

镜像康复机器人在偏瘫康复中的应用研究*

陈臻¹ 刘佳敏¹ 陆晓² 刘宾^{1,4} 李建清^{1,3}

脑卒中发病率、致残率居高不下,亟需新型康复设备加速患者恢复进程。镜像康复机器人是将机器人技术与镜像疗法结合而发展起来的一种具有高度学科交叉的康复机器人系统,能够有效解决镜像康复训练中的关键问题,从而对脑卒中偏瘫患者达到更好的康复治疗效果。本文综述了镜像康复机器人在脑卒中偏瘫康复中的研究现状,分析了在研究中存在的瓶颈问题,并提出了可能的解决方案,期望为从事镜像康复机器人相关研究的人员提供一定的参考。

1 镜像康复机器人的研究现状

镜像疗法(mirror therapy, MT)是一种康复疗法,其通常做法是在受试者的手臂或双腿之间放置一面镜子,以便使患者通过观察健肢运动的镜像而产生患肢正常运动的假象。通过这种操作,可以刺激患者大脑的不同区域产生运动、感觉和疼痛意识,促进脑卒中患者偏瘫肢体运动功能重建与脑功能重塑^[1-3]。如Alma S. Merians等发现,在康复训练过程中,通过提供适当的互动视觉反馈可以促进大脑运动相关区域的激活^[4]。目前该疗法在临床康复训练中得到广泛应用,康复效果较好。

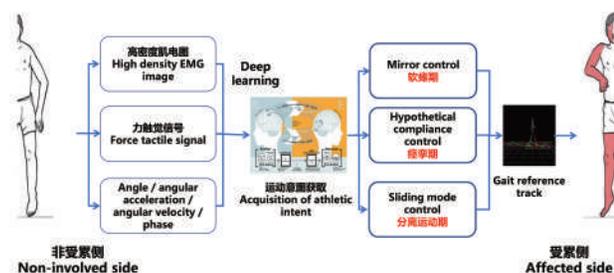
康复训练机器人技术是将机器人技术应用于康复医学领域而发展起来的一种新兴技术,它不但能够加速患者的康复进程,而且能够缓解我国治疗师短缺的现状^[5]。康复机器人目前虽然并不能替代治疗师对患者实施康复训练,但可作为一种辅助工具,通过其不知疲倦的成千上万次重复动作来减轻治疗师繁重的体力劳动,同时精准测量并记录患者的康复训练数据,辅助医生分析治疗效果并优化治疗方案。

镜像康复训练机器人将镜像疗法的理念运用在康复机器人上,它是康复医学、机器人学、生物医学与人工智能等学科领域高度交叉的重点研究对象,将成为解决患者康复训练问题的前沿技术^[6]。它主要通过学习非受累侧上肢运动轨迹、步态轨迹等,利用采样点的角度、角速度、角加速度和相位等信息实时感知患者的主动运动意图,生成受累侧参考轨迹参数化模型,并根据受累侧状态实时调节参考轨迹,带动

患者的受累侧完成康复训练运动,达到康复训练的目的^[7]。

如图1所示,镜像康复机器人可以实时监测患者的康复状态,并调整训练模式。当患者处于软瘫期时,机器人感知受累侧肢体处于软瘫状态,将使用非受累侧带动受累侧的被动或助力镜像训练模式;当患者处于痉挛期,受累侧肢体为痉挛状态,机器人感知受累侧肌张力明显高于正常,将开启痉挛保护机制,机器人跟随肢体活动,不再进行其他训练,随后通过缓慢牵伸痉挛肢体的方式降低肌张力,当肌张力降低后再进行受累侧肢体任务导向性主动训练;当受累侧肢体肌张力降低进入分离运动期,机器人感知受累侧肌张力下降至接近正常水平,对受累侧肢体进行任务导向性主动抗阻康复训练^[8]。

图1 镜像训练机器人原理框图



1.1 镜像上肢康复机器人的研究现状

人体上肢具有7个自由度,在日常功能的康复训练中动作复杂度高,现有的康复机器人很少能够完全满足不同部位的康复训练需求,因此衍生了很多专门针对某一关节的康复机器人,如腕部、肩部康复机器人等。而按照机器人的构型不同,镜像上肢康复机器人主要有末端操纵式、外骨骼式和柔索牵引式三种。

1.1.1 末端操纵式:末端操纵式康复机器人由于结构简单,成本低廉,被广泛应用于轻度上肢运动障碍康复,但是存在于无法精细控制复杂运动动作的缺点。此类机器人结构简单,经济高效,适用于家庭康复,如Krishnan等最新研制的

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.08.003

*基金项目:国家重点研发计划智能机器人重点专项(2017YFB1303200);江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20192004)

1 南京医科大学生物医学工程与信息学院,南京,211166; 2 南京医科大学第一附属医院; 3 东南大学仪器科学与工程学院; 4 通讯作者
第一作者简介:陈臻,男,硕士研究生;收稿日期:2020-03-26

SepaRRo 机器人等^[9]。

2000年,斯坦福大学的团队最早提出了一种适用于上肢康复训练的镜像机器人训练系统 MIMe(Mirror Image Motion Enabler)^[10]。患者通过背带辅助固定在一个椅子上,健侧的手臂上装有一个6自由度位置数字化仪(6-axis position digitizer),该装置可检测患者健侧上肢的动作轨迹,然后通过PUMA560工业机器人控制患侧上肢在固定的空间范围内以一定的速率做镜像运动。该上肢康复训练系统仅靠肘部带动肩部运动,最终肩部和肘部的康复效果较好,但是系统集成度较低,患者健侧需要佩戴较复杂的传感器与机器人进行交互。

2019年,Chen等^[11]研究了一种与脑卒中患者进行交互的虚拟现实系统。该系统使用Leap Motion 传感器对受试者健侧的手和前臂进行了跟踪,并在虚拟空间中得到的跟踪数据实时映射到患侧的手和前臂上,使患者在3D虚拟现实空间真实感受到一个与健侧对称的上肢。通过完成一系列运动任务,进而刺激患者的镜像神经系统,促进患者脑部运动能力的学习。临床实验表明虚拟现实镜像疗法可以改善中风后亚急性和慢性阶段的肌肉运动能力。

在国内方面,东南大学的团队开发了一种三自由度末端式上肢康复训练机器人,采用了牵引机械臂与支撑机械臂两种结构,通过连杆连接方式将其末端固定在一起,达到支撑机械臂跟随牵引机械臂进行运动的效果^[12]。该机器人具备较大的可调节工作空间,能够保证ADLs训练的范围。

1.1.2 外骨骼式:外骨骼式康复机器人则通过在各个关节加入助力电机驱动的方式,更加精准地控制患者的关节运动,但是存在组装难度大,质量笨重,设计复杂,成本较高的缺点^[13-14]。

2019年,Shivesh Kumar等研究了一种基于模块化设计和分散控制理念的外骨骼式康复机器人,可以十分方便地进行单独测试或与其他系统集成^[15]。该外骨骼康复系统肩部拥有3个自由度,可以完成肩部所有方向的运动。前臂可以实现肘部屈伸和前臂的旋前和旋后(内旋和外旋)。该系统拥有重力补偿模式,通过外骨骼臂的力学平衡模型来补偿系统的重力。在该模式下,治疗师可以很容易地移动机械骨骼,以录入示范动作。通过记录治疗师录入的动作,然后重复该运动轨迹对患者的上肢进行康复训练。该系统也拥有镜像治疗模式,在该模式下健侧手臂外骨骼保持工作在重力补偿状态,患者可以自由移动健侧手臂,系统自动将健侧手臂的运动轨迹以镜像方式映射到患侧手臂,以达到的训练的目的。该外骨骼康复系统为了减少外骨骼的质量,未对腕部加装助力装置,无法对腕部进行有效地康复训练。

2020年,Seulki Kyeong等研究了一种可完成三自由度(肘部屈伸、腕部屈伸、前臂旋转)上肢运动的外骨骼式上肢

康复机器人,该系统驱动部分仅使用了两个无刷直流电机,减轻了整个机械系统的重量^[16]。其中一个直流电机仅用于带动肘部屈伸运动,另一个直流电机为腕部和前臂共用的直流电机,通过锁住不同的绳索进而带动腕部做屈伸运动或前臂旋转运动。该系统分别在肘部、前臂和腕部使用3个惯性传感器作为镜像对称运动的反馈测量装置,使整个系统构成一个闭环控制系统。该系统巧妙的采用了绳索与外骨骼结合的方式,进一步降低了系统的总体质量。但该系统缺乏肩部助力装置,肩关节无法进行有效的康复训练。

在国内方面,严华等设计一套外骨骼上肢康复机器人系统,该系统包含位姿检测和动作辅助外骨骼子系统,主、从外骨骼系统具有七个自由度,采用上肢串联运动学模型^[17]。可以进行镜像训练、示范训练和重复动作训练。但该系统结构复杂,体积比较大,不便于与轮椅或其他设备进行集成。

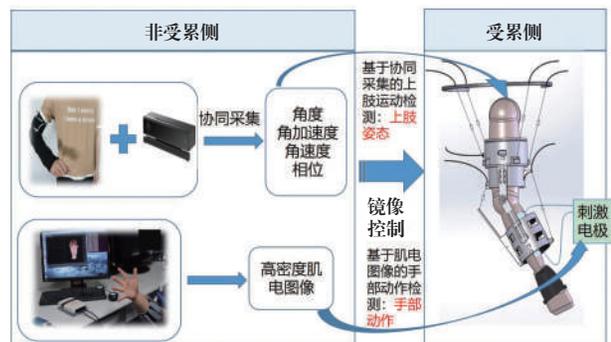
1.1.3 柔索牵引式:柔索牵引式康复机器人需要大量的柔索进行牵引控制,存在柔索布线复杂,体积较大,系统设计复杂等问题^[18-19]。

2017年,Lukas Tappeiner等开发了一种由摄像头和柔索驱动组合的一种镜像康复机器人系统^[20]。该系统使用摄像头拍摄患者健侧手臂上的光学标志物,经过软件识别处理后,得到患者健侧手臂的当前运动状态,将该运动状态实时镜像映射到患侧手臂,通过柔索控制下方的末端执行机构带动患侧手臂做出相应的动作。

2019年,东南大学的宋爱国教授团队开发了一种四自由度绳索牵引的上肢康复机器人,能够实现肩关节三个自由度及肘关节一个自由度的主被动康复训练。该系统通过柔索驱动肢体运动,具有负载惯性低,便于控制及实现力反馈功能,人机交互友好的优点^[21-23]。同时配合其课题组研制的腕关节三自由度康复训练机器人,可实现上肢七个自由度的康复训练,具有较好的可扩展性。见图2。

该机器人采用了新型的磁流变式无源电机,通过柔索与有源/无源执行器混合驱动系统,使得机器人更加安全可靠。该系统通过姿态传感器/光学传感器对健侧姿态进行采

图2 基于柔索的镜像上肢康复机器人^[21]



集,采用阻抗控制算法,通过控制绳索张力,实现了患侧肢体对健侧肢体的运动跟踪;亦可以调节助力幅度,以减小患者对机器人助力辅助的依赖性,进而提高其控制患侧肢体运动的主动性。

为了提高康复训练的乐趣性和康复治疗效果,系统提供了基于虚拟现实的康复训练软件。系统通过姿态传感器/光学传感器采集患者肢体姿态,映射至虚拟场景中,患者可与虚拟场景中的对象进行交互,交互力通过虚拟场景计算,反馈至机器人控制器,机器人根据所需力/力矩的大小/方向进行解算,并控制绳索产生对应的张力以提供给患者助力/阻力,实现力反馈主动训练。

该系统同时还集成了闭环反馈、对侧控制的功能电刺激装置,通过融合了高密度肌电图像等生理信息和力触觉等信息,机器人能够实时感知患者健肢的运动意图,通过功能性电刺激完成手部的精细动作。

1.2 镜像下肢康复机器人的研究现状

人体下肢具有7个自由度,其康复训练涉及步态分析、平衡功能分析等。因此相应的康复机器人主要分为两种:站立式和坐卧式。站立式康复机器人设计需满足对患者的支撑和减重,对安全性提出了更高的要求。而坐卧式康复机器人对病患更好的支撑和减重,因此镜像下肢康复机器人较多采用此类型^[24-25]。

徐林森等研制了一种镜像下肢康复训练机器人,可实现髋关节的外展/内收、髋关节屈曲、膝关节屈曲、踝关节背屈/跖屈的康复训练^[26-27]。该机器人基于扭矩区域函数的主被动控制方法,通过检测相互作用扭矩的变化,通过基于扭矩区域的自适应权重确定工作模式,实现两种训练模式的自动切换。

镜像下肢康复机器人学习非受累侧步态轨迹,利用采样点的角度、角速度、角加速度和相位等信息生成受累侧参考轨迹参数化模型,并且根据受累侧状态调节参考轨迹。

目前国内外对于下肢康复机器人的研究较多集中于构型综合与尺度优化、自适应控制算法、平衡训练等方面,对于镜像训练的相关研究较少。

2 镜像康复机器人的瓶颈问题及解决方案

镜像康复训练机器人作为康复机器人的一个分支,能够通过工程化的手段,将康复医学中的镜像疗法在机器人上实现,提高了脑卒中偏瘫患者的康复训练效果。

2.1 镜像康复机器人的瓶颈问题

①结构设计比较复杂,缺乏柔性,安全性难以保证。目前康复机器人过度追求高精尖,忽略了临床的真正需求,机器人设计得越来越复杂,操作难度大,而真正在临床上的应用却越来越少。当前大多数机器人仍以外骨骼机器人为主,

缺少柔性牵引或软体机器人,造成治疗师和病患接受程度低,训练过程中容易造成一定的安全问题。②康复训练模式有限且偏简单,人机融合程度低,缺乏适应性。目前大多数机器人以被动训练为主,缺乏对患者的智能感知。康复机器人应能够感知受累侧功能状态,依据患者肢体功能状态采用不同训练方式。并在训练过程中实时监测受累侧肢体功能(如痉挛等),自适应地调整康复训练模式。③缺乏康复机器人临床应用规范。尽管目前已经存在诸如:康复训练机器人通用技术条件^[28],下肢康复训练设备的分类及通用技术条件^[29]等国家标准,但是目前仍缺乏康复机器人临床应用规范。

2.2 可能的解决方案

康复机器人系统是一个集康复医学、工程学、计算机科学、心理学、生命科学等多个学科交叉、融合的机电一体化智能系统^[30],为了研制出真正适用于临床的康复机器人,需要不断加强医工融合:康复机器人的设计要源于临床问题,经由临床和工程技术人员的充分论证,才能做出真正适合临床的好产品。因此,在推动康复机器人研发和产品临床转化的同时,应避免临床应用的盲目和不规范,行业发展更应修炼内功,提升核心技术。

为了规范手术机器人临床应用,提高医疗质量,保障医疗安全,2019年国家卫生健康委成立了手术机器人临床应用管理专家委员会,来组织制订手术机器人临床应用管理和技术规范,开展相关培训和技术指导,实施医疗质量控制和评价。因此,在康复机器人的临床应用方面也应该由国家或地方牵头成立相关的专家委员会,制订相应的临床应用规范,来不断推进和规范康复训练机器人在临床上的应用。

3 小结

本文分别从上肢和下肢康复训练两个方面概述了镜像康复机器人在国内外的研究进展,概述了相关康复机器人的特点并分析了在这些研究中仍存在的瓶颈问题,提出了两点可能的解决策略,希望能在镜像康复训练机器人的研究中为相关人员提供一定的参考。

参考文献

- [1] Altschuler EL, Wisdom SB, Stone L, et al. Rehabilitation of hemiparesis after stroke with a mirror[J]. Lancet, 1999, 353 (9169): 2035—2036.
- [2] Yavuzer G, Selles R, Sezer N, et al. Mirror therapy improves hand function in subacute stroke: A randomized controlled trials[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2008, 89(3): 393—398.
- [3] Thieme H, Morkisch N, Mehrholz J, et al. Mirror therapy for improving motor function after stroke update of a cochrane review[J]. Stroke, 2019, 50(2): E26—E27.

- [4] Ramachandran VS, Altschuler EL. The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function[J]. *Brain*, 2009, 132: 1693—1710.
- [5] Riener R, Lunenburger L, Jezernik S, et al. Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: First experimental results[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2005, 13(3): 380—394.
- [6] 陈书立,张景景,陈海洋,等. 镜像上肢康复机器人研究[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(2): 321—326.
- [7] Burgar CG, Lum PS, Shor PC, et al. Development of robots for rehabilitation therapy: The Palo Alto VA/Stanford experience[J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2000, 37(6): 663—673.
- [8] Lindsay P, Furie KL, Davis SM, et al. World Stroke Organization Global Stroke Services Guidelines and Action Plan [J]. *International Journal of Stroke*, 2014, 9(A001): 4—13.
- [9] Chang CK, Washabaugh EP, Gwozdzowski A, et al. A semi-passive planar manipulandum for upper-extremity rehabilitation[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2018, 46(7): 1047—1065.
- [10] Lum PS, Burgar CG, Van der Loos M, et al. MIME robotic device for upper-limb neurorehabilitation in subacute stroke subjects: A follow-up study [J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2006, 43(5): 631—642.
- [11] Chen BY, Robson NPU. Upper limb robot rehabilitation of post-stroke patients using mirror therapy[J]. *Assistive Technology*, 2019, 31(5): 233.
- [12] 马妍. 三自由度上肢康复机器人的研制[D]. 东南大学硕士学位论文, 2014.
- [13] Gopura RARC, Bandara DSV, Kiguchi K, et al. Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 75: 203—220.
- [14] Shi D, Zhang WX, Zhang W, et al. A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 32(1): 11.
- [15] Kumar S, Wohrle H, Trampler M, et al. Modular design and decentralized control of the RECUPERA exoskeleton for stroke rehabilitation[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2019, 9(4): 23.
- [16] Kyeong S, Na Y, Kim J. A mechatronic mirror-image motion device for symmetric upper-limb rehabilitation[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(5): 947—956.
- [17] 严华, 杨灿军, 陈杰. 上肢运动康复外骨骼肩关节优化设计与系统应用[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(06): 1086—1094.
- [18] Hong HJ, Ali J, Ren L. A review on topological architecture and design methods of cable-driven mechanism [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(5): 14.
- [19] Boschetti G, Carbone G, Passarini C. Cable failure operation strategy for a rehabilitation cable-driven robot dagger [J]. *Robotics*, 2019, 8(1): 17.
- [20] Tappeiner L, Ottaviano E, Husty ML. A cable-driven robot for upper limb rehabilitation inspired by the mirror therapy [J]. *Mechanisms and Machine Science*, 2018, 50: 174—181.
- [21] Shi K, Song AG, Li Y, et al. Cable-driven 4-DOF upper limb rehabilitation robot, 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, China, 2019, 6465—6472.
- [22] 宋爱国, 石珂. 一种绳索驱动可穿戴式上肢康复训练机器人及其使用方法[EB/OL]. CN 201811118642.6.
- [23] 宋爱国, 石珂. 一种绳索驱动外骨骼式上肢康复训练机器人[EB/OL]. CN201811118650.0.
- [24] Zhang X, Yue Z, Wang J. Robotics in lower-limb rehabilitation after stroke[J]. *Behavioral Neurology*, 2017, 2017: 3731802.
- [25] Hesse S, Schmidt H, Werner C, et al. Upper and lower extremity robotic devices for rehabilitation and for studying motor control [J]. *Current Opinion in Neurology*, 2003, 16(6): 705—710.
- [26] Xu JJ, Xu LS, Li YF, et al. Design of lower extremity rehabilitation robots with magnetorheological dampers and wire-driven system, 2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Wuyishan, China, 2018, 395-400.
- [27] Xu JJ, Xu LS, Li YF, et al. Design and implementation of the lower extremity robotic exoskeleton with magnetorheological actuators, 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Tianjin, China, 2019, 1294—1299.
- [28] GB/T 37704-2019. 康复训练机器人通用技术条件 [EB/OL]. 中华人民共和国国家标准 <http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=44DFB616296FAFF5FCA973A4FC65993B>
- [29] GB/T 20162591-T-314. 下肢康复训练设备的分类及通用技术条件[EB/OL]. 中华人民共和国国家标准 <http://std.sam.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=5DDA8BA2490518DEE05397BE0A0A95A7>
- [30] 李军强, 王娟, 赵海文, 等. 下肢康复训练机器人关键技术分析[J]. *机械设计与制造*, 2013, (9): 220—223.