. *Brain Sci*, 2022, 12(4): 447
- [29] Fisher R S, Acharya J N, Baumer F M, et al. Visually sensitive seizures: An updated review by the Epilepsy Foundation. *Epilepsia*, 2022, 63(4): 739
- [30] Chiong W. Insiders and outsiders: Lessons for neuroethics from the history of bioethics. *AJOB Neurosci*, 2020, 11(3): 155
- [31] Carvalho C, Gaspar A, Knight A, et al. Ethical and scientific pitfalls concerning laboratory research with non-human primates, and possible solutions. *Animals*, 2018, 9(1): 12
- [32] Ning H S, Tian Q H, Li S. Metaverse social governance. *J Chongqing Univ Posts and Telecommun Soc Sci Ed*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1180.C.20221123.1513.004.html>  
(宁焕生, 田巧惠, 李莎. 元宇宙社会治理. *重庆邮电大学学报(社会科学版)*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1180.C.20221123.1513.004.html>)
- [33] Naughton J. Are big tech's efforts to show it cares about data ethics another diversion? *The Guardian*, 2019, 7: 1
- [34] Al-Saegh A, Dawwd S A, Abdul-Jabbar J M. Deep learning for motor imagery EEG-based classification: A review. *Biomed Signal Process Control*, 2021, 63: 102172
- [35] Shi F F, Zhou F, Liu H, et al. Survey and tutorial on hybrid human-artificial intelligence. *Tsinghua Sci Technol*, 2022, 28(3): 486
- [36] Panagiotakopoulos D, Marentakis G, Metzidakos R, et al. Digital scent technology: Toward the Internet of senses and the metaverse. *Prof*, 2022, 24(3): 52
- [37] Ganzer P D, Colachis S C, Schwemmer M A, et al. Restoring the sense of touch using a sensorimotor demultiplexing neural interface. *Cell*, 2020, 181(4): 763
- [38] Brooks J, Teng S Y, Wen J, et al. Stereo-smell via electrical trigeminal stimulation // *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Yokohama, 2021: 1