

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2024.01.001

具身认知的内在神经机制及工程应用研究进展

戚文静, 随力, 龚瑾, 左明亮

(上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093)

【摘要】具身认知理论认为, 人的认知过程是通过身体和环境的互动建构的, 强调身体和环境对认知过程有重要影响。目前具身认知已广泛应用于虚拟现实、人机交互和智能机器人等领域。该文归纳了具身认知的内在神经机制, 强调了具身认知与脑内镜像神经系统的激活、刺激-反应兼容性效应及错觉的产生有关, 总结了基于具身认知的具身技术在虚拟现实、增强现实和脑机接口等领域的相关研究与应用, 阐述了几种应用于人机交互领域和具身认知相关的脑电信号, 最后在未来发展方向和发展趋势方面对具身认知和实现具身的技术手段进行了展望。

【关键词】具身认知; 虚拟具身; 虚拟现实; 脑机接口

【中图分类号】R318、TP391.9

【文献标志码】A

文章编号: 1674-1242 (2024) 01-0001-08

Research Progress on the Intrinsic Neural Mechanism and Engineering Application of Embodied Cognition

QI Wenjing, SUI Li, GONG Jin, ZUO Mingliang

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】The theory of embodied cognition considers that the human cognitive process is constructed through the interaction between the body and the environment, emphasizing that the body and the environment have an important influence on the cognitive process. Embodied cognition has now been widely applied to the fields of virtual reality, human-computer interaction, and intelligent robotics. This review summarizes that the activation of the mirror neuron system, the compatibility effects of stimulus-response, and the production of illusions may underlie neural mechanisms of embodied cognition. In addition, the application of embodied technology, which is based on embodied cognition, in the fields of virtual reality, augmented reality, and brain-computer interface is summarized. Several brain electrical signals that are related to embodied cognition and have been applied in human-computer interaction are presented. The future research direction and trend in embodied cognition and embodied technology are finally provided.

【Key words】Embodied Cognition; Virtual Embodiment; Virtual Reality; Brain-computer Interface

0 引言

“具身” (Embodiment) 指个体在认知过程中

将自己的身体投射到周围世界中, 使自己成为所处环境的一部分。具身认知可以从狭义和广义两个维

收稿日期: 2023-09-13。

基金项目: 上海理工大学科技发展项目 (2019KJFZ239、2020KJFZ232)。

作者简介: 戚文静, 硕士研究生, 研究方向: 生物医学工程, 邮箱 (E-mail): qiwenjing516@163.com。

通信作者: 随力, 教授, 研究方向: 神经工程, 邮箱 (E-mail): lsui@usst.edu.cn。

度来理解。狭义的具身认知指的是寓于人的身体中的认知，广义的具身认知泛指可以寓于人工身体中或身体的代理中的认知。具身认知理论认为，认知活动发生在真实的社会情境中，是人们对概念、物体、事物的表征，通常包括感知、体感和运动体验，具有实践性本质，其核心是将感觉、记忆、运动经验痕迹构成心理模拟基础^[1]。它提出语言理解涉及大脑中特定的感觉运动系统^[2]，身体以各种文化技能和图式的方式积极而有意义地与环境互动，同时塑造文化实践^[3]，从而获得认知，而非仅依靠大脑内部的符号处理。个体的身体、感官、运动能力在感知、思考和情感体验中不可或缺，它们共同构成了人类的认知经验。因此，具身认知的作用是将人的身体感受和行为与周围世界紧密地联系在一起，从而不断地影响人的认知和情感体验。具身认知是人类复杂的认知模式之一。近年来，科研人员采用多种研究手段来揭示具身认知的神经机制，并在具身认知神经机制的基础上，将具身认知应用于工程领域，不仅包括虚拟现实和增强现实领域，还包括脑机接口等领域。通过将身体和感知能力融入技术设计中，能够为人类社会带来更多的可能性，推动工程领域的创新和发展。本文归纳和总结了近年来具身认知的神经机制和工程应用方面的研究进展。

1 具身认知的神经机制

1.1 镜像神经元系统的激活

灵长类动物和人类的脑内均存在镜像神经元系统 (Mirror Neuron System, MNS)。灵长类动物 (如猴子) 的 MNS 由运动前皮层的 F5 区和顶下小叶两个皮层区域的镜像神经元 (Mirror Neurons, MNs) 构成，人类的 MNS 由大脑左前额叶皮层的布洛卡区后部、运动前皮层、顶下小叶和顶叶前沟的 MNs 构成^[4]。无论是灵长类动物还是人类，处理与动作相关的信息时，脑内的 MNS 都会被激活，MNS 映射了观察到的行为和执行的行为之间的对应关系^[5-7]。早期有关猴子的研究显示，动物执行动作时，MNs 兴奋了，在没有执行动作，仅观察类似动作时，MNs 也兴奋了^[8,9]，一个典型的例子就是当猴子抓住一个物体时，以及当猴子被动地观察实验人员用手抓住这个物体时，猴子脑中同一部位 MNs

的放电都增加了。人类的脑内同样存在 MNS，无创性脑成像显示，人在观察物体、抓取物体和理解物体的过程中，MNS 脑区的脑血流量增加了，即 MNS 脑区被激活了^[10,11]。

许多研究表明，在具身认知过程中存在 MNS 的激活，因此推断 MNS 的激活可能是具身认知的一种神经机制。人类对动作词的语言处理与加工方面的研究表明，具身认知的神经机制和 MNS 的激活有密切的关系，脑在处理不同语义的动作词时，脑电图 (Electroencephalogram, EEG) 200ms 左右时前额中央区域的激活存在差异^[12]，阅读涉及身体动作的相关词句时可以激活运动皮层^[13]。Hauk 等^[14]采用功能磁共振成像技术研究了被动阅读任务实验中脑的活动情况，比较了涉及腿部、手臂或面部动作的动作词 (如踢、抓或舔) 的阅读和实际用相应的身体部位进行动作时的大脑活动，发现阅读涉及不同身体部位的动作词会以“具身化”的方式激活前运动区和额叶区，这些动作词所引起的脑激活区域要么直接邻近实际运动激活区域，要么与实际运动激活区域重叠^[15]。阅读这些在语义上与身体运动部位相关的词语时，参与身体部位运动的区域也会变得活跃，这种阅读时被激活的神经通路同实际执行这些动作时被激活的神经通路相同。Rizzolatti 等^[16]的相关研究表明，MNS 在具身认知过程中通过将观察到的动作映射到自身的运动表征上理解动作，这种 MNS 激活神经机制可以较好地诠释具身认知中行为理解、语言和社会认知等领域的神经现象。这种 MNS 的激活可能不仅是运动表征的再现，还可能涉及情感和意图等其他因素。

不可否认，MNS 目前无法解释脑的一些高级认知过程，如对抽象概念的理解^[17]，因此对具身认知中的 MNS 激活这一神经机制的适用范围仍需进一步研究和探讨。

临床研究表明，一些神经系统疾病表现出具身认知功能异常，并且这种具身认知功能的异常可能和 MNS 的功能异常有关，这也从另一个方面表明了具身认知的内在神经机制和 MNS 激活之间有密切的关系。与具身认知和 MNS 功能异常相关的神经系统疾病如表 1 所示。

表1 与具身认知和MNS功能异常相关的神经系统疾病

Tab.1 Neurological disorders associated with embodied cognition and MNS

疾病名称	临床表现	MNS功能异常的原因
帕金森病 ^[18]	失去对运动的自主控制, 症状包括静止时震颤、姿势不稳定和运动迟缓	镜像神经系统功能退化
肌萎缩侧索硬化 ^[19]	上下运动神经元进行性退行性变, 运动强度丧失	初级运动皮层(如运动联合区)功能退化
阿尔兹海默病 ^[20]	记忆力减退, 认知功能障碍	镜像神经系统激活异常
失语症 ^[21]	语言理解及表达障碍, 哑剧识别缺陷	布洛卡区损伤
自闭症 ^[22]	社会交往与沟通障碍, 刻板行为和兴趣	运动皮层和颞叶皮层功能异常

1.2 刺激 – 反应兼容性效应

具身隐喻理论指人们在理解隐喻时, 会将抽象的概念映射到具体的身体经验中, 从而更好地理解记忆。这一理论认为人类的身体经验和感知是构建、理解语言与思维的基础。人们在理解具身相关隐喻的过程中, 会激活与隐喻相关的神经机制, 从而更好地理解隐喻的含义。具身认知的神经机制之一是具身隐喻理论中的刺激 – 反应兼容性 (Stimulus Response Compatibility, SRC) 效应, 也称西蒙效应 (Simon Effect), 该效应指的是刺激与反应在空间、运动或概念上的关系与人的习惯或期待的关系一致, 从而导致反应变快的现象。隐喻是通过将一个概念映射到另一个概念来传达意义的一种表达方式。隐喻的类型可以根据映射的特点和表达方式划分, 常见的隐喻类型包括空间隐喻、动作隐喻等, 如表2所示。

表2 几种常见的隐喻类型
Tab.2 Several common types of metaphor

隐喻类型	关联方式	举例
空间隐喻	将抽象的概念与空间方向或位置相关联	“前进”表示进步
动作隐喻	将抽象的概念与动作相关联	“抓住一个想法”
感官隐喻	将抽象的概念与感官体验相关联	“甜蜜的爱情”
时间隐喻	将抽象的概念与时间相关联	“时间流逝”
情感隐喻	将抽象的概念与情感状态相关联	“心碎”表示极度悲伤

空间隐喻是一种普遍存在的现象, 它是各种语言共同的特征, 并适用于许多抽象领域^[23], 如道德、健康、理性、意识和管理等领域, 在这些领域常常使用空间隐喻将积极因素向上映射, 将消极因素向

下映射。例如, 在道德领域, 讨论“正直的公民”和“品德低下的人”; 在管理领域, 讨论“统治者”和“底层民众”。同样, 积极的情绪(如“快乐”)与上部空间区域相关联, 而消极的情绪(如“悲伤”)与下部空间区域相关联。具身隐喻理论认为, 在理解这些词语的隐喻用法时, 与空间特征相关的神经机制被激活了。由于该理论假定隐喻中两个领域之间存在联系, 因此这些空间图式成为人们道德、控制和情感概念的一部分。与具身隐喻理论相一致, 行为学研究表明, 在涉及由空间隐喻构成的抽象概念判断任务中, 空间属性起着活跃的作用。许多关于这一主题的研究都利用了SRC效应, 发现当反应的性质与刺激的某些特征相匹配时, 参与者在判断任务中的反应更快、更准确。

动作隐喻方面的研究表明, 当手部运动方向与动词方向一致时, 人们的反应更快, 这表明字面动词和隐喻动词在相似的时间过程中会激活运动图式。有证据表明, 即使在处理单个词语时也存在SRC效应。例如, 当被要求判断两个社会群体(如“主人”和“仆人”)中哪个更强大且更强大的社会群体(“主人”)出现在屏幕顶部时, 参与者的反应更快; 当被要求判断哪个社会群体更弱小且更弱小的社会群体(“仆人”)出现在屏幕底部时, 参与者的反应更快^[24]。同样, 当被要求判断词语(如“英雄”和“骗子”)表示的是积极的意义还是消极的意义时, 参与者对出现在注视点以上的积极意义选项的反应更快, 对出现在注视点以下的消极意义选项的反应更快^[25]。事件相关电位(Event-Related Potentials, ERP)是一种实时测量神经组织内突触电流的方法, 用于研究语言等多个方面的脑功能^[26]。先前的ERP研究表明, 句子中描述的动作与参与者手部运动的相容性会在大脑中引发不同的神经反应^[27]。当句子中的动作与参与者的手势不兼容时, 会在大脑中引发一种N400的负向波幅。同时, 兼容条件下的动作反应会增强运动电位和再感受电位。这些研究结果提供了动作反应与语言刺激之间互相影响的神经证据, 表明SRC效应不仅是大脑理解句子后的副作用, 而且是在动词出现时

发生的真实的、持续的大脑与动作的交互作用。

Littlemore^[28]在其著作中提到了感官隐喻、时间隐喻和情感隐喻的相关概念。感官隐喻指通过感官体验理解抽象概念,当隐喻的语言和隐喻所涉及的感官模式之间存在一定的相似性时,会产生更强的感官模拟效应。时间隐喻的SCR效应指当时间隐喻与空间隐喻在方向上一致时,人们更容易完成相关任务。情感隐喻指将情感状态或体验与物理空间或运动相联系的隐喻,其在语言和行为中都有广泛应用,而且与身体经验和情感体验密切相关。情感隐喻的SCR效应会影响人们的思维和情感体验,当隐喻的情感和语言表达的情感兼容时,人们更容易理解和接受这个隐喻,从而产生更强烈的情感体验,反之则会产生较弱的情感体验。

目前,具身隐喻的SRC效应可以较好地解释认知心理学中人类的注意力、感知和决策过程,揭示人类的行为和情绪之间的关系,指导人机交互设计,将刺激和相应的反应方式进行匹配以提高用户的操作效率和准确性。但SCR效应也存在一些局限性,主要体现为SCR效应具有较大的个体差异性,并且易受到外界环境、任务要求和上下文的影响。

1.3 错觉的产生

广义的具身涵盖了虚拟具身。虚拟具身指在沉浸式虚拟现实(Virtual Reality, VR)环境中,人们对于代表其真实身体的虚拟化身及其身份所产生的身体拥有感、身体控制感及身体位置感的主观体验。虚拟具身可以通过虚拟肢体、虚拟身体和虚拟角色等方式实现。

虚拟具身的研究最早始于20多年前Caola等^[29]开展的经典的“橡胶手错觉”(Rubber Hand Illusion, RHI)实验。在这一实验中,当看到假手被抚摸,而自己隐藏的手也同步感受到触觉刺激时,大多数人会产生假手属于自己身体的错觉。在RHI实验范式中,同步的视触觉刺激会引起一种被称为“本体感觉漂移”的知觉幻觉^[30],这种幻觉会导致人们手的位置感知被重新映射,使其感觉更靠近橡胶手。当不同的感觉模态传达相互冲突的信息时,关于手的位置的视觉信息可能会主导本体感觉,导致人们对自己肢体的错误定位^[31]。这种多感官刺激已被广

泛应用于产生对假肢和虚拟肢体的所有权感^[32,33]的实验及研究中。

随着VR技术的发展,人们在RHI实验范式的基础上引入了VR的动觉成分,开创了新的研究范式,即“虚拟手错觉”(Virtual Hand Illusion, VHI)实验范式,也称“虚拟身体错觉”(Virtual Body Illusion, VBI)实验范式。调节VR程序中的参数,虚拟手的运动可以和被试者真实手的运动完全一致或不同。VR可以通过相对简单的方式在结构、形态和大小方面操纵身体表征,从身体中分离出以自我为中心的视觉视角,并利用多模态信息在时空方面对身体感知产生作用,通过诱导类似RHI的全身幻觉接近具身的多维度体验^[34]。研究发现,当被试者接收到同步的视觉-动觉的信息联合和视觉-触觉的信息刺激,或者仅接收视觉-动觉的信息联合时,会感觉到虚拟手是自己的手,即成功诱发了虚拟手错觉^[35]。Ke等^[36]在研究中系统地比较了RHI实验范式和VHI实验范式的强度差异,在RHI实验范式中,被试者不能移动自己的真实手,只能被动地接受视觉-触觉刺激。而在VHI实验范式中,被试者可以自由地活动真实手来控制虚拟手的动作,接收视觉-动觉的信息联合,或者可以移动真实手去控制虚拟手与虚拟环境中的其他虚拟物体进行交互,并通过虚拟设备在真实手上感觉到触感。实验结果显示,VHI实验范式引起的错觉强度大于RHI实验范式。这表明在虚拟具身中,相比于视觉和触觉,动觉对身体的错觉激活更加显著。

通过虚拟具身实现错觉激活,可以增强参与者的身体感知和情感体验,让使用者更容易接受和理解所体验的情境,这种错觉激活神经机制的应用范围会越来越广泛,同时越来越普及和便捷。虚拟具身的研究对虚拟现实技术和心理学领域的发展具有重要意义。

2 具身认知的工程应用

2.1 具身在虚拟现实和增强现实中的应用

具身可以对人类的认知和行为产生积极影响,它能够增强身体的自我意识与定位感,提高身体的控制和协调能力,促进身体恢复和康复。此外,具身还有助于促进人类的情感体验,增强自尊心和自

信心,减轻焦虑和抑郁,更好地应对压力和情绪,提高社交能力和创造力。因此,具身在虚拟现实领域有着广泛的用途,被应用于医疗、教育、娱乐和社交等领域。

在医疗VR中,具身具有十分广泛的应用。首先,在精神治疗、心理治疗及康复方面,利用身体错觉来改变患者对自己身体的认知^[37],可以使患者认为自己的身体是完整的、美好的,从而改变患者对自己身体的主观看法与管理方法。通过刺激具身认知的内在神经机制,可以帮助患者(如自闭症患者^[22]等)实现心理、精神、认知和运动等方面的康复。VR工具可以激发患者的主动性,使其拥有自由活动的沉浸式体验,从而在较短的时间内产生治疗效果。利用VR为患者提供多感官反馈,可以诱导脑的可塑性改变,促进患者康复。在有趣的环境下完成认知和运动任务,可以提高康复训练的依从性^[38]。随着增强现实(Augmented Reality, AR)技术的发展,基于具身的AR也被应用于医疗领域。相比VR,医疗领域的AR具有一个明显的优势,就是它允许患者处于熟悉的环境中,不需要完全被隔离于虚拟环境中,并且可以将治疗过程融入患者的日常生活中,进一步提高治疗的可接受性。基于具身的AR在内科学领域可以通过虚拟化进行假体模拟和训练、疼痛治疗、震颤稳定和中风康复等。在外科学领域,虚拟具身被应用于口腔外科、骨科、消化外科、泌尿外科、心脑血管外科等手术中。表3列出了AR在手术应用中的相关研究。

表3 AR在手术应用中的相关研究
Tab.3 Related studies of AR in surgery

相关研究	手术类型	使用的AR技术	结论
3D立体可视化 ^[39]	口腔外科	三维集成视频显示系统和AR系统	螺钉固定清晰、有效
术中脑成像系统 ^[40]	神经血管外科 动脉瘤外科 动静脉畸形	工作站和光学跟踪系统	图像配准、校正和剔除误差很小
计算机辅助肝脏手术 ^[41]	肝脏外科 肝脏肿瘤手术	立体透视头戴式显示器、跟踪系统	作为手术计划工具,生成交互式体积测量表格
关节镜手术中的导航应用 ^[42]	术后膝关节恢复	术前图像处理和术中应用	使用AR进行三维重建得到的虚拟模型的误差最小
VR和AR在消化手术中的应用 ^[43]	消化外科 肿瘤检测	对手术计划系统进行三维建模	瞄准精确,可大幅缩短手术时间

具身认知可以应用于医学教育和相关培训中。具身认知应用于人体解剖学学习、手术模拟和医疗操作培训中^[44],可以帮助医学生和医生较快地提高技能、积累经验。VR技术使医务工作者在虚拟环境中进行学习和手术模拟成为可能,从而提高医务工作者的医疗技能和决策能力。具身技术也可以应用于患者情况模拟,对疾病的诊断和治疗具有促进作用。总之,具身认知在医学教育和培训及疾病的治疗实践中均具有广阔的发展前景和发展空间。

除医学领域外,具身认知在教育、娱乐和社交等领域的应用也有许多潜在的可能性。在教育领域,利用VR技术可以为学生提供更加身临其境的学习体验,提高学生学习的体验感和参与度。具身认知结合运动想象技术可以用于运动学习和训练,学生可以通过想象执行动作强化肌肉记忆和技能训练。在娱乐领域,具身认知结合VR技术可以提供身临其境的娱乐体验,用户可以通过身体动作和表情实现游戏角色的操作,提升游戏体验的沉浸感和趣味性。在社交领域,虚拟具身可以使远程社交交互更加真实,用户可以在虚拟空间中进行面对面的社交互动,打破地理距离的限制,使社交体验更加丰富和有趣。

随着VR技术的发展,具身认知的应用正逐步拓展到更多的相关领域,包括AR和混合现实(Mixed Reality, MR)。VR技术通过头戴式显示设备和交互装置,可以创造出身临其境的虚拟环境。用户可以通过想象运动或运动实施控制虚拟角色,提升虚拟体验的身临其境感。AR技术将虚拟内容叠加在现实世界中,使用户可以同时看到真实环境和虚拟元素,将用户的动作和意图融合到虚拟元素中,实现更加自然和直观的交互。MR是VR和AR的结合,可将虚拟内容与真实世界无缝融合,使虚拟物体与真实物体能进行实时交互。总体而言,随着VR技术的发展,具身认知在提高沉浸感、改善用户界面和交互方式、促进社交互动和协作方面具有重要意义。未来,随着技术的不断进步和研究的不断深入,将出现更多具身认知与VR技术相结合的创新发展。

2.2 具身在脑机接口中的应用

具身认知在脑机接口(Brain-Computer Inter-

face, BCI) 领域也得到了十分广泛的研究。BCI 是一种提供人脑和计算机之间直接连接的技术系统, 它通过信号采集设备从大脑皮层获取脑电信号, 经过放大、滤波、A/D 转换等将其转换为计算机可识别的信号, 之后对信号进行预处理, 提取特征信号, 再利用这些特征信号进行模式识别, 最终将其转化为控制外部设备的具体指令, 实现对外部设备的控制。

具身认知涉及人类如何通过自身的运动、感知、经验理解和解释世界, 利用具身认知的原理, 可以提高 BCI 系统的性能和用户体验。与具身相关的脑电信号可以用来改进 BCI 系统的设计和性能。表 4 总结了与具身认知相关的几种脑电信号及其在 BCI 系统中的应用。

表 4 与具身认知相关的几种脑电信号及其在 BCI 系统中的应用
 Tab.4 Several ERP signals related to embodied cognition and their applications to BCI

信号类型	信号名称	具身特性	在 BCI 中的作用
镜像神经元系统信号 ^[45]	μ 节律 (mu rhythm)	μ 节律与运动准备相关, β 节律与空闲状态或抑制状态相关	通过 EEG 对这些节律进行区分, 可以提高 BCI 分类的准确性, 为康复治疗和辅助技术的应用提供支持
	β 节律 (beta rhythm)		
自我感知信号 ^[46]	自体感诱发电位 (Somatosensory Evoked Potentials, SSEPs)	SSEPs 可以作为一种生理指标, 评估自闭症患者对情绪表达的感知能力	通过研究 SSEPs 的变化, 可以更好地理解自闭症患者在情绪处理方面的特点, 为 BCI 技术发展提供指导
	运动相关电位 (Movement-Related Potentials, MRPs)	MRPs 反映了大脑在进行运动计划和执行时与身体运动相关的活动	显著提高 BCI 神经反馈应用的效能; 应用于康复训练中, 可以帮助运动障碍人群恢复运动与交互能力
决策认知信号 ^[48]	决策潜伏期准备电位 (Readiness Potential, RP)	RP 不仅受到自我生成运动的影响, 还受到观察和想象运动的影响	为实际 BCI 的开发提供基础, 预测运动的发生, 在运动发生之前提供感官刺激, 从而增强神经可塑性

BCI 可以帮助残疾人和神经性疾病患者恢复正常的行动与感知能力, 进一步发展后还可用于增强人们自身的身体能力。将 BCI 技术应用于感知缺失的治疗中, 可以形成感知, 通过技术手段重建感知通道, 帮助失去正常感知能力的人重新获得相关能力。BCI 还能让肢体瘫痪的人控制虚拟手臂并与连接的设备进行交互, 显著提高他们的自主性^[49]。随着科技的不断进步, 患者甚至可以完全使用 BCI 来控制机械手臂, 并利用 RHI 原理, 建立与机械手臂之间的认知连结, 将其感知为自己身体的一部分, 这或许可以促进认知和脑神经功能的重建, 并减轻心理疼痛。因此, 具身认知指导下的 BCI 将是 BCI

未来的发展趋势。随着 BCI 技术的不断进步, 未来如果能够实现 BCI 与人脑或身体的融合, 就会产生所谓的“赛博格脑”或“赛博格人”, 这种融合将人类智能与机器智能相结合, 是人的认知能力与机器的认知能力的集成。它能够超越人和机器各自的局限, 实现智能上的互补优势, 形成更高水平的智能。通过 BCI 等方式超越人的身体病残和限制, 成为智能和认知进化的重要途径。图 1 归纳了神经机制的相关技术手段与工程应用。

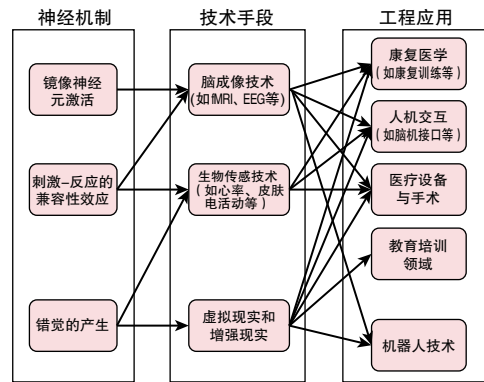


图 1 神经机制的相关技术手段与工程应用
 Fig.1 Technical means and engineering applications related to neural mechanisms

3 总结与展望

实现具身的技术手段涉及多个领域, 包括 VR 技术、AR 技术、动作捕捉技术、手势识别技术、脑机接口技术和人机交互技术等。这些技术通过不同的设备与方式, 让用户能够更深度、更直接地融入数字世界或与虚拟物体互动。这些不同领域的技术与方法共同为用户提供了前所未有的沉浸感与交互体验, 促使科学家们不断探索和拓展人与技术之间的联系, 将虚拟与现实融合得更加紧密, 为未来创造无限可能。

未来具身的发展将是多样化的, 通过跨学科合作推动脑机接口、VR、身体辅助等技术不断进步, 以增强人机交互的自然化、个性化, 改善用户体验。在基础神经机制方面, 未来的研究可能会更深入地探索大脑的多个区域, 不断优化和改进脑机接口技术, 并开发更先进的神经仿真和神经可塑性技术。在工程应用方面, 具身技术可以用于虚拟培训和模拟, 帮助人们进行危险操作的训练。在医疗和康复方面, 具身技术可以用于康复训练和疼痛管理, 帮

助患者恢复功能和减轻痛苦。在娱乐和社交等领域,具身技术可以提供沉浸性和交互性更强的游戏体验,提高娱乐价值和用户参与度。此外,具身技术也有望应用到人工智能的发展中,推动具身智能朝着更加人性化的方向发展,为人类社会带来更多福祉和便利。然而,在具身技术广泛应用的过程中,也需要密切关注伦理、隐私和安全问题。制定合理的法律法规,确保用户数据和个人信息的安全,保障用户的隐私权益,是未来具身发展的必要前提。

总体来说,具身认知在神经科学、虚拟现实和脑机接口等领域的研究和应用,为改善人们的生活和认知体验提供了新的可能性。通过深入研究个体身体与环境的互动,人类可以更好地理解认知过程,并开发出更加智能和符合人类需求的具身工具。随着科技的不断进步和跨学科研究的深入,未来具身技术将变得更加普遍和易于使用,推动科技与人类生活的融合发展,极大地改善人类的生活体验,为社会带来更多的便利和创新。

参考文献

- [1] EFFRON D A, NIEDENTHAL P M, GIL S, *et al.* Embodied temporal perception of emotion[J]. **Emotion**, 2006, 6(1): 1-9.
- [2] WANG H L, LI J R, WANG X S, *et al.* Embodiment effect on the comprehension of mandarin manual action language: an ERP study[J]. **Journal of Psycholinguistics Research**, 2019, 48(3): 713-728.
- [3] CROSSLEY N. Merleau-Ponty, the elusive body and carnal sociology[J]. **Body & Society**, 1995, 1(1): 43-63.
- [4] KEMMERER D. Does the motor system contribute to the perception and understanding of actions? [J]. **Language & Cognition**, 2015, 7(3): 450-475.
- [5] BUCCINO G, BINKOFSKI F, FINK G R, *et al.* Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study[J]. **European Journal of Neuroscience**, 2010, 13(2): 400-404.
- [6] LUPPINO G, RIZZOLATTI G. The cortical motor system[J]. **Neuron**, 2001, 31(6): 889-901.
- [7] SCHUBOTZ R I, CRAMON D Y V. Predicting perceptual events activates corresponding motor schemes in lateral premotor cortex: an fMRI study[J]. **NeuroImage**, 2002, 15(4): 787-796.
- [8] PELLEGRINO G D D, FADIGA L D, FOGASSI L, *et al.* Understanding motor events: a neurophysiological study[J]. **Experimental Brain Research**, 1992, 91(1): 176-180.
- [9] GALLESE V, FADIGA L, FOGASSI L, *et al.* Action recognition in the premotor cortex[J]. **Brain**, 1996, 119(2): 593-609.
- [10] FADIGA L, FOGASSI L, PAVESI G, *et al.* Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study[J]. **Journal of Neurophysiology**, 1995, 73(6): 2608-2611.
- [11] GRAFTON S T, ARBIB M A, FADIGA L, *et al.* Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography[J]. **Experimental Brain Research**, 1996, 112(1):103-111.
- [12] PULVERMÜLLER F, HUMMEL F. Walking or talking? Behavioral and neurophysiological correlates of action verb processing[J]. **Brain and Language**, 2001, 78(2):143-168.
- [13] BOULENGER V, HAUK O, PULVERMÜLLER F. Grasping ideas with the motor system: semantic somatotopy in idiom comprehension[J]. **Cerebral Cortex**, 2009, 19(8): 1905-1914.
- [14] HAUK O, JOHNSRUDE I, PULVERMÜLLER F. Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex[J]. **Neuron**, 2004, 41(2): 301-307.
- [15] PULVERMÜLLER F. Words in the brain's language[J]. **Behavioral & Brain Sciences**, 1999, 22(2): 253-279.
- [16] RIZZOLATTI G, FOGASSI L, GALLESE V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action[J]. **Nature Reviews Neuroscience**, 2001, 2(9): 661-670.
- [17] DINSTEIN I, THOMAS C, BEHRMANN M, *et al.* A mirror up to nature[J]. **Current biology:CB**, 2008, 18(1): R13-R18.
- [18] ALEGRE M, GURIDI J, JULIO A. The mirror system, theory of mind and Parkinson's disease[J]. **Journal of the Neurological Sciences**, 2011, 310: 194-196.
- [19] BAK T H, CHANDRAN S. What wires together dies together: verbs, actions and neurodegeneration in motor neuron disease[J]. **Cortex**, 2012, 48(7): 936-944.
- [20] ELISABETTA F, FRANCESCA B, SIMONE P, *et al.* The mirror neurons network in aging, mild cognitive impairment, and Alzheimer disease: a functional MRI study[J]. **Frontiers in Aging Neuroscience**, 2017, 9: 371.
- [21] GOODGLASS H, KAPLAN E. Disturbance of gesture and pantomime in aphasia[J]. **Brain**, 1963, 86: 703-720.
- [22] KELLEMS R O, CHARLTON C, KVERSY K S, *et al.* Exploring the use of virtual characters (avatars), live animation, and augmented reality to teach social skills to individuals with autism[J]. **Multimodal Technologies and Interaction**, 2020, 4(3): 48.
- [23] LAKOFF G, JOHNSON M. Metaphors we live by[J]. **Ethics**, 1980, 19(2): 426-435.
- [24] SCHUBERT T W. Your highness: vertical positions as perceptual symbols of power[J]. **Journal of Personality & Social Psychology**, 2005, 89(1): 1-2.

- [25] MEIER B P, ROBINSON M D. Why the sunny side is up? Associations between affect and vertical position[J]. **Psychological Science**, 2010, 15(4): 243-247.
- [26] KUTAS M, PETTEN C K V, KLUENDER R. Handbook of psycholinguistics(second edition)[M]. Academic Press, 2006.
- [27] ARAVENA P, HURTADO E, RIVEROS R, *et al.* Applauding with closed hands: neural signature of action-sentence compatibility effects[J]. **Plos One**, 2010, 5(7): 1-14.
- [28] LITTLEMORE J. Metaphors in the mind: sources of variation in embodied metaphor[M]. Cambridge University Press, 2019.
- [29] CAOLA B, MONTALTI M, ZANINI A, *et al.* The bodily illusion in adverse conditions: virtual arm ownership during visuomotor mismatch[J]. **Perception**, 2018, 47(5): 477-491.
- [30] TSAKIRIS M, HAGGARD P. The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution[J]. **Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance**, 2005, 31(1): 80-91.
- [31] MARAVITA A, SPENCE C, DRIVER J. Multisensory integration and the body schema: close to hand and within reach[J]. **Current Biology**, 2003, 13(13): R531-R539.
- [32] EHRSSON H H, SPENCE C, PASSINGHAM R E. That's my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb[J]. **Science**, 2004, 305(5685): 875-877.
- [33] MEL S. Towards a digital body: the virtual arm illusion[J]. **Frontiers in Human Neuroscience**, 2008, 2(2008): 6.
- [34] JEAN-MARIE N, ELIAS G, BERNHARD S, *et al.* Multisensory stimulation can induce an illusion of larger belly size in immersive virtual reality[J]. **Plos One**, 2011, 6(1): 1-11.
- [35] SANCHEZ-VIVES M V, SPANLANG B, FRISOLI A, *et al.* Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations[J]. **Plos One**, 2010, 5(4): e10381.
- [36] KE M, BERNHARD H. The virtual-hand illusion: effects of impact and threat on perceived ownership and affective resonance[J]. **Frontiers in Psychology**, 2013, 4: 604.
- [37] SLATER M, PEREZ-MARCOS D, EHRSSON H H, *et al.* Inducing illusory ownership of a virtual body[J]. **Frontiers in Neuroscience**, 2009, 3(2): 214-220.
- [38] LUCA R D, MAGGIO M G, MARESCA G, *et al.* Improving cognitive function after traumatic brain injury: a clinical trial on the potential use of the semi-immersive virtual reality[J]. **Behavioural Neurology**, 2019(8): 1-7.
- [39] TRAN H H, SUENAGA H, KUWANA K, *et al.* Augmented reality system for oral surgery using 3D auto stereoscopic visualization[J]. **Med Image Comput Comput Assist Interv**, 2011, 14(1):81-88.
- [40] OERTEL M K, GERARD I, DROUIN S. Augmented reality in neurovascular surgery: feasibility and first uses in the operating room[J]. **International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery**, 2015, 10(11): 1823-1836.
- [41] BORNIAK A, BEICHEL R, REITINGER B, *et al.* Computer-aided liver surgery planning: an augmented reality approach[J]. **Medical Imaging 2003: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display**, 2003, 5029:395-406.
- [42] TONET O, MEGALI G, D'ATTANASIO S, *et al.* An augmented reality navigation system for computer assisted arthroscopic surgery of the knee(Conference Paper)[J]. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, 2000, 1935(1): 1158-1162.
- [43] CABRILO I, BIJLENGA P, SCHALLER K. Augmented reality in the surgery of cerebral arteriovenous malformations: technique assessment and considerations[J]. **Acta Neurochirurgica**, 2014, 156(9): 1769-1774.
- [44] GONZALEZ-ROMO N, MIGNUCCI-JIMÉNEZ G, HANALIOGLU S, *et al.* Virtual neurosurgery anatomy laboratory: a collaborative and remote education experience in the metaverse[J]. **Surgical Neurology International**, 2023, 14: 90.
- [45] TARIQ M, TRIVAILO P M, SIMIC M. Mu-Beta event-related (de)synchronization and EEG classification of left-right foot dorsiflexion kinesthetic motor imagery for BCI[J]. **Plos One**, 2020, 15(3): e0230184.
- [46] FANGHELLA M, GAIGG S B, MATTEO C, *et al.* Somatosensory evoked potentials reveal reduced embodiment of emotions in autism[J]. **The Journal of Neuroscience : the Official Journal of the Society for Neuroscience**, 2022, 42(11): 2298-2312.
- [47] BEHBOODI A, WALKER A L, BULEA T C, *et al.* Evaluation of multi-layer perceptron neural networks in predicting ankle dorsiflexion in healthy adults using movement-related cortical potentials for BCI-neurofeedback applications[J]. **International Conference on Rehabilitation Robotics**, 2022: 1-5.
- [48] PINEDA J A, ALLISON B Z, VANKOV A. The effects of self-movement, observation, and imagination on μ rhythms and readiness potentials (RP's): toward a brain-computer interface (BCI)[J]. **IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering**, 2000, 8(2): 219-222.
- [49] SEINFELD S, FEUCHTNER T, PINZEK J, *et al.* Impact of information placement and user representations in VR on performance and embodiment[J]. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, 2022, 28(3): 1545-1556.