

DOI:10.61189/317113svhrny

· 综述 ·

## 元宇宙技术在脑卒中患者康复治疗中的作用

张振鹏<sup>1</sup>, 王 源<sup>2</sup>, 杨达伟<sup>2,3,4,5,6\*</sup>

1. 复旦大学上海医学院公共卫生学院, 上海 200032
2. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032
3. 复旦大学附属中山医院厦门医院呼吸与危重症医学科, 厦门 361015
4. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032
5. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032
6. 中国肺癌防治联盟, 上海 200032

**[摘要]** 元宇宙是融合多项数字化技术创造的虚拟现实世界及人机交换系统, 它正在推动医疗行业的创新和发展, 并可能给神经康复领域带来颠覆性转变。本文综述了虚拟现实及脑机接口技术在脑卒中患者肢体运动康复中的研究, 旨在为临床康复治疗及基础研究提供思路。

**[关键词]** 元宇宙; 虚拟现实; 脑机接口; 脑卒中

**[中图分类号]** R-1 **[文献标志码]** A

### The role of metaverse in the rehabilitation of stroke patients

ZHANG Zhenpeng<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>, YANG Dawei<sup>2,3,4,5,6\*</sup>

1. Shanghai Medical School, Fudan University, Shanghai 200032, China
2. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China
3. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Xiamen Branch, Zhongshan Hospital, Fudan University, Xiamen 361015, Fujian, China
4. Shanghai Center for Medical Engineering and Technology, Shanghai 200032, China
5. Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Shanghai 200032, China
6. Chinese Alliance Against Lung Cancer, Shanghai 200032, China

**[Abstract]** Metaverse, a virtual reality world and human-computer exchange system created by integrating several digital technologies, is driving innovation and development in the healthcare industry and may bring disruptive shifts in the field of neurorehabilitation. This article reviews the research of virtual reality and brain-computer interface technology in the limb movement rehabilitation of stroke patients, in order to provide ideas for clinical rehabilitation treatment and basic research.

**[Key Words]** metaverse; virtual reality; brain computer interface; stroke

元宇宙(metaverse)是一个与现实世界相平行的数字化空间, 用户可以使用数字的身份进入其中, 获得身临其境的感受, 建立社会和开展活动, 实现虚拟世界和现实世界的交互。从技术角度看元宇宙是整合多种新技术如虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)、数字孪生、区块链、人工智能等技术而创建的虚拟、现实相融

合的互联网应用和社会形态<sup>[1]</sup>。

随着数字化应用技术的发展和完善, 元宇宙在许多方面都有广阔的应用前景, 医疗行业也不例外, 远程医疗、健康管理、医疗教育和培训、临床实践、神经康复、科研等领域正在进行着不断的实践和探索<sup>[2-3]</sup>。现在用于医学的元宇宙技术主要有VR、AR、脑机接口(brain computer interface, BCI)等。

**[收稿日期]** 2024-12-05

**[接受日期]** 2024-12-25

**[基金项目]** 上海市健康科普人才能力提升专项(青年专项)(JKKPYC-2023-A20), 上海高校市级重点课程(FDSHZD202409), 上海市科学技术委员会项目基金(20DZ2254400)。Supported by Project of Promoting Ability of Medical Science Popularization for Young Talents in Shanghai (JKKPYC-2023-A20), Shanghai Municipal Key Courses (FDSHZD202409), Fund of Shanghai Municipal Commission of Science and Technology (20DZ2254400)

**[作者简介]** 张振鹏. E-mail: 23301020010@m.fudan.edu.cn

\*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: yang.dawei@zs-hospital.sh.cn

VR、AR可以让置身于虚拟场景中的用户获得更真实、生动的沉浸式体验,并与虚拟场景进行人机交互,同时它还具有设备轻便易携,虚拟场景可随时随地生成等优点<sup>[4]</sup>。因此白春学教授<sup>[5]</sup>认为元宇宙医学就是通过AR、VR眼镜进行实践的物联网医学。由此可见VR是目前常用的元宇宙医疗技术。

BCI技术是一种在人或动物大脑与外部设备之间建立直接连接,实现信息交换的技术<sup>[6]</sup>。脑卒中是一种由脑缺血或脑出血等血管性原因引起的神经系统疾病,会导致单侧肢体无力、麻木、共济失调、眩晕、平衡障碍等,严重影响患者的日常活动能力和生活质量,是目前世界上成人致残的主要原因<sup>[7]</sup>。患者尽早进行康复治疗可以促进机体功能恢复,预防并发症及提高生活质量。传统康复治疗中,患者通常需要进行一些重复性的训练,以帮助他们恢复功能。但这些训练往往是枯燥乏味的,缺乏动力和挑战性,导致许多患者的康复进程缓慢。VR和BCI技术为脑卒中患者的康复提供了创新手段,有助于提升康复效果,改善患者生活质量。本文通过相关文献的检索和分析探讨VR和BCI技术在脑卒中后患者康复治疗中的作用、限制条件和未来前景。

## 1 VR技术在脑卒中患者康复治疗中的作用

1.1 基于VR的治疗对上肢运动功能康复的积极作用 VR技术可以为康复治疗带来新体验和更有趣的方式<sup>[8]</sup>。通过模拟不同的场景和挑战,患者可以更加积极地参与治疗,同时具有跟踪功能的VR系统可让治疗师实时跟踪患者的进展,具有远程和家庭治疗的灵活性<sup>[9]</sup>。另外,在VR技术创建的虚拟康复场景中,可以对运动的内容、持续时间和强度进行操控,甚至可以获得及时的反馈,从而为患者提供充分的个性化治疗方案<sup>[10]</sup>。大量研究<sup>[11]</sup>证实,基于VR的康复训练对脑卒中患者的上肢运动功能障碍具有更积极的治疗效果。

Chen等<sup>[12]</sup>最近的综述认为当下对于脑卒中后VR支持康复的一些文献分组标准不够精确,治疗效果的评判标准不够全面。因此他们选取了43项符合条件的实验进行分析,所有实验均分成两组:对照组使用传统疗法或不使用任何疗法,干预组单独使用或结合VR支持运动疗法。其结果显示:干预组与对照组相比,患者上肢运动功能(采用Fugl-Meyer运动功能评分量表评估)和上肢活动范围(使用量角器检测)得到显著改善。

手部运动功能的提升,对提高生活质量至关重要。

但是,VR支持的运动疗法并没有显著改善患者的手部运动功能。因此,许多研究者将目光聚焦于手部运动功能改善的研究。Faisal<sup>[13]</sup>等开发了针对改善手部运动功能的VR游戏,这些游戏包括屈伸、闭合/张开、旋前/旋后和捏握动作的训练,同时还要保证认知的参与和视觉反馈元素的体现。实验结果显示,在评估周内,两组患者在所有临床疗效评估指标上的表现均有改善。实验组患者由于VR游戏的沉浸式体验,其改善效果更为显著。

1.2 VR技术在下肢功能康复治疗中的作用 脑卒中下肢运动功能的恢复一直是康复治疗中的难题,超过50%的患者在接受常规康复治疗后仍存在行走困难<sup>[14]</sup>。近年来,机器人辅助步态训练大多用于下肢运动康复的研究<sup>[15-17]</sup>。研究结果均认为这种治疗方式能明显提升患者的平衡能力,但对步速、步频等其它方面的疗效存在争议。以往的机器人辅助步态训练只是简单的行走训练,治疗效果欠佳,因此研究人员一直在尝试新的治疗手段。有研究者<sup>[18]</sup>提出将VR技术引入到这个训练中,以提供三维立体虚拟场景及多感官刺激反馈,引发受损神经回路的重塑,达到提升下肢运动功能的目的。Kayabinar等<sup>[18]</sup>利用虚拟现实结合机器人辅助步态训练,让中风后下肢偏瘫患者同时完成运动和认知多重任务。然而,研究结果表明,在下肢功能康复效果方面,联合训练结果并未优于单纯的机器人辅助训练。可见目前的VR技术仍难以达到理想的康复效果,下肢运动功能康复领域需要融合更先进的元宇宙技术。

## 2 BCI对脑卒中患者肢体运动功能康复的有效性

虽然研究<sup>[19]</sup>已经证明了基于神经科学原理的VR对患者康复的积极影响,并在卒中人群中证明了其有效性,但丧失主动运动功能的患者仍无法从当前的VR技术中获益。因此,BCI技术应运而生。BCI技术通过在用户大脑和计算机系统之间建立一个替代路径,可以直接训练中枢神经系统:其通过检测和解码大脑信号,获得使用者的潜在意图,并将其转化为控制外部世界的指令,然后将指令传输给执行特定任务的应用程序,从而建立大脑与任何外部设备之间的直接通信<sup>[20]</sup>。这就避免了使用正常的神经肌肉通路,令更多患者获益。

BCI应用路径包括信号采集、解码和处理,转换成指令传输到效应器,以执行相关功能。并且会向用户提供视觉、听觉、触觉形式的感官反馈<sup>[21]</sup>。数据信号的采集方式有很多种,如头皮脑电图

(electroencephalography, EEG)、脑皮层电图(electrocorticography, ECoG)、微电极和磁共振功能成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)等。其中EEG安全、无创,是神经康复常用的脑机接口数据采集方式<sup>[22]</sup>。BCI应用程序的主要目的是诱导脑活动模式的可塑性重构或通过辅助设备的控制来增强或恢复运动功能<sup>[23]</sup>,因此可分为两个方面应用——与运动意象(motor imagery, MI)有关的应用及以辅助运动为目的的应用。

**2.1 与MI有关的应用** MI是指想象自己身体部位的运动而不实际移动该部位的认知过程。MI是脑机接口的主要范式之一,被广泛应用于运动神经康复中<sup>[24]</sup>。当患者想象正确动作时,通过特定电极检测到相应的脑电信号,再经人工智能解码,转换成指令在瘫痪肢体上实行运动治疗。肢体的动作提供了大量本体感觉再传回中枢,形成中枢—外周—中枢闭环模式。基于运动想象的BCI可以通过主动运动意图内源性调动受损区及周围区域神经细胞的兴奋性,促进受损细胞的修复及控制感觉及运动系统的神经网络进行重构。一些研究小组<sup>[24-26]</sup>已经测试了基于MI的BCI技术在卒中康复中的适用性,并证明其临床改善效果。例如Miao等<sup>[27]</sup>使用了一套recoveryiX系统,该系统的运作包括向用户发送声音和视觉信号,作为执行手腕背屈的指令,同时镜像模拟手部动作。研究结果显示,使用该系统的患者的康复效果更好。此外,许多研究<sup>[28-29]</sup>证实基于运动想象的脑机接口控制的电刺激康复治疗(BCI-FES系统)可以促进脑卒中偏瘫患者下肢运动功能的改善。当用户得到指令,进行想象运动时,

就会激活功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES),以辅助引发手腕背屈。

**2.2 以辅助运动为目的的应用** 可穿戴机器人(如神经外骨骼,3D机械手等)的发展,为BCI在临床神经康复中的应用提供了新的治疗策略<sup>[30]</sup>。通过将大脑活动转化成可穿戴机器人的控制信号,提供辅助肢体运动的支持,实现功能的替代,达到自主生活能力的提升的目的。BCI-FES系统就是BCI辅助应用的良好实例。

综上所述,脑机接口技术与虚拟现实技术在技术呈现、适用患者的范围,康复模式和治疗效果等方面均有不同(表1)。BCI技术通过直接读取和解码脑电波,发出自主运动指令,驱动外部设备,帮助肢体进行主动性运动训练,避免了习惯性废用产生的代偿性运动。代偿性运动是指受损肢体完成某项动作时,由周围健康的部位代替它工作,补偿缺失的功能。代偿性康复错误的利用大脑的可塑性,长期会产生危害。因此BCI比VR技术更精准和高效,可以提供更个性化和精确化的治疗方案,同时也为无残存肢体运动功能的患者带来新的康复模式。相对于VR干预治疗效果不佳的下肢运动功能,接受BCI训练的患者在步频、步速等功能方面均有明显改善,可见BCI在神经康复领域存在优良的应用前景。有的学者<sup>[31]</sup>认为VR是元宇宙的初步体验方式,BCI才是元宇宙的终极形态。但许多基于MI的BCI用于康复治疗的研究大多采用VR技术构建视频系统,因此多种数字应用技术的融合不仅是元宇宙本身的技术特征,也是未来的发展方向。

表1 虚拟现实技术与脑机接口技术的比较

|         | 虚拟现实技术               | 脑机接口技术                            |
|---------|----------------------|-----------------------------------|
| 技术呈现    | 三维立体空间、全真感官体验、实时人机交互 | 大脑皮层活动信号的采集、处理、转化和执行并将神经反馈信号传输回大脑 |
| 适用患者    | 具有残余运动功能的患者          | 可适用于运动功能十分受限或无运动功能的患者             |
| 康复模式    | 主动性康复和代偿性康复          | 完全主动性康复                           |
| 个性化和精准化 | 可实现个性化康复             | 更好的个性化和精准化康复                      |
| 下肢运动功能  | 步数、步频改善不明显           | 步数、步频明显提升                         |

### 3 VR技术及BCI技术在神经康复方面的局限性

目前,元宇宙技术在医学领域的应用仍存在一定的局限性,面临诸多挑战。其中主要是技术的局限性,VR技术所创建的虚拟重构场景的现实性取决于建模精度和性能的优化和稳定,因此的患者设

备的价格较高,技术开发和维护的成本也高。同时,由于虚拟视觉效果和现实身体状态的差异,会使一些患者产生视觉延迟、视觉疲劳和眩晕。长期使用虚拟设备还能使一些人现实世界的感知度下降,对虚拟世界产生依赖,所有这些都限制了VR技术的大面积推广和使用。

BCI技术面临最大的难题是在人的大脑和计算机之间建立一个可靠的接口。目前常用的非侵入方法如脑电图等,因颅骨的干扰,存在信号质量和稳定性方面的缺陷;而侵入式脑机接口是指通过手术等方式直接将电极插入大脑皮质中,这样可以获得高质量的神经信号,但存在很高的安全风险,可能引起严重并发症。此外,高昂的治疗成本也一直是BCI技术难以广泛应用的关键。

#### 4 总结及展望

目前的研究表明,VR技术支持的康复治疗对上肢运动功能和运动范围具有显著的改善;而BCI技术可适用于脑卒中后运动功能十分受限或无运动功能的患者,对改善下肢运动功能效果明显。但本文参考的文献具有局限性,对于证据质量较低的结果还需要更多的研究以验证相关结果。

综上所述,元宇宙构建的虚拟空间打破现实世界对时空、资源的限制,颠覆性提高医疗效率,降低医疗成本,进一步促进了医疗领域的创新与发展。Neralink<sup>[32-33]</sup>首次人体临床实验的成功更是神经康复领域里程碑式的突破,将为那些失去正常生活能力的患者带来希望。在这个科技高速发展的时代,元宇宙技术在医疗领域的发展,必将会给更多人带来健康的收益。

**伦理声明** 无。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突。

**作者贡献** 张振鹏、王源:撰写文章;杨达伟:修改文章。

#### 参考文献

- [1] 曹秀莲. 元宇宙安全生产现状调研与安全风险研究[J]. 中国信息安全, 2022, 6: 90-93.
- [2] CHENGODEN R, VICTOR N, HUYNH-THE T, et al. Metaverse for healthcare: a survey on potential applications, challenges and future directions[J]. IEEE Access, 2023, 11: 12765-12795.
- [3] YANG D W, ZHOU J, CHEN R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. Clin eHealth, 2022, 5: 1-9.
- [4] HAMAD A, JIA B C. How virtual reality technology has changed our lives: an overview of the current and potential applications and limitations[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(18): 11278.
- [5] 白春学. 未来已来——我们需要的云宇宙医学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2022.
- [6] 周慧琳, 徐佳琳, 左长城. 基于认知脑区的脑-机接口技术及其在康复中的应用研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(5): 799-804.
- [7] ERRANTE A, SAVIOLA D, CANTONI M, et al. Effectiveness of action observation therapy based on virtual reality technology in the motor rehabilitation of paretic stroke patients: a randomized clinical trial[J]. BMC Neurol, 2022, 22(1): 109.
- [8] ZHANG C J, YU S R. The technology to enhance patient motivation in virtual reality rehabilitation: a review[J]. Games Health J, 2024, 13(4): 215-233.
- [9] TRUIJEN S, ABDULLAHI A, BIJSTERBOSCH D, et al. Effect of home-based virtual reality training and telerehabilitation on balance in individuals with Parkinson disease, multiple sclerosis, and stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. Neurol Sci, 2022, 43(5): 2995-3006.
- [10] MANI BHARATHI V, MANIMEGALAI P, GEORGE S T, et al. A systematic review of techniques and clinical evidence to adopt virtual reality in post-stroke upper limb rehabilitation[J]. Virtual Real, 2024, 28(4): 172.
- [11] AMINOV A, ROGERS J M, MIDDLETON S, et al. What do randomized controlled trials say about virtual rehabilitation in stroke? A systematic literature review and meta-analysis of upper-limb and cognitive outcomes[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15(1): 29.
- [12] CHEN J Y, OR C K, CHEN T R. Effectiveness of using virtual reality-supported exercise therapy for upper extremity motor rehabilitation in patients with stroke: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. J Med Internet Res, 2022, 24(6): e24111.
- [13] AMIN F, WARIS A, SYED S, et al. Effectiveness of immersive virtual reality-based hand rehabilitation games for improving hand motor functions in subacute stroke patients[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2024, 32: 2060-2069.
- [14] OH Z H, LIU C H, HSU C W, et al. Mirror therapy combined with neuromuscular electrical stimulation for poststroke lower extremity motor function recovery: a systematic review and meta-analysis[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 20018.
- [15] CHEN S S, ZHANG W Y, WANG D Y, et al. How robot-assisted gait training affects gait ability, balance and kinematic parameters after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2024, 60(3): 400-411.
- [16] CORBETTA D, IMERI F, GATTI R. Rehabilitation that incorporates virtual reality is more effective than standard rehabilitation for improving walking speed, balance and mobility after stroke: a systematic review[J]. J Physiother, 2015, 61(3): 117-124.
- [17] ZHOU Z Q, HUA X Y, WU J J, et al. Combined robot motor assistance with neural circuit-based virtual reality (NeuCir-VR) lower extremity rehabilitation training in patients after stroke: a study protocol for a single-centre randomised controlled trial[J]. BMJ Open, 2022, 12(12): e064926.
- [18] KAYABINAR B, ALEMDAROĞLU-GÜRBÜZ İ, YILMAZ Ö. The effects of virtual reality augmented robot-assisted gait training on dual-task performance and functional measures in chronic stroke: a randomized controlled single-blind trial[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2021, 57(2): 227-237.
- [19] KHAN A, IMAM Y Z, MUNEEB M, et al. Virtual reality in

- stroke recovery: a meta-review of systematic reviews [J]. *Bioelectron Med*, 2024, 10(1): 23.
- [20] HRAMOV A E, MAKSIMENKO V A, PISARCHIK A N. Physical principles of brain - computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states[J]. *Phys Rep*, 2021, 918: 1-133.
- [21] FLEURY M, LIOI G, BARILLOT C, et al. A survey on the use of haptic feedback for brain-computer interfaces and neurofeedback[J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 528.
- [22] TSIAMALOU A, DARDIOTIS E, PATERAKIS K, et al. EEG in neurorehabilitation: a bibliometric analysis and content review [J]. *Neurol Int*, 2022, 14(4): 1046-1061.
- [23] SAHA S, MAMUN K A, AHMED K, et al. Progress in brain computer interface: challenges and opportunities[J]. *Front Syst Neurosci*, 2021, 15: 578875.
- [24] WANG A X, TIAN X, JIANG D, et al. Rehabilitation with brain-computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: a randomized controlled trial[J]. *Med*, 2024, 5(6): 559-569. e4.
- [25] MA Z Z, WU J J, CAO Z, et al. Motor imagery-based brain-computer interface rehabilitation programs enhance upper extremity performance and cortical activation in stroke patients [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 91.
- [26] LIU X L, ZHANG W D, LI W B, et al. Effects of motor imagery based brain-computer interface on upper limb function and attention in stroke patients with hemiplegia: a randomized controlled trial[J]. *BMC Neurol*, 2023, 23(1): 136.
- [27] MIAO Y Y, CHEN S G, ZHANG X R, et al. BCI-based rehabilitation on the stroke in sequela stage[J]. *Neural Plast*, 2020, 2020: 8882764.
- [28] LUO X. Effects of motor imagery-based brain-computer interface-controlled electrical stimulation on lower limb function in hemiplegic patients in the acute phase of stroke: a randomized controlled study [J]. *Front Neurol*, 2024, 15: 1394424.
- [29] REN S X, WANG W Q, HOU Z G, et al. Enhanced motor imagery based brain- computer interface via FES and VR for lower limbs[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(8): 1846-1855.
- [30] COLUCCI A, VERMEHREN M, CAVALLO A, et al. Brain-computer interface-controlled exoskeletons in clinical neurorehabilitation: ready or not? [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2022, 36(12): 747-756.
- [31] ZHU H Y, HIEU N Q, HOANG D T, et al. A human-centric metaverse enabled by brain-computer interface: a survey[J]. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2024, 26(3): 2120-2145.
- [32] SEBASTIÁN-ROMAGOSA M, CHO W, ORTNER R, et al. Brain-computer interface treatment for gait rehabilitation in stroke patients[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1256077.
- [33] EVERARD G, DECLERCK L, DETREMBLEUR C, et al. New technologies promoting active upper limb rehabilitation after stroke: an overview and network meta-analysis[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2022, 58(4): 530-548.

#### 引用本文

张振鹏,王 源,杨达伟. 元宇宙技术在脑卒中患者康复治疗中的作用[J]. *元宇宙医学*, 2024, 1(4): 32-36.

ZHANG Z P, WANG Y, YANG D W. The role of metaverse in the rehabilitation of stroke patients[J]. *Metaverse Med*, 2024, 1(4): 32-36.