面向人类智能增强的多模态人机交互

王党校*, 郑一磊, 李腾, 彭聪, 王丽君, 张玉茹

北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100083

* 通信作者. E-mail: hapticwang@buaa.edu.cn

收稿日期: 2017-10-30; 接受日期: 2018-02-07; 网络出版日期: 2018-04-13

国家自然科学基金 (编号: 61572055) 和国家重点研发计划 (编号: 2016YFB1001200) 资助项目

摘要 人机和谐是人机交互的理想境界和永恒追求. 近年来人工智能的蓬勃发展使得机器智能不断进步, 引发了对于人类智力造成挑战的担忧. 能否利用多模态人机交互技术实现人类智能的训练和强化, 是人机交互研究的新命题. 神经可塑性研究成果表明, 人类的核心认知能力, 如注意力控制能力、工作记忆容量等, 有望通过视听觉交互任务、触觉交互任务、经颅电磁刺激、脑机接口等技术进行训练和强化. 本文通过剖析虚拟现实系统的沉浸感、交互性、想象性的本质优势, 结合工程控制论思想, 提出面向人类智能增强的视听触觉多模态有机融合的人机交互机制. 通过构建可控认知负荷、及时生理反馈、双向体脑交互的新型人机交互系统, 探索基于 Hebbian learning 可塑性机制的智能增强方法. 该研究将为揭示和认识人脑神经可塑性机制提供新的研究工具, 同时将促进新型人机交互的硬件设备和软件方法研究, 并将在个性化教育、神经康复、特种职业认知能力强化等领域产生应用价值.

关键词 神经可塑性, 触觉交互, 视听触融合, 人机交互, 注意力, 工作记忆, 智能增强

1 智能增强的研究背景

1.1 智能时代下研究智能增强的必要性

近年来人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 蓬勃发展, 使得机器智能不断进步, 引发了对于人类智力造成挑战的担忧. 在人工智能研究的同时, 一些学者致力于另一条道路——智能增强 (Intelligence Augmentation, IA). 1963 年, 几乎在人工智能研究起步的同时, 计算机科学家 Douglas C. Engelbart——鼠标的发明者, 发表了论文“增加人类智慧的概念性架构”, 随后成立了“增智研究中心”. 如果说人工智能是让机器像人类一样思考, 即“让机器变得更聪明”, Douglas C. Engelbart 的研究则试图利用科技手段提升人脑现有的能力.

引用格式: 王党校, 郑一磊, 李腾, 等. 面向人类智能增强的多模态人机交互. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 449–465, doi: 10.1360/N112017-00213
Wang D X, Zheng Y L, Li T, et al. Multi-modal human-machine interaction for human intelligence augmentation (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 449–465, doi: 10.1360/N112017-00213

与人工智能不同, 智能增强是以基因科技、智能科技、心理学、脑神经提升技术与微生物科技等多学科共同推动的一个领域, 其目的是增强以人为核心的人机交互, 人与生物神经网络交互, 增强人体自身的智能与能力。

智能增强为人机交互的研究提供了新需求和新动力。当前人机交互的焦点是机器如何更自然的为人提供信息服务。在机器能力增强的同时, 如何增强人的能力, 尤其是认知能力, 实现人机共生或者人机和谐^[1], 成为人机交互中一个新的研究课题。

自从人类开始使用工具之后, 随着工具的发展及它对人体器官影响的强化, 工具进化便成了人类进化的标志。近年来, 人类借助互联网等信息工具可获取、加工庞大数量的知识信息, 这对人脑智能提出了更高的要求, 即需要更加聪明、智慧的大脑, 人类自然生物进化所获得的脑力将不能满足这一要求。现代信息技术及生物技术的进步正在向着优化人类自身机能 (包括智能) 的方向前进, 人类变革自身进化的实践即将迈出决定性的一步 (实际上人类自我改造的历史是从劳动开始的), 优化人类生物进化因素, 使大脑智能进化加强成为智能增强的研究目标¹⁾。

人类进化速度之慢与机器的进化速度形成了鲜明对比。按照摩尔定律, 机器人的提升永远是成指数增长, 而人类智能增长相对的却总是近乎于平行直线。基于人机合作形成的更高级别的“增强智能”^[2], 即通过潜力无穷的人脑催生出更先进的算法和能力进化更快的“聪明机器”, 人类也因为有了聪明机器的帮助而不断进化, 加深对自身的了解, 及对更多未知领域的探索, 从而实现人类与机器的共进化。

国务院印发的《新一代人工智能发展规划》, 面向 2030 年明确提出我国新一代人工智能发展的战略目标, 将人机协同的混合增强智能作为规划部署的五个重要方向之一。随着人工智能技术的发展与应用, 人与智能机器的交互、混合、共生将成为未来社会的形态特征之一。

1.2 智能增强的定义和范畴

认知能力是人脑加工、储存和提取信息的能力, 是人区别于其他动物的根本标志。认知能力包括知觉、记忆、注意力、思维和想象的能力等。本文集中于探讨注意力控制能力和工作记忆增强训练的研究现状、视听触有机融合的智能增强研究框架、未来科学问题及技术挑战。

注意力是指人的心理活动指向和集中于某种事物的能力。有效的注意力控制能力是各类认知活动的基础。注意从始至终贯穿于整个心理过程, 只有先注意到某一事物, 才可能进一步去记忆和思考。由于注意力, 人们才能集中精力去清晰地感知一定的事物, 深入地思考一定的问题, 而不被其他事物所干扰; 没有注意, 人们的各种智力因素, 观察、记忆、想象和思维等将得不到一定的支持而失去控制。

注意力有两个基本特征, 一个是指向性, 是指心理活动有选择地反映一些现象而离开其余对象。二是集中性, 是指心理活动停留在被选择对象上的强度或紧张。指向性表现为对出现在同一时间的许多刺激的选择; 集中性表现为对干扰刺激的抑制。它的产生及其范围和持续时间取决于外部刺激的特点和人的主观因素。据统计, 人在日常生活工作中有 50% 的时间会不由自主地分心, 处于注意力涣散状态。是否能够通过某些训练, 让人增强调节和控制注意力的能力, 即对于一个目标刺激源持续关注或专注执行一件任务, 而忽略外在环境干扰的能力, 甚至达到“心无旁骛”的状态, 是认知神经科学研究的一个热点问题^[3,4]。

工作记忆是指在执行认知任务过程中, 用于信息的暂时储存与加工的资源有限的系统^[5]。人在学习和工作中, 必须在较短时间内保存和处理已知的和新的信息。工作记忆被形容为人类的认知中枢, 是

1) 人类智能进化史. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/21996106>.

当前认知心理学和认知神经科学中最活跃的研究领域之一. 工作记忆容量, 也称工作记忆广度, 通常作为衡量工作记忆能力的重要指标. 工作记忆容量体现了人们认知调控的水平, 特别是在具有不相关的干扰信息的环境中, 维持多个任务相关线索的能力. 一直以来, 人们认为工作记忆容量是不可改变的个体特征. 但是最近十几年的研究表明, 通过系统的训练, 人类特别是儿童和青少年的工作记忆容量可以得到提升^[6]. 现今, 许多研究开始关注行为训练对工作记忆容量提升的机制.

1.3 智能增强的研究价值

在基础研究层面, 基于多通道人机交互的认知能力增强的研究将对于理解视听触觉通道下的大脑神经可塑性机理、揭示感觉通道与脑的相互作用机制、构建新的人机交互范式等具有推动作用, 促进计算机科学、神经科学、心理学等领域的交叉融合与知识创新.

在应用层面, 基于多通道人机交互的认知能力增强的研究成果将为注意力训练、工作记忆容量训练、触觉技能学习等相关应用领域等提供理论支撑. 研究结果对于儿童注意缺陷障碍和多动症、早期老年性痴呆症等神经类疾病患者的诊断、预防和治疗提供新手段. 例如对于注意缺陷障碍 (ADD) 人群, 其主要症状是频繁地不自觉走神, 不能自主控制集中注意力的时间和场合. 据统计, 中国内地学龄儿童中 ADD 和多动症患病率为 4.31%~5.83%, 估计患儿超过 1461 万, 约 65% 的患儿症状会持续到成年, 其继发或共患破坏性行为障碍及情绪障碍危险性高, 成年期的物质依赖、反社会性人格障碍和违法犯罪的风险是一般人群的 5~10 倍. 由于环境、教育等因素, ADD 发病率有逐年增高的趋势. 基于多通道人机交互的注意力训练将为 ADD 患者提供新的治疗途径.

此外, 针对高压力高节奏和紧张环境下工作的特种行业专业人群, 例如飞行员、航天员、机场塔台监控人员、核电站主控室操作员等特殊行业人群, 需要在任务执行期间保持较长时间的高度注意力状态, 并处理大量认知负荷, 快速准确地做出反应. 例如飞行员在紧张的空战中需要高度集中注意力, 准确记忆和快速处理大量信息, 得出正确决策, 以保证作战任务质量和飞行安全, 瞬间的注意力涣散将可能导致灾难性的后果. 基于多通道人机交互的认知能力增强的研究成果将针对这类专业人群提供训练注意力和工作记忆的新途径.

2 智能增强的生物学原理

2.1 神经可塑性

神经可塑性是指大脑具有在外界环境和经验的作用下塑造大脑结构和功能的能力, 即结构可塑和功能可塑²⁾. 结构可塑指大脑内部的突触、神经元之间的连接可以由于学习和经验的影响建立新的连接, 从而影响个体的行为. 功能可塑指通过学习和训练, 某一脑区的功能可以由邻近的脑区代替, 表现为脑损伤患者在经过学习、训练后脑功能在一定程度上的恢复.

在神经科学研究历史上, 一度认为大脑发育的神经可塑性存在一个时间窗口, 即在婴儿关键期后, 大脑结构往往不发生变化. 但是, 最近几十年的研究颠覆了这个观念.

神经可塑性的早期工作是由 Merzenich 等开展的. 他们的研究表明, 大脑皮层中的感觉和运动图谱可以被经验修改^[7,8]. 大脑皮层对身体的表征与身体的结构有一定的对应关系, 即为拓扑地形图. 身体特定部位与皮层区域之间的映射称为体感皮层定位, 并在皮层区域形成体感皮层定位图谱. Merzenich 等发现这些映射的大小和形状可以随经验改变, 甚至在成年动物中也是这样. 当切断猕猴

2) Wikipedia, Neuroplasticity. <https://en.wikipedia.org/wiki/Neuroplasticity>.

的手指到脊髓的神经纤维后, 相关的皮层部位就不再对那根手指的触摸做出反应. 并且, 一段时间之后, 这块皮层区域会开始对相邻的手指所接受的刺激做出反应. 也就是说, 周围的皮层区域填充了这块“沉默”的区域并接管了它. 同样的, 通过缝合一只手的两颗手指的实验也得到了相似的结果. 这些动物实验表明, 成熟的大脑皮层依然可以发生动态改变^[8].

除了遭受重大损伤之后表现出的可塑性, 正常范围内的经验变化比如训练, 也能够影响成人大脑的结构. 一个著名的实验来自于对识路能力出众的伦敦出租车司机的研究. Maguire^[9] 用 fMRI 脑扫描仪测试了 16 位出租车司机, 发现这些司机的海马回背部 (与空间导航能力有关的脑区) 显著大于对照组人群. 并且, 出租车司机的驾龄越长, 其海马回越大. 随后对准司机的研究表明, 海马回更大的准司机更有可能通过出租车司机资格考试. 这项研究证明了独一无二的经历能让大脑的生理结构发生切实的变化, 并且能够导致这些脑区所控制的相关功能的变化. 类似的证据来自对音乐家的研究. Elbert 等^[10] 采用脑磁图考察了小提琴家手部的体感表征得出, 音乐家的大脑与非音乐家的大脑有着明显的不同. 音乐家的大脑中与产生精细动作有关的脑区比普通人更大, 并且这些区域的反应强度也更大. 也就是说, 由于这些音乐家的感觉经验的变化, 大脑用更大的皮层区域和更强烈的反应程度来表征他们的手指感觉. 研究表明, 音乐家的运动皮层、小脑和胼胝体 (连接两脑半球的组织)、弦乐手的感觉皮层都比普通人发达.

以上研究表明, 在正常大脑中, 训练可以引起大脑皮层结构的较快改变, 这反映了神经系统学习和保持新信息和技能的可塑性.

2.2 赫布理论

在神经科学中, 突触可塑性是指神经细胞间的连接, 即突触, 其连接强度可调节的特性. 突触的形态和功能可发生较为持久的改变的特性或现象. 突触会随着自身活动的加强与减弱得到相应加强与减弱. 突触可塑性主要包括短期突触可塑性与长期突触可塑性, 这两者已被公认为是学习记忆活动的细胞水平的生物学基础.

赫布理论 (Hebbian theory) 描述了突触可塑性的基本原理³⁾, 即突触前神经元向突触后神经元的持续重复的刺激可以导致突触传递效能的增加. 这一理论由 Donald Hebb 于 1949 年提出^[11], 他如此表述这一理论: 我们可以假定, 反射活动的持续与重复会导致神经元稳定性的持久性提升. 当神经元 A 的轴突与神经元 B 很近并参与了对 B 的重复持续的兴奋时, 这两个神经元或其中一个便会发生某些生长过程或代谢变化, 致使 A 作为能使 B 兴奋的细胞之一, 它的效能增强了. 这一理论经常被总结为“一起发射的神经元连在一起”. 这个理论可以用于解释“联合学习”, 在这种学习中通过对神经元的刺激使得神经元间的突触强度增加^[12]. 该学习方法被称为赫布型学习 (Hebbian learning), 即神经元之间的链接因为神经元本身的活动自行调整链接强弱, 又返回来影响以后的神经元接收刺激产生的反应. 这样, 就不断产生一个学习效果. 换句话说, 外在行为是神经网络接受刺激之后产生的反应. 神经元与神经元之间的链接有强有弱, 而这种强弱是可以通过学习 (训练) 来不断改变的. 如果两个神经元总是相关连的受到刺激或者反映, 他们的链接就会一次一次的被加强.

基于赫布理论, Markram 进一步提出 STDP (spike timing dependent plasticity) 学习方法^[13]. 根据神经元学习的先后顺序, 调整神经元之间链接的强弱. 某个神经元的活动, 如果其他神经元传递的信息之后, 它才产生某个活动, 那么类似于因果关系, 它和传递信息的神经元之间链接会加强; 如果它产生活动之后, 其他神经元才传递信息来, 那么这个信息有可能会被忽略, 也就是该神经元与传递信息

3) Wikipedia, Hebbian theory. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hebbian-theory>.

的神经元间的链接会减弱. 因此, 控制好刺激或训练信号的时间序列是保证产生学习效果的关键因素.

基于神经可塑性的原理, 注意力训练和增强的机制在于通过有效的训练方法, 对注意力相关的脑网络产生可塑性影响^[14, 15], 包括功能可塑性乃至结构可塑性^[16]. 与此类似, 工作记忆训练和增强的机制在于通过有效的训练方法, 对工作记忆相关的脑网络产生可塑性影响.

3 注意力和工作记忆增强训练的研究现状

本节综述了注意力和工作记忆训练和强化的研究现状, 包括基于视听觉交互任务、经颅电磁刺激、脑机接口技术、触觉交互任务的认知能力增强方法, 对各种方法的效果和优缺点进行了对比分析.

3.1 基于视听觉交互任务的认知能力增强

近年来, 随着信息技术的发展, 三维电脑游戏成为泛在娱乐工具. 据统计, 全球每周花在游戏上的时间已经超过 30 亿小时, 游戏产业年产值已超过 680 亿美元, 而且还有不断增长的趋势^[17]. 如何减少电脑游戏的消极作用, 发挥游戏的积极价值, 成为摆在政府、家长和教育机构面前迫切而重要的话题. 神经科学家研究者开始关注如何利用游戏无处不在的这一既成事实, 探索能够促进人的注意力乃至各类认知能力的严肃游戏^[18~20].

2013 年发表在 *Nature* 上的文章^[21] 研究发现视频动作游戏可以提高老年人认知能力, 并从神经影像学角度研究了游戏过程中脑区的激活情况, 分析了游戏对认知能力促进的神经机制. Green 等^[22] 研究发现游戏对于改善人的视觉注意力有显著效果. 全球很多公司推出基于视听觉通道的益智游戏, 例如 Luminosity 游戏⁴⁾. 此外, 基于视觉搜索原理的 Schulte 测试游戏用在飞行员的注意力训练中, 产生了重大社会效益⁵⁾. Bavelier 等^[23] 探索了视频动作游戏对注意力训练效果的神经机制, 指出游戏提高了人对于未知环境的概率推理能力, 这种能力使得受训者面对新的学习任务环境时, 具备了自我学习的能力^[24]. Anguera 等^[21] 采用内侧前额叶皮层局部的前额中线 theta (4~7 Hz) 脑电信号能量以及处于脑前额和脑后区之间的长程 theta 能量相干性作为持续注意力的生理表征, 证明视频游戏提高了老年人的持续注意力. Montani 等^[25] 设计了多维度自适应算法, 对视频游戏的难度进行在线调整, 使得任务难度和玩家当前的能力匹配, 研究结果表明游戏有效地提高了注意力控制能力. 研究表明, 专注力与记忆力等管控功能息息相关, 主要由脑额叶的前扣带皮层控制, 此外, 大脑顶叶皮层在集中注意力过程中起重要作用, 对探测到环境中的变化是至关重要的.

特殊设计的视听觉交互认知游戏对于工作记忆训练的效果也得到了初步研究^[26]. *N*-back 任务是一种旨在训练和评估个人工作记忆能力的行为任务. 参与者要求持续跟踪一个刺激序列, 并且报告当前刺激与前面第 *N* 个刺激是否相同. Jaeggi 等^[27] 采用自适应难度的双重 *N*-back 任务, 即要求参与者同时持续检测当前的视觉刺激与听觉刺激是否与相应通道的前面第 *N* 个刺激相同. 结果表明该训练不仅改善了工作记忆, 而且还提高了流体智力^[28]. 这种训练的训练效果产生了迁移, 不仅提高了被训练任务本身的行为表现, 也提高了非训练任务的行为表现. 结果还证实, 流体智力从训练中的受益程度明显依赖于训练剂量, 即训练剂量越大流体智力的改进量越高.

研究表明, 经过相关训练后, 大脑不同区域, 特别是额顶网络之间的联系会增强, 并且这与个体表现的工作记忆容量的提升成正相关^[29]. 在猕猴上进行的神经电生理结果进一步揭示, 经过训练后, 更多的前额叶皮层神经元会以更高的发放频率参与编码视觉刺激^[30]. 并且, 行为训练还能够显著降低

4) Luminosity. <http://www.desura.com/games/luminosity-main>.

5) 提高注意力的训练方法——舒尔特方格法. <https://jingyan.baidu.com/article/642c9d34c80fb4644a46f79a.html>.

图 1 (网络版彩图) 触觉反馈下的精确力控制训练任务

Figure 1 (Color online) Accurate force control tasks with pure haptic feedback. (a) A subject held the stylus of two haptic devices. He wore the eye-shielding glasses and a noise canceling earphone. (b) A partial enlargement of the hand operation

前额叶皮层神经元的编码的变异性 and 噪声的干扰^[31]. 简而言之, 经过相关的行为训练, 会有更多的神经元以更强的力度、更精确的方式参与编码相关任务, 并且这与工作记忆容量的提升有一定的正相关性^[32].

3.2 基于触觉交互任务的认知能力增强

基于视听觉交互任务的训练思路主要是通过视听觉通道的信号呈现给用户沉浸有趣的画面和故事情节, 来吸引用户的注意力. 这类注意力训练任务没有挖掘和充分利用人类触觉通道的巨大潜力, 包括人的触觉感受能力、运动和力控制能力、触觉通道的选择注意能力, 以及视听触跨感觉信息加工能力. 如何发挥人固有的触觉通道能力, 设计新型的触觉交互工具, 提供新的交互任务对人进行训练, 从而探索注意力调控的新途径.

研究表明, 持续性触觉关注的交互任务能够产生注意力训练效果. 基于 Phantom desktop 对手施加 15 Hz 持续振动触觉刺激, 可以增加人脑顶部 (C3/C4 区域) 的 SMR (Sensory-Motor Rhythms) 能量值提高, 表明了触觉激励对于脑电调节的有效性^[33]. 进一步研究可将触觉刺激扩展到人体不同部位, 例如人手、颈部、背部、腰部、足底等, 因为这些部位在大脑皮层内运动感觉区有不同的对应区域, 探索不同部位进行刺激所产生的注意力调控和训练效果的差异.

视听觉信号与大脑的通讯是单向的, 只具有传入通道, 而在执行力控制和运动控制任务时, 力觉信号与大脑通讯是双向的, 具有传入和传出通道. 研究表明, 触觉反馈下的精确力控制训练任务能够提高注意力控制能力^[34]. 如图 1 所示, 作者设计了难度自适应变化的精细力控制任务来进行注意力训练. 训练任务中, 被试左右手分别抓持一个力觉交互设备的末端手柄. 训练要求被试控制右手设备手柄精确按压一个虚拟平面. 如果压力在预设的幅值误差范围内, 则被试的左手会感觉到一个振动信号; 如果压力偏大, 被试的左手会感觉到一个向上的推力; 如果压力偏小, 被试的左手会感觉到一个向下的推力; 如果压力控制满足预设误差要求, 而且该力持续 2 s, 则成功完成一次训练.

完成一次训练后, 被试需要抬起右手的手柄, 以开始下一次训练, 即重新按压虚拟平面, 此时按压的目标力幅值将会发生变化 (幅值在 1~2 N 之间随机变化), 而且按压力的期望误差值也随之变化. 如果上一次训练中操作总时间小于 4 s, 则增大任务难度, 即减小力的误差阈值; 否则, 就减小任务难度. 上述自适应的策略使训练任务难度始终和被试的操作水平相匹配^[35].

上述训练的特点是人的视觉和听觉通道都被屏蔽,完全依赖触觉觉通道进行感知和操作.这样能让人在训练过程中更专心,排除外界环境的干扰.

为验证注意力训练的效果,采用了3个注意力测试任务来测量被试训练前后注意力能力的变化,包括基于Gabor图片的分辨测试、快速数字搜索运算、舒尔特方格快速点击任务,来测量被试控制自己不分心的能力.这些任务的目的是测量被试是否能够时刻专注在测量任务中,只要被试在测试中出现走神或分心,就会降低测试得分.

实验数据表明,触觉觉通道反馈下的精确力控制任务能够提升注意力,而且这种注意力控制能力可以迁移到与触觉无关的各类注意力控制任务中,包括视觉分辨、数学计算和视觉搜索等.通过对照组实验数据表明,固定难度的力控制任务以及自适应难度的运动控制任务则不能有效提升这些认知能力.

基于触觉交互任务的注意力训练的研究尚比较少,研究者需进一步探索力觉信号双向神经传导特性对注意力的调控效果.通过对比感知任务和控制任务的调控效果差异,对比分析输入与输出通道的神经调控机理,在此基础上寻求有效的调控方法,进而发挥传出通道上力觉信号传导对大脑状态影响的独特优势,设计出使被试大脑具有更高专注度的注意力调控方法.

3.3 基于经颅电磁刺激的认知能力增强

经颅磁刺激(TMS)和经颅直流电刺激(tDCS)被用于认知能力增强训练.基本原理是用微弱电磁刺激在大脑中生成电流,并且用这种电流来提升或者抑制大脑的某些功能和状态.其本质是借由兴奋和抑制来对脑皮层的神经元进行引导.由于电流释放的频率和位置可以通过电磁来调节,所以利用TMS可以在脑内产生出不同速度的电流脉冲.通常高速电流脉冲拥有刺激的作用,而低速电流脉冲有抑制作用.

2016年3月,美国国防部先进研究项目局(DARPA)启动了一个名为“靶向神经可塑性训练”(TNT)的项目,寻求通过精确激活周围神经(可以依次促进和加强大脑中的神经联系),通过脊髓和末梢神经刺激来达到增强脑力的效果,提升认知技能训练的速度及有效性,旨在利用“颅内芯片”来帮助人提升学习能力、逻辑运算和记忆力,即“智能增强”.TNT将深度脑部刺激应用于健康的成年人群体,标志着正式将智能增强推上民用化和商业化的进程.

末梢神经和中枢神经刺激的方法称为深度脑部刺激(DBS),需要将芯片放入小脑,借由绝对安全的大脑耐受量之下的电流对大脑进行更为精细的调控.DBS最初被用于癫痫病和中风的治疗,深入研究发现可以通过操控大脑的每一个细微部分来直接或间接改变大脑的运行原理,增强或抑制脑内化学物质如“多巴胺”的分泌量,以此来完成对大脑状态的调控.

3.4 基于脑机接口技术的认知能力增强

传统的脑机接口技术研究的是从脑到机的信息处理,智能增强需要研究从机到脑的路径,即将感知反向编码成能被大脑读懂的信号.机到脑的研究相比脑到机一直要缓慢许多,原因就是目前神经科学对于神经编码的具体方式还处于未知状态.而由机到脑对神经编码知识的需求要远大于从脑到机.

Musk创建了以植入型脑机交互芯片为基础的智能增强研究的公司Neuralink,其技术实现依靠的是一种被称为“神经织网”的高级植入物,以增强记忆、推动人脑和计算设备的直接连接,其应用领域最初有可能是治疗顽固性脑部疾病,如癫痫病或中度抑郁症等的医疗领域.

由美国国立卫生研究院 (NIH), DARPA 等组织提供资助的 Kernel Co 瞄准的是负责长期记忆的海马体, 通过人工智能来“读取”海马体写进芯片的内容, 准确率达到 80%, 并且将开始人体试验。

MindMaze 公司构建一个结合 VR、脑成像、计算机图形学和神经科学的平台, 一个集成到可穿戴式头显和 3D 动捕相机的用户界面, 为神经系统疾病患者创造 VR 和 AR 环境。旨在为患有脑损伤的患者提供多感觉反馈, 以在康复期间刺激运动功能。

Kernel 公司试图寻求通过在大脑中植入芯片来增强人各项能力的方法, 希望在人类寿命日益延长的情况下, 通过技术手段大幅度提高人们的生活质量。为实现这一目标, Kernel 的首要计划是为认知障碍患者开发一种神经输入/输出设备。

在教育领域, BrainCo 的目的是改善注意力跨度, 通过可穿戴设备 (结合脑机接口) 和神经反馈训练来帮助那些注意力不集中或患有学习障碍的人群^[36]。产品包括一个集成的教室系统, 通过可穿戴设备或头带来查看学生大脑中发生的事情。如果学生难以集中注意力, 或如果学生很无聊, 教师就可以得到反馈, 从而帮助教师实时改变教学方法。把该技术从可控环境带向真正的课堂十分具有前景。此外, InteraXon 公司研制了一种脑波检测头带 Muse, 可帮助用户通过实时音频反馈来提升冥想。

4 面向智能增强的多模态人机交互总体框架

本节结合虚拟现实环境下视听触多通道人机交互的 3I 特性^[37](沉浸感 (immersion)、交互性 (interaction) 和想象性 (imagination)), 基于有限状态机模型的工程控制论思想, 基于心流理论的游戏化设计理念这 3 个要素, 提出基于赫布型学习理论的面向智能增强的视听触觉多模态有机融合的人机交互机制。

4.1 虚拟现实环境下人机交互的基本特点

通过深入挖掘虚拟现实系统的 3I 特性, 即沉浸感、交互性、想象性的本质优势, 设计面向认知能力训练的多模态人机交互机制^[38]。

基于沉浸感的特点, 构建具有高逼真度、高沉浸感、可实时控制的视听触觉多通道激励信号。通过对于信号的刺激强度、呈现时机、模态选择等参数的实时控制, 来调节人脑与虚拟环境之间的输入输出信息, 从而实现认知负荷调控、注意力导向调控、记忆负荷调控。此外, 通过沉浸式头盔显示设备和抗噪声耳机, 实现外界环境中视听觉干扰信息的屏蔽。

基于交互性的特点, 构建及时的人-机信息双向交互机制, 包括人脑和人体生理信号的实时检测与反馈, 计算机模拟的 VR 训练场景的实时更新和自适应演化, 从而实现大脑状态的实时观测与适当干预, 构建体脑双向互动调控的新型人机交互系统。

基于想象性的特点, 突破物理世界的时空限制, 构建激发受训者兴趣和特长的训练场景和训练任务。跨越时间和空间障碍, 设计有趣的故事情节, 发挥人类智能的无边界发散特性, 发挥被试的想象力, 激发被试情绪和心理上的共鸣。

4.2 基于生物工程控制论的交互机制

基于有限状态机的思想, 实现注意力 5 种网络的调控机制。在持续性注意任务中, 前人研究^[39]指出, 当被试在进行一个需要长期处于集中注意力的任务 (如冥想) 时, 注意力状态处于闭环循环模型中,

图2 (网络版彩图) 双回路闭环协同控制的概念

Figure 2 (Color online) Double closed-loop training of attention

包括专注态、走神态、觉察态、干扰抑制态和调节态。注意力研究的难点在于人脑是一个“黑箱”，注意力状态的内部演化如何能够被计算机程序检测和识别，是认知能力调控的一个难点问题。

将“工程控制论”的思想用于注意力的训练上，通过人类触觉交互行为的独特性，借助于可观测的触觉交互行为，即通过特殊设计的触觉交互范式，实现大脑内部认知活动的能观测和能调控，进一步通过长期训练达到能塑、能迁移、能保持。例如基于触觉交互任务的输出特性，可以实现持续检测注意力状态的“外部传感器”，有望在时间尺度上及时、客观、无盲区地检测走神的发生。

如图2所示，借鉴闭环控制的研究思路^[40]，提出双回路闭环协同控制的概念，即触觉交互行为学反馈控制回路和生理学检测反馈回路。在行为学层面，结合反应时间、成功率等行为成绩参数；在生理学层面，结合脑电、呼吸、心电、按压、皮肤电导等多源信号的生理状态检测和生物反馈。为有效结合行为强化和神经反馈的优势，需要研究其中信息感知—注意投射—信息加工—肢体动作的神经信号耦合动力学问题。

在控制率设计上，需要融合流理论和游戏化理念^[41,42]，包括：难度与能力匹配、设定明确的目标、及时反馈、正向激励，从而实现认知负荷可控、生理反馈及时的有效训练系统设计。

在多通道任务的协同交互范式设计中，借鉴赫布理论中脑网络同步强化原则^[43]，交互范式中保证目标脑网络（注意力脑网络或工作记忆脑网络）、触觉信息感知相关的脑网络、触觉信息输出的相关脑网络、视听觉信息感知相关的脑网络的同步激活，从而实现赫布型学习的目标。

4.3 基于赫布型学习理论的多通道交互总体框架

基于赫布型学习理论和视听触多模态有机融合，提出如图3和4的多感觉激励作用的注意力、工作记忆训练系统框架，构建认知负荷可控、生理反馈及时、体脑双向交互的新型人机交互系统，提出人的智能增强训练的新方法。

在该框架中，存在3个待研究的问题：多感觉通道人机交互范式和任务设计、认知能力可塑性效应验证、迁移和保持效应验证。基于该框架，需要深入探究视听触交互任务对注意力的调控机理，研究不同交互行为对于大脑皮层可塑性的影响，即较长时间的多通道交互任务训练后，受训者的认知能力是否能够发生显著变化，这种变化的效果能够保持多长时间，这种变化的效果是否能够迁移到与受训任务不同的其他任务中去。

图 3 (网络版彩图) 基于赫布型学习理论和多通道交互任务的注意力训练框架

Figure 3 (Color online) Attention training based on Hebbian learning theory and multi-channel interactive task

图 4 (网络版彩图) 基于赫布型学习理论和多通道交互任务的工作记忆训练框架

Figure 4 (Color online) Working memory training based on Hebbian learning theory and multi-channel interactive task

5 面向智能增强的人机交互的关键技术

面向智能增强的人机交互需要在 3 项关键技术展开深入研究: 多感觉通道人机交互范式和任务设计、认知能力可塑性效应验证方法、迁移性和时效性验证方法。

5.1 交互范式和交互任务

为了探索多模态人机交互任务对注意力调控的有效性, 需要探索通过触觉通道进行注意力调控和提高的可能途径. 显而易见, 不是所有类型的触觉交互任务能够对大脑的注意力控制能力产生促进作用, 因此需要甄别哪些触觉交互任务能够让人保持不间断的注意力, 即哪些任务需要高度集中注意力才能完成. 将通过对比触觉通道不同类型任务 (传输、编码、转换、记忆) 上激活的脑区, 来探索和甄

图5 (网络版彩图) 可佩带于颈部和腕部的穿戴式力反馈装置原型样机

Figure 5 (Color online) Wearable force feedback device that can be worn on the neck and wrist

别出能够调动人的注意力的任务集合。

在上述各种能够调动注意力的任务集合中, 需要进一步筛选出哪些任务可以实现神经可塑性效应, 即采用这些任务进行一段时间训练后, 能够让受训者的注意力控制能力显著提高。有必要深入剖析发生这种神经可塑性的神经机理和生理机制, 测量大脑的哪些区域或功能发生了塑性变化, 以及为什么这些变化能够产生等问题。

基于触觉生理心理学和多通道融合感知交互理论, 探究触觉实时灵敏感知范式、精确快速控制触觉交互范式、视听触多通道融合交互范式下各类交互任务对于注意力和工作记忆等认知资源的调度度。针对各类不同的交互任务, 需要研究注意力水平的实时监测、注意力控制和调控方法、有效的迭代强化训练机制, 最终找到支持智能增强的有效交互范式。

5.1.1 触觉输入通道交互范式

在触觉信号的输入通道上, 开展基于触觉感知任务的注意力调控机理分析。研究受训者接受施加在皮肤上的力触觉激励信号, 探索比较各种可能的感知任务对注意力调控的效果, 通过神经电生理和神经影像学手段来探究导致不同任务间调控效果差异的生理因素和神经机制。具体包括体表多部位力触觉刺激效果差异研究和不同刺激源(如法向力、切向力、摩擦力等)的调控效果差异研究等。

基于该发现, 可进一步研制适应身体不同部位的穿戴式力觉激励装置(如图5所示), 对人体的手腕、颈部、背部、腰部、足底等不同部位施加特定频率的力觉激励, 通过这种外界激励使脑电波产生对外界诱导信号的跟随和共振效应^[45]。需要系统化研究1~30 Hz的不同触觉激励信号对于大脑的激活效果, 基于这些数据探索有效的注意力调控任务。

5.1.2 触觉输出通道交互范式

在触觉信号的输入通道上, 开展基于触觉控制任务的注意力调控机理分析。探索比较受训者进行不同类型的运动控制或力控制的任务时, 对注意力调控的效果, 通过神经电生理和神经影像学手段探究导致不同任务间调控效果差异的生理因素和神经机制。具体包括精确压力控制任务的调控机理、精确运动控制任务的调控机理、力和运动协调控制的精确控制任务的调控机理等。

前期研究表明纯粹触觉反馈下的力控制任务能够促进短期注意力提高, 表明了力控制任务对于注意力调节的有效性。基于该发现, 有必要进一步研究其他类型基于精确力控制的触觉控制任务, 包括基于多指尖精确力控制任务、双手握持力反馈手柄的协调操作任务对注意力的调节效果, 以及和音乐反馈结合以提高训练趣味性的可能性。

针对位置控制任务, 例如手持工具的精确速度控制任务、精确轨迹跟踪任务等对于注意力的需求。

图 6 (网络版彩图) 多感觉通道激励下神经信号监测和注意力调控实验平台

Figure 6 (Color online) Neural signal monitoring and attention control platform based on multi-channel stimuli

在此基础上, 对比不同类型的控制任务下的注意力认知负荷差异, 寻找有效的触觉控制任务. 例如对比力控制任务、速度控制任务、呼吸结合任务等. 探索一些重要的科学假设, 例如在力控制任务中, 反馈信号的通道类型和呈现时刻对于注意力训练有何影响? 是否对于注意力的认知负荷越高, 是否对注意力的训练效果越好?

针对力和位置的协调控制的精确控制任务, 需要在力的约束下完成, 例如克服外界的随机干扰力场实现精确运动控制, 克服各类噪声 (感知噪声、控制噪声、任务噪声、环境噪声) 来实现运动控制任务, 例如保持接触力状态下的轨迹跟踪^[46]、穿刺后的超调控制、基于 Fitts 原理的动态目标捕捉和轨迹精确跟踪任务、力和力矩的精确控制任务等. 基于六自由度力觉渲染算法, 设计构造精细控制任务的场景. 该算法可以实时检测用户控制的虚拟工具是否与环境中的其他障碍物产生碰撞, 并产生逼真的力觉反馈. 基于这些任务, 可调动被试的运动感知能力、力感知能力、运动控制能力、力控制能力等, 使大脑处于高度集中状态, 使被试处于全神贯注和/或高度紧张的认知/操作负荷下, 来观察和分析不同操作下的脑波变化规律, 寻找有效的注意力调控方法.

5.1.3 视听触多模态融合交互范式

基于触觉交互范式, 研究视听触多通道融合交互范式下各类交互任务对于注意力和工作记忆的训练效果.

在信号感知方面, 开展多感觉通道联合调控机理分析. 区别于单通道调节, 探索力触觉 - 听觉 - 视觉多通道信号联合激励下的注意力调控机理. 探索多通道刺激信号的不同组合方式对调控效果的影响, 揭示多感觉通道相互增强或相互干扰的决定因素和作用机理. 构建如图 6 所示多感觉通道激励下神经信号监测和注意力调控实验平台, 研究视听触觉激励联合对于脑电信号的影响, 分析不同类型感知任务下的注意力负荷; 针对信息的感知过程, 来分析触觉神经信息传递通路和视听觉信号存在哪些区别, 主要对比信息传递速率、时间消耗、影响大脑皮层区域等参数的差别, 来分析基于触觉感受任务的注意力调控机制相对于视听觉感受任务的调控有哪些优势; 有必要借鉴斯特鲁普效应 (Stroop

图7 (网络版彩图) 基于VR沉浸式环境的视觉触觉联合的注意力训练系统原型样机
Figure 7 (Color online) Attention training system based on visuo-haptic VR environment

effect), 当不同感觉通道之间的反馈信号属于协调、矛盾等不同状态下, 人的大脑将处于不同认知负荷下, 通过设计可调认知负荷的交互式任务, 实现大脑状态的高效调控. 未来将研究多感觉组合的刺激效应, 基于自主研发的多通道激励下脑波信号监测和调控实验平台, 对比视觉-听觉-力触觉不同类型组合方式下的激励效果差别, 重点对比相容刺激/相扰刺激下的效果差别.

在信号呈现方面, 针对3类控制任务(力控制、运动控制、力和运动协调控制), 需要进一步对比不同感觉通道参与下的控制任务的调控效果差异, 例如单纯触觉通道、触觉和视-听觉通道联合等情况下, 这些任务对于注意力的训练效果是否相同. 如图7所示为基于VR沉浸式环境的视觉触觉联合的注意力训练系统原型样机. 为探索有效的注意力训练途径, 需要结合不同神经活动测量设备的优势, 例如结合脑电测量时间分辨率高和核磁功能成像空间分辨率高的优势. 脑电测量适合作为注意力状态的实时监测和构造闭环神经反馈任务. 而核磁功能成像由于时间分辨率较低, 难以作为注意力状态的在线监测工具, 其主要作用在于作为离线数据观测工具, 对注意力训练前后的被试认知能力进行评估. 例如在前后测任务中, 采用核磁功能成像来评估被试的默认脑网络的激活情况, 从而验证多模态人机交互任务对于脑网络的可塑性影响.

5.2 可塑性效应的证据

为研究触觉通道任务对于持续性注意力的调控效果, 需要选定注意力的测量方法, 寻找表征注意力能力测量的有效证据, 即如何测量人的注意力水平, 探索什么样的测试任务或人体生理指标能够作为金标准来测量人的注意力控制水平. 基于训练前后的测试任务成绩变化或指标变化, 才能够证明受训者注意力控制能力是否提高, 而且这种测试任务不应该具有学习效应. 需要探索两类注意力测量方法作为验证注意力或工作记忆训练效果的证据.

第一类是行为学证据. 通过设计一系列测试任务, 来测量受训者在接受触觉训练前后的测试成绩差别. 测试任务应该具有比较大的覆盖面, 从而探索注意力可以转移的任务范围有多大, 包括触觉通道内转移任务和触觉通道外转移任务. 例如不同于训练任务的触觉操作或感受任务、视觉感知任务、数学运算、时间估算等. 此外, 需要研究测试的难度与学习效应的关系, 即任务越简单越好, 还是越复杂越好?

第二类是生理学证据. 采用神经电生理和神经影像的手段, 监测触觉训练中、触觉训练前后脑组织的活动变化, 包括参与的脑区、激活的程度、脑区之间的连接强度、典型脑组织的面积和体积变化等, 进一步探索有效的指标来量化度量中枢神经系统的状态, 脑区活动的强弱和方式, 通过脑区溯源分析、脑区非线性动力学分析、脑连接网络分析、时频分析等方法来揭示触觉通道对注意力实现有效

训练途径的生理和神经机制。

为评价注意力训练任务的效果, 可以通过对比在训练前后人脑生理信号的变化, 作为受训者注意力能力变化的证据。需要探索什么样的生理信号能够有效表征人的注意力控制水平, 例如脑电 (EEG) 和 fMRI 来测量不同脑区的活动强度, 以及脑区之间的连接强度变化。此外, 需要对比静息态和任务执行过程中的生理信号差异, 探索什么样的特征能够作为稳定的生理表征。

5.3 迁移性和时效性效应

需要研究视听触多通道训练获得的注意力控制能力的可迁移性和时效性, 即探究通过训练获得的注意力控制能力能否可以在与触觉无关的各类认知控制任务中应用, 这将决定训练的适用范围和应用价值。

为此, 需研究两个问题。一是注意力可迁移的任务范围, 即视听触多通道训练产生的注意力训练效果可以转移到哪些类型的认知控制任务中去。当待测试的认知控制任务和触觉训练任务差别较大时, 例如触觉训练对于视听觉通道认知任务的注意力控制是否有效果, 有待深入研究。进一步, 需要研究注意力控制能力的时效性, 即注意力控制能力的保持时间。在停止训练后注意力的控制能力在多长时间以内仍然存在, 以及不同训练任务产生的时效性有何差异等。

6 结论

人类智能 (HI) 和人工智能 (AI) 是智能时代的两个主要力量, 如何实现两者之间的共生而非竞争, 实现两者的有机融合与优势互补, 是未来科技发展不可回避的话题。

虚拟现实技术的发展, 为构建视听触觉多模态有机融合的人机交互系统提供了丰富的可能。基于赫布型学习理论等可塑性机制, 构建认知负荷可控、生理反馈及时、体脑双向交互的新型人机交互系统, 有效支持人类智能的增强和训练, 将是人机交互研究的一个新命题。面向智能增强的人机交互研究将为揭示和认识人脑神经可塑性机制提供新的研究工具, 同时将促进新型人机交互范式、交互硬件设备、交互软件方法等研究, 研究成果将在个性化教育、神经康复、特种职业认知能力强化等领域产生应用价值。

参考文献

- 1 Gruzelier J H. EEG-neurofeedback for optimising performance. I: a review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neurosci Biobehav Rev*, 2014, 44: 124–141
- 2 Zheng N N, Liu Z Y, Ren P J, et al. Hybrid-augmented intelligence: collaboration and cognitionality. *Front Inf Technol Electron Eng*, 2017, 18: 153–179 [郑南宁, 刘子熠, 任鹏举, 等. 混合 – 增强智能: 协作与认知. *Front Inf Technol Electron Eng*, 2017, 18: 153–179]
- 3 Lutz A, Greischar L L, Rawlings N B, et al. Long-term meditators self-induce high-amplitude gamma synchrony during mental practice. *Proc Natl Acad Sci*, 2004, 101: 16369–16373
- 4 Gazzaniga M S, Ivry R B, Mangun G R. *Cognitive Neuroscience*. New York: Norton Company, 2014
- 5 Baddeley A. Working memory. *Science*, 1992, 255: 556–559
- 6 Klingberg T, Forssberg H, Westerberg H. Increased brain activity in frontal and parietal cortex underlies the development of visuospatial working memory capacity during childhood. *J Cogn Neurosci*, 2002, 14: 1–10
- 7 Merzenich M M, Kaas J H, Wall J, et al. Topographic reorganization of somatosensory cortical areas 3b and 1 in adult monkeys following restricted deafferentation. *Neuroscience*, 1983, 8: 33–55

- 8 Wall J T, Kaas J H, Sur M, et al. Functional reorganization in somatosensory cortical areas 3b and 1 of adult monkeys after median nerve repair: possible relationships to sensory recovery in humans. *J Neurosci*, 1986, 6: 218–233
- 9 Maguire E A. Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proc Natl Acad Sci*, 2000, 97: 4398–4403
- 10 Elbert T, Pantev C, Wienbruch C, et al. Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 1995, 270: 305–307
- 11 Hebb D O. *The Organization of Behavior, A Neuropsychological Theory*. Hoboken: John Wiley, Chapman Hall, 1949
- 12 Song S, Miller K D, Abbott L F. Competitive Hebbian learning through spike-timing-dependent synaptic plasticity. *Nat Neurosci*, 2000, 3: 919–926
- 13 Markram H, Lübke J, Frotscher M, et al. Regulation of synaptic efficacy by coincidence of postsynaptic APs and EPSPs. *Science*, 1997, 275: 213–215
- 14 Fan J, McCandliss B D, Sommer T, et al. Testing the efficiency and independence of attentional networks. *J Cogn Neurosci*, 2002, 14: 340–347
- 15 Raz A, Buhle J. Typologies of attentional networks. *Nat Rev Neurosci*, 2006, 7: 367–379
- 16 Tang Y Y, Posner M I. Attention training and attention state training. *Trends Cogn Sci*, 2009, 13: 222–227
- 17 McGonigal J. *Reality is Broken: Why Games Make Us Better and How They Can Change the World*. New York: Penguin Press, 2011
- 18 Baniqued P L. Cognitive training with casual video games: points to consider. *Front Psychol*, 2014, 4: 19
- 19 Latham A J, Patston L L M, Tippet L J. The virtual brain: 30 years of video-game play and cognitive abilities. *Front Psychol*, 2013, 4: 629
- 20 Oei A C, Patterson M D. Enhancing cognition with video games: a multiple game training study. *PLoS One*, 2013, 8: 16
- 21 Anguera J A. Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature*, 2013, 501: 97–101
- 22 Green C S, Bavelier D. Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, 2003, 423: 534–537
- 23 Bavelier D, Green C S, Davidson R J, et al. A national science foundation report. In: *Proceedings of Workshop on Interactive Media, Attention, and Well-Being*, Washington, 2012
- 24 Green C S, Pouget A, Bavelier D. Improved probabilistic inference as a general learning mechanism with action video games. *Curr Biol*, 2010, 20: 1573–1579
- 25 Montani V, de Grazia M D F, Zorzi M. A new adaptive videogame for training attention and executive functions: design principles and initial validation. *Front Psychol*, 2014, 5: 409
- 26 Green C S, Bavelier D. Learning, attentional control, and action video games. *Curr Biol*, 2012, 22: 197–206
- 27 Jaeggi S M, Buschkuhl M, Jonides J, et al. Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proc Natl Acad Sci*, 2008, 105: 6829–6833
- 28 Fukuda K, Vogel E, Mayr U, et al. Quantity, not quality: the relationship between fluid intelligence and working memory capacity. *Psychon Bull Rev*, 2010, 17: 673–679
- 29 Jolles D D, van Buchem M A, Crone E A, et al. Functional brain connectivity at rest changes after working memory training. *Hum Brain Mapp*, 2013, 34: 396–406
- 30 Meyer T, Qi X-L, Stanford T R, et al. Stimulus selectivity in dorsal and ventral prefrontal cortex after training in working memory tasks. *J Neurosci*, 2011, 31: 6266–6276
- 31 Qi X-L, Constantinidis C. Correlated discharges in the primate prefrontal cortex before and after working memory training. *Eur J Neurosci*, 2012, 36: 3538–3548
- 32 Constantinidis C, Klingberg T. The neuroscience of working memory capacity and training. *Nat Rev Neurosci*, 2016, 17: 438–449
- 33 Zhang S, Wang D, Afzal N, et al. Rhythmic haptic stimuli improve short-term attention. *IEEE Trans Haptics*, 2016, 9: 437–442
- 34 Wang D, Zhang Y, Yang X, et al. Force control tasks with pure haptic feedback promote short-term focused attention. *IEEE Trans Haptics*, 2014, 7: 467–476
- 35 Yang X, Wang D, Zhang Y. An adaptive strategy for an immersive visuo-haptic attention training game. In: *Proceed-*

- ings of the 10th International Conference on Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications, London, 2016. 9774: 441–451
- 36 Jiang L, Guan C, Zhang H, et al. Brain computer interface based 3D game for attention training and rehabilitation. In: Proceedings of the 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Beijing, 2011. 124–127
- 37 Bohil C J, Alicea B, Biocca F A. Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nat Rev Neurosci*, 2011, 12: 752–762
- 38 Cho B. The effect of virtual reality cognitive training for attention enhancement. *Cyberpsychology Behav*, 2002, 5: 129–137
- 39 Hasenkamp W, Wilson-Mendenhall C D, Duncan E, et al. Mind wandering and attention during focused meditation: a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. *Neuroimage*, 2012, 59: 750–760
- 40 de Bettencourt M T, Cohen J D, Lee R F, et al. Closed-loop training of attention with real-time brain imaging. *Nat Neurosci*, 2015, 18: 470–475
- 41 Csikszentmihalyi M. *Flow and the Psychology of Discovery and Invention*. New York: Harper Collins, 1996
- 42 Keller J M. Development and use of the ARCS model of motivational design. *J Instr Dev*, 1987, 10: 2–10
- 43 Caporale N, Dan Y. Spike timing — dependent plasticity: a hebbian learning rule. *Annu Rev Neurosci*, 2008, 31: 25–46
- 44 Petersen S E, Posner M I. The attention system of the human brain: 20 years after. *Annu Rev Neurosci*, 2012, 35: 73–89
- 45 Wang D X, Xu M, Zhanq Y R, et al. Preliminary study on haptic-stimulation based brainwave entrainment. In: Proceedings of World Haptics Conference, Daejeon, 2013
- 46 Niksirat K S, Silpasuwanchai C, Ahmed M M H, et al. A framework for interactive mindfulness meditation using attention-regulation process. In: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Denver, 2017. 2672–2684

Multi-modal human-machine interaction for human intelligence augmentation

Dangxiao WANG*, Yilei ZHENG, Teng LI, Cong PENG, Lijun WANG & Yuru ZHANG

State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100083, China

* Corresponding author. E-mail: hapticwang@buaa.edu.cn

Abstract Human-machine symbiosis and harmony is an ultimate goal of human-machine interaction (HMI). Recently, the rapid development of artificial intelligence has given rise to concern regarding the domination of machine intelligence over human intelligence. Enhancing human intelligence through multi-modal HMI technology is becoming an important research topic. The studies on neural plasticity indicate that the core capabilities of human cognition including attention control ability and working memory capacity could be enhanced and trained through several approaches including visual-auditory games, haptic interaction tasks, transcranial electromagnetic stimulation, and brain-computer interfaces. In this paper, we propose a systematic paradigm of augmenting cognition through HMI tasks by seamlessly integrating haptic-visual-aural multisensory feedback. This paradigm is constructed on analyzing the inherent features of virtual reality including immersion, interaction, and imagination. Based on the concept of cybernetics, cognitive enhancement methods based on Hebbian learning are proposed to achieve several goals including the realization of controllable cognitive loads, immediate physiological feedback, and bidirectional mind-body interaction. The proposed paradigm may provide new tools for revealing the mechanism of neural plasticity and promote the development of novel human-machine interaction devices; it is promising in the generation of practical values in the domain of personalized education, neural rehabilitation, and cognitive training of specialized personnel.

Keywords neural plasticity, haptic interaction, haptic-visual-aural multisensory feedback, human-machine interaction, attention, working memory, cognitive enhancement

Dangxiao WANG received his Ph.D. degree from Beihang University, Beijing, China in 2004. Currently, he is a professor at the State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems at Beihang University. From 2004 to 2006, he was a postdoctoral researcher at Beihang University. From 2006 to 2016, he was an assistant and associate professor at the School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University. His research interests include haptic rendering, neurohaptics, and medical robotic systems. He is a senior member of IEEE.

Yilei ZHENG received her M.E. degree in mechanical engineering in 2017 from Beihang University, Beijing, China. Currently, she is working toward her Ph.D. degree in mechanical design and theory at Beihang University. Her research interests include brain-computer interaction and neurohaptics.

Lijun WANG received her B.E. degree in mechanical engineering in 2016 from the China University of Mining and Technology, Beijing. Currently she is working toward her M.E. degree in mechanical engineering at Beihang University, Beijing. Her research interest is neurohaptics.

Yuru ZHANG received her Ph.D. degree in mechanical engineering from Beihang University, Beijing, China in 1987. Currently, she is leading the Division of Human-Machine Interaction at the State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems. Her technical interests include haptic human-machine interface, medical robotic systems, robotic dexterous manipulation, and virtual prototyping. She is a senior member of IEEE, and a member of ASME.