·特约稿·

融合视听触反馈的任务导向性康复机器人技术展望与临床应用*

闫旺旺[1] 孙晨阳[1] 马宗浩[2] 张明明[1,3]

脑卒中、脊髓损伤等多种神经系统疾病常导致患者的上肢运动功能发生不可逆转的损伤,成为患者长期残疾的重要原因之一[1]。针对这些患者进行运动功能的康复训练具有重要的临床意义。任务导向性康复训练可促进运动功能恢复并诱导脑损伤后的神经可塑性变化,被认为是一种具有巨大潜力的临床康复方法[2]。近年来,得益于机器人技术在提供精准定量、高度可重复性评估和训练方面的优势,任务导向性康复理论和方法在机器人辅助康复领域被广泛应用。既往研究中涵盖的镜像康复机器人[3]、双边康复机器人[4]、腕关节康复机器人[5]、手功能康复手套[6]等系统已被开发并应用于临床治疗。这些系统也可与虚拟现实技术相结合,以提供更真实的任务渲染环境,进一步提高患者在任务训练过程中的沉浸感和参与感,有效改善患者的康复训练效果和依从性。

与传统康复治疗相比,康复辅助机器人在临床上的增益效果并不显著。近年来,多篇发表于Lancet的多中心临床随机对照试验显示,康复机器人在改善上肢运动功能方面并未表现出较常规护理更高的疗效[7-8]。这也揭示了康复辅助机器人目前面临的关键挑战。与传统临床康复治疗师相比,康复辅助机器人治疗存在以下不足:①缺乏治疗师与患者的直接肢体接触(触觉反馈),难以诱导正确任务动作并及时抑制异常动作;②缺少治疗师的语义指导(听觉反馈);③缺乏感情支持和激励(多感觉反馈)。尽管康复机器人在高强度、重复性方面具有显著的技术优势,但在情感和感官反馈方面的不足可能限制其临床效果发挥。多感觉刺激被证实对神经损伤后功能恢复具有显著优势,不同形式的躯体感觉刺激可扩大初级运动皮层(primary motor cortex,M1)中躯体映射表征并提高运动任务表现[9]。2019年Nature发表的一项研究表明,感觉体验会重塑大脑神经环路中基因结构并驱动运动学习,提高运动学习和记忆的适应性改变[10]。为脑卒中小鼠提供丰富的物理性和社会性刺激(如不同的声音、亮度、气味、色彩等刺激等),创建新颖且互动性强的丰富环境可以有效促进突触结构的修复和功能恢复,对卒中后肢体运动和认知功能恢复具有积极影响[11]。因此,在康复任务训练中融合视、听、触等感觉反馈对增强康复效果起着重要作用。未来,有望应用新的控制算法集成多种感觉刺激(视觉、听觉、触觉)与机器人反馈系统,实现神经损伤患者与康复机器人之间的高效交互[12]。

综上所述,未来康复机器人技术需要在任务导向性训练的基础上、进一步融合多感觉反馈和人机情感交互[13],通过强化发生感觉整合区域增强神经回路的重复性和稳定性来促进神经可塑性,将有望突破目前康复机器人在临床神经康复中的局限,提升神经损伤患者康复效率。

1 融合视、听、触觉反馈对神经功能恢复的潜在神经机制

1.1 视觉促进神经网络机制

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2025.04.001

*基金项目:国家重点研发计划重点专项项目(2023YFF1205200,2022YFF1202502);深圳市科技计划项目(JCYJ20220530113811027);广东省基础与应用基础研究基金项目(2024A1515012308,2024B1515020108);香港研究资助局杰出青年学者计划项目(25100523);中国康复医学会2023年度科技发展项目培育项目(KFKY-2023-050)

1 南方科技大学生物医学工程系,广东省深圳市,518000; 2 香港理工大学生物医学工程学系; 3 通讯作者

第一作者简介:闫旺旺,男,博士研究生; 收稿日期:2024-12-03

视觉刺激可以促进大脑视觉皮层以及与其存在跨膜态连接的脑区发生可塑性改变，包括后顶叶皮层（posterior parietal cortex，PPC）和小脑通路[14]。例如通过视觉刺激，可以增强自顶叶皮层的视觉信息进一步整合处理传递至M1完成运动执行[15]，这有助于感觉-运动整合和运动表现提高，对神经修复具有重要意义。运动执行后，来自视觉、触觉的感知觉信息通过感觉通路反馈于大脑（如顶叶和枕叶），进一步对运动执行进行调整和优化[16]。同时，基底神经节和小脑作为重要的皮层下神经节点执行着独特的运动功能，在运动协调、精细运动学习中发挥重要作用[17—18]。

视觉、听觉和触觉三者之间存在相互影响，视觉刺激可影响听觉皮层的活动而增强听觉信息的表征。在对于单独或混合呈现的声音及与视觉输入中变化相关的声音特征中可观察到听觉信息的增强，这为大脑多感官整合机制提供了支持，表明视觉信息有助于听觉皮层在听觉场景早期整合中的分析[19]。另外，视觉功能与触觉功能之间也存在紧密联系，视觉输入可通过丘脑和后顶叶皮层信息整合，提高多感觉整合从而提高触觉感知能力；反之，触觉刺激也可引起视觉皮层活动性的增强[20—21]。

1.2 听觉促进神经网络机制

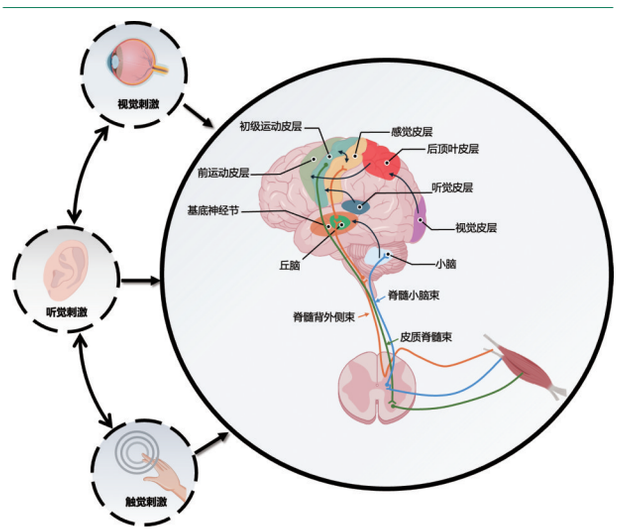
听觉刺激可以显著激活听觉皮层，并与其他脑区产生协同效应，促进广泛的神经功能恢复。有研究表明，通过音乐干预促进运动功能改善的神经机制与听觉-运动神经网络激活有关，听觉输入可以同时激活听觉皮层及运动相关皮层，进而增强运动功能恢复，如前运动皮层（premotor cortex，PMC）和辅助运动区（supplementary，SMA）[22—23]。另外，也有研究发现，音乐刺激可以同步激活运动皮层和基底神经节[24]，促进基底神经节的多巴胺反应，通过基底神经节-丘脑-运动皮质通路对患者情绪体验和愉悦感产生有重要作用[25]。

神经音乐疗法作为一种重要的辅助疗法被广泛用于神经康复领域，例如，节奏性听觉刺激（rhythmic auditory stimulation，RAS）基于外部节奏性和重复性的乐律来促进个体产生有节奏的运动。基于RAS可以进行步态诱导训练，利用节拍作为步行训练时的听觉提示来改善患者步行时机的选择[26]。Ahmed等发现在常规物理治疗基础上，增加有规律的节拍引导可以有效提高脑卒中患者步行速度、步频、步长等步态参数，显著改善步行功能[27]。

1.3 触觉促进神经网络机制

神经损伤后往往会出现感觉障碍，如触觉、温痛觉或复合感觉发生缺失或异常，对患者运动感知和功能恢复产生不利影响。通过触觉、本体感觉等刺激可有效激活外周-中枢感觉神经反馈通路，提高运动感觉整合能力。人体主要通过分布于皮肤末端的机械感受器实现对外界事物的感知，如迈斯纳小体（Meissner corpuscles）、默克尔盘（Merkel discs）、帕西尼小体（Pacinian corpuscles）和鲁菲尼末梢（Ruffini endings）[28—29]等。触觉受多种因素影响（如接触面的粗糙程度、硬度、顺滑性和温度等）[30]。当人体受到触觉刺激，皮肤感受器和感觉神经通路被选择性激活，这些刺激信号由感觉纤维传入大脑感觉编码区，主要包括初级体感皮层（primary somatosensory cortex，S1）和次级体感皮层（secondary somatosensory cortex，S2），大脑对这些感知信息进行刻录、编码、整合处理完成对外界环境的正确感知，并实现正确的运动控制模式[31—33]。感觉皮层与运动皮层在解剖结构和功能上紧密联系，S1中的投射神经元通过突触将感觉信息传递到M1，从而影响运动输出，这对于调节M1兴奋性、协调运动控制和制定运动策略起到重要作用[34—35]。反之，M1向

图1 融合视–听–触觉对神经功能恢复的潜在神经机制



S1的投射会传递运动编码信息至S1[36],这对人体调整运动执行和应对外部环境变化发挥着重要的作用。这些相互作用为M1提供有关感觉环境的信息,同时向S1发出关于正在进行的运动计划的预期知识的信号[37]。

神经损伤后的功能恢复涉及学习和重塑过程,在这一过程中,S1和M1之间的神经元突触效能增强,可能与长时程增强(long-term potentiation, LTP)和N-甲基-D-天冬氨酸特异性谷氨酸受体功能有关[38]。触觉反馈有助于增强S1和M1之间的整合[39],振动触觉反馈通过外部振动信号,直接刺激皮肤的机械感受器,这些振动信号通过感觉神经传导至脊髓和大脑感觉皮层,激活感觉神经通路,提供即时的运动状态反馈。通过这种实时反馈机制,患者能够更好地感知自己的运动状态,及时调整运动姿态和力度,从而提高运动控制的精度和协调性[40—41]。通过将振动刺激与运动任务结合,患者的大脑能够更有效地整合来自触觉和运动的双重信息,从而形成更为准确的运动指令,这种多感官的信息整合可以改善运动学习和记忆,促进神经损伤后功能修复[42]。

2 融合多感官反馈的任务导向性康复机器人

在任务导向性康复机器人基础上,融合多种感官刺激可通过激活特定神经通路,增强大脑感觉-运动整合能力,有助于神经损伤患者大脑发生适应性神经重组和实现功能恢复。基于多感觉反馈促进运动功能恢复可从视觉途径,听觉途径和躯体感觉途径实现,多感官协同作用通过多个感官系统(如视觉、听觉、触觉)同时被激活并相互作用,提高患者任务过程的感知能力并对错误动作及时纠正,其优势主要体现在以下几个方面:①感官整合:大脑整合来自不同感官的信息,从而产生更加全面和准确的感知。②增强效应:多个感官同时被刺激时,比单一感官刺激产生更强的反应,这种增强效应可以提高感知的准确性和反应速度。③交互影响:不同感官的刺激可以相互补充和增强。例如,视觉和听觉的协同作用可以提高对环境的认知和反应能力,视觉和触觉协同作用可以提高精细任务完成准确度并缩短任务时间等[43]。

因此,融合多感觉反馈的任务导向性“全感康复”机器人训练系统(图2)在提高神经可塑性方面具有巨大潜力,将康复机器人与视觉、听觉和触觉反馈训练融合,可以通过实时提供环境信息、动作提示和感官刺激,帮助患者调整和优化训练动作,进而提高任务执行的效果。

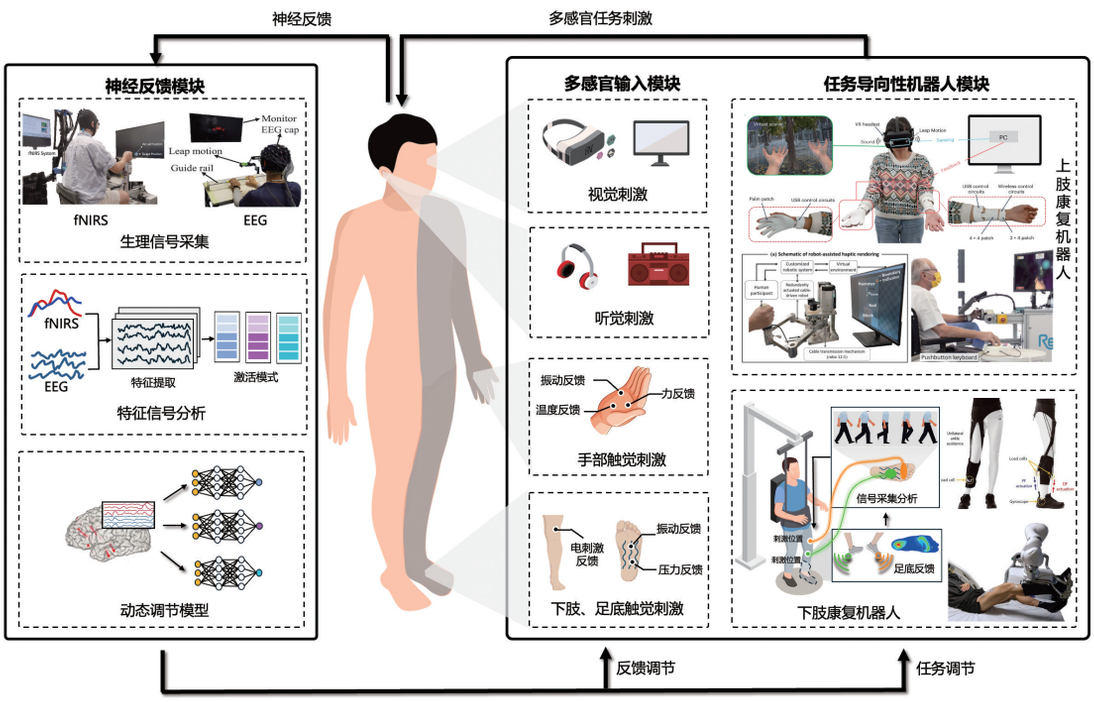
2.1 在上肢康复机器人方面

基于视听触觉融合的多感觉刺激可以有效增强虚拟现实中的沉浸感并提高运动皮层的激活效果。Huang等[44]研究报告了一种基于执行器阵列的皮肤集成无线触觉界面,可提供多种不同的反馈模式(机械、电触觉和热)并选择性地激活不同的皮肤感受器,实现为用户提供更拟真的触觉感知。Zhang等[45]通过机器人触觉建模技术和触觉绘制技术实现康复机器人辅助模拟真实日常任务(如锤钉子),这种具有触觉反馈的机器人辅助任务导向训练对提高神经损伤患者日常生活能力具有重要意义。此外,触觉刺激在脑机接口领域(brain-computer interface,BCI)被证明可以提升运动解码表现,Zhang等[46]融合振动刺激并基于快速傅里叶变换的脑电实时相位预测算法,构建了一种基于实时脑电相位的闭环振动刺激系统,相比于无刺激或者开环刺激,结果显示闭环振动刺激能显著提高运动想象(motor imagery,MI)范式的整体表现。在未来,有望整合沉浸式触觉反馈界面与任务导向性康复辅助机器人构建更真实的康复训练模拟环境,以个性化的方式自动适应治疗参数,并指导机器人辅助治疗的过程[47]。

2.2 在下肢康复机器人方面

足底感觉在步行功能中发挥着重要的作用,通过足底感觉刺激模拟触觉和本体感觉反馈激活下肢运动神经回路,可有效改善截肢患者行走任务时的步态对称性、稳定性和速度感知[48]。利用下肢辅助机器人结合电刺激将感觉反馈整合到感觉运动回路中对卒中后运动功能改善也有重要意义,例如Petersen等[49]将末端执行器机器人与表面肌电图(surface electromyography,sEMG)触发的股直肌和胫骨前肌的功能性电刺激(functional electrical stimulation,FES)相结合,提出了一种新型的基于sEMG触发的混合下肢康复机器人系统。Awad[50]等研发了一款软性可穿戴下肢机器人以改善卒中后的步行功能,该软性可穿戴机器人可为瘫痪下肢提

图2　任务导向性“全感康复”机器人训练系统



供助力反馈，结果表明该软性助力系统对卒中患者踝背屈、步行对称、能量消耗等方面均有明显改善。

2.3　在闭环神经康复方面

由于神经可塑性是大脑发生适应性改变的动态过程，当大脑持续处于相同或相似的感觉刺激时，大脑的神经可塑性会降低[51]，神经激活与感觉刺激的熟悉程度或新颖性有关，例如，Koyano KW等[52]研究表明随着对视觉刺激的熟悉，视觉皮层的可塑性在刺激后期出现逐渐下降的情况。在康复训练和学习环境中，复杂和多变的感觉刺激环境需要大脑不断地适应新的模式和变化，当刺激处于过于熟悉和可预测情况时，大脑可能会减少对这些刺激的资源分配，通过新颖和具有挑战性的刺激更有可能促进神经可塑性[53—54]。因此，面向神经损伤患者的康复训练要充分考虑多感觉刺激的复杂性、新颖性和挑战性。运用神经影像技术可实现大脑损伤后神经修复相关的生理信号特征提取，并实时反馈给大脑，建立涉及学习和记忆的闭环康复系统。例如，Jiang等[55]将功能近红外光谱（functional near-infrared spectroscopy，fNIRS）用于机器人辅助康复训练中的神经反馈，实现了经典康复任务（抓握、屈肘）的大脑激活空间表征，证明fNIRS构建闭环机器人辅助康复系统的可靠性。未来，在机器人康复辅助训练中，通过整合视觉、听觉和触觉等多种感觉刺激反馈，引入变化性、复杂性和新颖性，将有助于维持或增强神经可塑性，从而提高学习效率并对学习过程中的错误进行有效纠正。此外，对与特定任务相关的脑神经活动进行实时监测，将有助于我们更好地理解学习过程中的神经机制。进一步地，通过提取和分析这些神经特征，可设计针对性的刺激（如视觉、听觉和触觉）和训练程序，并将这些结果反馈给受试者。这样的反馈机制将指导受试者如何通过辅助任务导向的机器人训练，学会自主调节和改善目标脑神经活动。最终形成多感官反馈集成的任务导向性康复机器人训练系统，最大化神经可塑性的潜力，为神经损伤后的康复提供更为高效和个性化的治疗方案。

3　小结与展望

中枢神经系统损伤后的运动功能恢复仍然是神经康复领域面临的一项重大挑战。基于任务导向性机器

人辅助康复训练,融合视、听、触觉刺激反馈,将感觉反馈整合到运动神经回路,将在运动功能恢复方面展示出巨大潜力。随着人工智能技术的进步和精准医疗理念的兴起,将大脑生理信号与外部感觉刺激进行更精确的匹配,并结合特定反馈训练任务的个体化设计,多感官任务导向性康复机器人有望突破现有临床治疗瓶颈,成为推动神经康复功能提升的创新技术。

参考文献

[1] Li XY, Kong XM, Yang CH, et al. Global, regional, and national burden of ischemic stroke, 1990—2021: an analysis of data from the global burden of disease study 2021[J]. E Clinical Medicine, 2024, 75: 102758.

[2] Hsieh YW, Chang KC, Hung JW, et al. Effects of home-based versus clinic-based rehabilitation combining mirror therapy and task-specific training for patients with stroke: a randomized crossover trial [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2018, 99(12): 2399—23407.

[3] Shahbazi M, Atashzar SF, Tavakoli M, et al. Robotics-assisted mirror rehabilitation therapy: a therapist-in-the-loop assist-as-needed architecture [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(4): 1954—1965.

[4] Sheng B, Xie S, Tang L, et al. An industrial robot-based rehabilitation system for bilateral exercises [J]. IEEE Access, 2019, 7: 151282—151294.

[5] Hussain S, Jamwal PK, Vliet PV, et al. State-of-the-art robotic devices for wrist rehabilitation: design and control aspects [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2020, 50(5): 361—372.

[6] Sui M, Ouyang Y, Jin H, et al. A soft-packaged and portable rehabilitation glove capable of closed-loop fine motor skills [J]. Nature Machine Intelligence, 2023, 5(10): 1149—1160.

[7] Rodgers H, Bosomworth H, Krebs HI, et al. Robot assisted training for the upper limb after stroke (RATULS): a multicentre randomised controlled trial [J]. Lancet, 2019, 394(10192): 51—62.

[8] Klamroth-Marganska V, Blanco J, Campen K, et al. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial [J]. Lancet Neurol, 2014, 13(2): 159—166.

[9] Nudo RJ, Wise BM, Sifuentes F, et al. Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct [J]. Science, 1996, 272(5269): 1791—1794.

[10] Yamada T, Yang Y, Valnegri P, et al. Sensory experience remodels genome architecture in neural circuit to drive motor learning [J]. Nature, 2019, 569(7758): 708—713.

[11] Neves LT,Paz LV,Wieck A,et al. Environmental enrichment in stroke research:an update [J]. Transl Stroke Res,2024,15(2):339—351.

[12] Feng G, Zhang J, Chai G, et al. An Effective Training strategy for upper-limb rehabilitation robots based on visual-haptic feedback using potential field[C]. Proceedings of the 2022 12th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER),2022.

[13] Pehlivan AU, Losey DP, Malley MKO. Minimal Assist-as-needed controller for upper limb robotic rehabilitation [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(1): 113—124.

[14] Glickstein M. How are visual areas of the brain connected to motor areas for the sensory guidance of movement? [J]. Trends Neurosci, 2000, 23(12): 613—617.

[15] Dancause N,Barbay S,Frost SB,et al. Extensive cortical rewiring after brain injury [J]. J Neurosci, 2005, 25(44): 10167—10179.

[16] Velu PD, Mullen T, Noh E, et al. Effect of visual feedback on the occipital-parietal-motor network in Parkinson's disease with freezing of gait [J]. Front Neurol, 2014, 4: 209.

[17] Yoshida J, Oñate M, Khatami L, et al. Cerebellar contributions to the basal ganglia influence motor coordination, reward processing, and movement vigor [J]. J Neurosci, 2022, 42(45): 8406—8415.

[18] Groenewegen HJ. The basal ganglia and motor control [J]. Neural Plast, 2003, 10(1—2): 107—120.

[19] Atilgan H, Town SM, Wood KC, et al. Integration of visual information in auditory cortex promotes auditory scene analysis through multisensory binding [J]. Neuron, 2018, 97(3): 640—655.e4.

[20] 贾杰. 脑卒中上肢康复:手脑感知与手脑运动 [J].中国康复医学杂志, 2020,35(4):385—389.

[21] Nakashita S, Saito DN, Kochiyama T, et al. Tactile-visual integration in the posterior parietal cortex: a functional magnetic resonance imaging study [J]. Brain Res Bull, 2008, 75(5): 513—525.

[22] Bengtsson SL,Ullén F,Ehrsson HH,et al. Listening to rhythms activates motor and premotor cortices[J]. Cortex,2009,45(1):62—71.

[23] Ripollés P, Rojo N, Grau-Sánchez J, et al. Music supported therapy promotes motor plasticity in individuals with chronic stroke [J]. Brain Imaging and Behavior, 2016, 10(4): 1289—1307.

[24] Koshimori Y, Strafella AP, Valli M, et al. Motor synchronization to rhythmic auditory stimulation (RAS) attenuates dopaminergic responses in ventral striatum in young healthy adults: [(11)C]-(+)-PHNO PET study [J]. Front Neurosci, 2019, 13: 106.

[25] Salimpoor VN, Benovoy M, Larcher K, et al. Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music [J]. Nat Neurosci, 2011, 14(2): 257—262.

[26] Wang L, peng JL, Xiang W, et al. Effects of rhythmic auditory stimulation on motor function and balance ability in stroke: A

systematic review and meta-analysis of clinical randomized controlled studies [J]. Front Neurosci，2022，16：1043575.
[27] Ahmed GM，Fahmy EM，Ibrahim MF，et al. Efficacy of rhythmic auditory stimulation on gait parameters in hemiplegic stroke patients：a randomized controlled trial [J]. The Egyptian Journal of Neurology，Psychiatry and Neurosurgery，2023，59(1)：8.
[28] Handler A，Ginty DD. The mechanosensory neurons of touch and their mechanisms of activation[J]. Nat Rev Neurosci，2021，22：521—537.
[29] Saal HP，Delhaye BP，Rayhaun BC，et al. Simulating tactile signals from the whole hand with millisecond precision [J]. Proc Natl Acad Sci USA，2017，114(28)：E5693—5702.
[30] Jin H，Kim Y，Youm W，et al. Highly pixelated，untethered tactile interfaces for an ultra-flexible on-skin telehaptic system [J]. NPJ Flexible Electronics，2022，6(1)：82.
[31] Abraira VE，Ginty DD. The sensory neurons of touch [J]. Neuron，2013，79(4)：618—639.
[32] Bergmann Tiest WM，Kappers AM. Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility [J]. Acta Psychol（Amst），2006，121(1)：1—20.
[33] 林佳丽，贾杰. 脑卒中后感觉训练在上肢及手功能康复中的研究进展 [J]. 中国康复医学杂志，2020，35(4)：5.
[34] Izraeli R，Porter LL. Vibrissal motor cortex in the rat：connections with the barrel field [J]. Exp Brain Res，1995，104(1)：41—54.
[35] Ghosh S，Porter R. Corticocortical synaptic influences on morphologically identified pyramidal neurones in the motor cortex of the monkey [J]. J Physiol，1988，400：617—629.
[36] Kinnischtzke AK，Simons DJ，Fanselow EE. Motor cortex broadly engages excitatory and inhibitory neurons in somatosensory barrel cortex [J]. Cereb Cortex，2014，24(8)：2237—2248.
[37] Rocco-Donovan M，Ramos RL，Giraldo S，et al. Characteristics of synaptic connections between rodent primary somatosensory and motor cortices [J]. Somatosens Mot Res，2011，28(3—4)：63—72.
[38] Hasan MT，Hernández-González S，Dogbevia G，et al. Role of motor cortex NMDA receptors in learning-dependent synaptic plasticity of behaving mice [J]. Nat Commun，2013，4：2258.
[39] Chung YG，Kim J，Han SW，et al. Frequency-dependent patterns of somatosensory cortical responses to vibrotactile stimulation in humans：a fMRI study [J]. Brain Res，2013，1504：47—57.
[40] Choi S，Kuchenbecker KJ. Vibrotactile display：perception，technology，and applications [J]. Proceedings of the IEEE，2013，101(9)：2093—2104.
[41] Sigrist R，Rauter G，Riener R，et al. Augmented visual，auditory，haptic，and multimodal feedback in motor learning：a review [J]. Psychon Bull Rev，2013，20(1)：21—53.
[42] Li W，Li C，Xu Q，et al. Effects of focal vibration over upper limb muscles on the activation of sensorimotor cortex network：An EEG study [J]. J Healthc Eng，2019，2019：9167028.
[43] Stein BE，Stanford TR，Rowland BA. Multisensory integration and the society for neuroscience：then and now [J]. J Neurosci，2020，40(1)：3—11.
[44] Huang Y，Zhou J，Ke P，et al. A skin-integrated multimodal haptic interface for immersive tactile feedback [J]. Nature Electronics，2023，6(12)：1020—1031.
[45] Zhang C，Wang C，Li P，et al. Robot-assisted haptic rendering for nail hammering：a representative of IADL tasks [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering，2024，21(3)：4028—4041.
[46] Zhang W，Song A，Zeng H，et al. The effects of bilateral phase-dependent closed-loop vibration stimulation with motor imagery paradigm [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng，2022，30：2732—2742.
[47] Devittori G，Ranzani R，Dinacci D，et al. Automatic and personalized adaptation of therapy parameters for unsupervised robot-assisted rehabilitation：a pilot evaluation [J]. IEEE Int Conf Rehabil Robot，2022，2022：1—6.
[48] Kim D，Triolo R，Charkhkar H. Plantar somatosensory restoration enhances gait，speed perception，and motor adaptation [J]. Sci Robot，2023，8(83)：eadf8997.
[49] Petersen IL，Nowakowska W，Ulrich C，et al. A novel sEMG triggered FES-hybrid robotic lower limb rehabilitation system for stroke patients [J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics，2020，2(4)：631—638.
[50] Awad LN，Bae J，O'Donnell，et al. A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke[J]. Sci Transl Med，2017，9(400)：1—12.
[51] Ribic A. Stability in the face of change：lifelong experience-dependent plasticity in the sensory cortex [J]. Front Cell Neurosci，2020，14：76.
[52] Koyano KW，Esch EM，Hong JJ，et al. Progressive neuronal plasticity in primate visual cortex during stimulus familiarization [J]. Sci Adv，2023，9(12)：eade4648.
[53] Ruge D，Liou LM，Hoad D. Improving the potential of neuroplasticity [J]. J Neurosci，2012，32(17)：5705—5706.
[54] Cameirão MS，Badia SB，Oller ED，et al. Neurorehabilitation using the virtual reality based Rehabilitation Gaming System：methodology，design，psychometrics，usability and validation [J]. J Neuroeng Rehabil，2010，7：48.
[55] Jiang YC，Zheng C，Ma R，et al. Within-session reliability of fNIRS in robot-assisted upper-limb training [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng，2024，32：1302—1313.