

下肢康复机器人对脊髓损伤患者步行能力改善的现状及应用

雷俊芳, 汤继芹

(山东中医药大学康复医学院, 山东 济南 250355)

摘要:脊髓损伤(SCI)是临床常见病,康复治疗对脊髓损伤患者的步行能力的改善具有重要作用。下肢康复机器人作为康复治疗辅助仪器,可以重塑脊髓损伤患者的中枢神经系统,从而促进步行能力的改善。本文现就下肢康复机器人的国内外发展以及对脊髓损伤患者步行能力的改善情况作一综述,以期下肢康复机器人的发展及应用提供参考。

关键词:脊髓损伤;下肢康复机器人;下肢运动功能障碍;步行能力

中图分类号:R651.2;R493

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1006-1959.2022.19.046

文章编号:1006-1959(2022)19-0159-04

Current Status and Application of Lower Limb Rehabilitation Robot in Improving Walking Ability of Patients with Spinal Cord Injury

LEI Jun-fang, TANG Ji-qin

(School of Rehabilitation Medicine, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong, China)

Abstract: Spinal cord injury (SCI) is a common clinical disease. Rehabilitation plays an important role in improving the walking ability of patients with SCI. Lower limb rehabilitation robot as an auxiliary instrument for rehabilitation therapy can reshape the central nervous system of patients with spinal cord injury, thereby promoting the improvement of walking ability. This article reviews the development of lower limb rehabilitation robots at home and abroad and the improvement of walking ability of patients with spinal cord injury, in order to provide reference for the development and application of lower limb rehabilitation robots.

Key words: Spinal cord injury; Lower limb rehabilitation robot; Lower limb motor dysfunction; Walking ability

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)发病率、患病率呈上升趋势^[1,2],且非创伤性患病率偏高^[2,3]。下肢运动功能障碍是脊髓损伤最常见的并发症之一,进而出现痛疼、痉挛、肌肉萎缩等一系列机体功能的变化,增加了患者对脊髓损伤的恐惧,影响其生命质量及生活水平,同时给家庭和社会带来了沉重负担^[4]。目前除了手术治疗、药物治疗以及常规康复训练应用于脊髓损伤患者外^[4],下肢康复机器人也作为辅助手段应用于脊髓损伤患者,帮助患者改善和恢复步行等能力^[5],减少患者的痛苦。下肢康复机器人是指一些可以辅助下肢有运动功能和感觉功能障碍的患者自动化或半自动化完成康复训练的智能化设备;通过对下肢有运动功能和感觉功能障碍的肢体实施运动训练和电刺激,并根据患者运动情况实时提供个性化变化,从而促进损伤神经形成其他反馈,刺激受损的神经再生或者未受损神经的代偿,以达到神经修复的目的^[6-8]。本文通过对下肢康

复机器人改善脊髓损伤患者步行能力的研究现状及其应用做一综述,以期为进一步促进下肢康复机器人在医院的广泛应用、不断地优化升级,以及康复医学与智能化设备的结合提供参考。

1 下肢康复机器人国内外研究现状

1.1 下肢康复机器人国外研究现状 康复医疗机器人始于 19 世纪 90 年代俄罗斯人设计的增强跑和跳能力的外骨骼机器人,该外骨骼机器人的设计被业界广为应用。20 世纪 60 年代,美国研制出多种外骨骼样机,其中具有代表性的是全身外骨骼试验样机 Hardiman^[9]。70 年代,南斯拉夫人提出了“零力矩点”行走稳定性判据理论,并研制出下肢外骨骼样机 Active Anthropomorphic Exoskeletons^[10]。80~90 年代,下肢外骨骼机器人进入沉寂期。随着技术的发展,以及在 90 年代不断积累的经验,许多国家逐渐加入到外骨骼机器人的研究行列,为后期的外骨骼机器人的发展奠定了坚实的基础。如 2000 年,美国的外骨骼项目研究计划促进了外骨骼机器人的发展^[10]。2001 年,日本驻波大学研制的 Hybrid Assistive Leg(HAL)穿戴型的外骨骼机器人^[11],分别在 2008 年实现了市场化,2013 年获得安全认证并进行批量生产,2018 年获得美国 FDA 认证。2004 年,美国研制的下肢外骨骼机器人 BLEEX^[12]采用类人化设计,使穿戴更舒适。以色列 ReWalk Robotics (ReWalk) 公司研发并推出的以 ReWalk 为名的下

基金项目:山东中医药大学经方治疗重大疾病作用机理与疗效评价科研创新团队基金资助项目(编号:220316)

作者简介:雷俊芳(1995.11-),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事康复医学与理疗学研究

通讯作者:汤继芹(1975.3-),女,江苏徐州人,硕士,副教授,主要从事康复医学基础与临床研究工作

肢机器人^[13],分别在2011年和2012年推出康复版和个人版,并于2014年获得FDA认证上市,该下肢机器人成为全球第一家获得FDA认证,同时也成为全球民用外骨骼系统的龙头。除此之外,新西兰Rex Bionics公司研制的Rex^[14]是目前市场上唯一一款不需要拐杖支持的外骨骼机器人,解放了患者的上肢。除去外骨骼式下肢机器人,末端执行器式下肢康复机器人也得到了长足的发展,常见的有Haptic Walker、Lokohelp等^[15]。

1.2 下肢康复机器人国内研究现状 我国对下肢机器人的研究开始相对略晚。于2004年研制出第一代实体样机WPAL,通过对模型的不断改进,实现了下肢康复机器人的柔顺控制,使其更符合人体动力学、穿戴更舒服,同时可减少肌肉的疲劳^[16]。2009–2011年,华东理工大学曹恒教授课题组研制出三代下肢助力外骨骼样机,从外观和内部上均实现了对下肢助力外骨骼样机的改进^[10]。2011年,中科大通过运用多门学科和原理,设计了多传感感知系统,其利用足底压力信息的变化来划分步态周期和作为可穿戴助力机器人的控制依据,并根据传感器做出位置、速度和助力的反馈信号,为可穿戴助力机器人的运动控制提供感知信息基础^[10]。2012年上海交通大学根据人机工程和仿生学原理,设计并制造出一台具有3个自由度的单下肢外骨骼行走康复机器人样机,通过机器人的行走步态测试样机的性能,帮助在T₅以下的脊髓损伤患者借助该机器人实现站立及行走的被动训练^[13]。2016年哈尔滨工业大学采用“准拟人化”的外骨骼结构研制出一款下肢助力外骨骼机器人HIT-LEX (HIT Load-carrying Exoskeleton)。该机器人面向健康人,主要功能是辅助背负重物的人群消耗更少的能量完成行走^[16]。西安交通大学设计研究的凸轮连杆负重型外骨骼可以根据人体负重的变化调整对应前倾角度,从而增加行走的稳定性^[17]。2017年浙江大学研发出液压驱动下肢外骨骼机器人,其设计的方案完善了下肢外骨骼摆动腿的跟随控制。试验结果表明,该下肢机器人是对之前下肢机器人研究的更进一步的突破。2018年,北京大艾机器人科技有限公司的外骨骼机器人艾康、艾动,在我国第1个获得CFDA认证,该机器人可以对患者进行个性化的适配,更好的辅助患者康复^[18]。最近几年对下肢康复机器人的研究,除了对结构的继续改善外,出现了更多的研究方式,如针对健康人群、老年人群的下

肢机器人的研究以及液压式、对位姿势等的下肢康复机器人,高校对下肢机器人的研究促进了下肢康复机器人的进一步发展。

近20年来,下肢康复机器人得到了快速发展,在功能上经历了从被动训练到主动训练的变化,在自由度上经历了单个自由度到多个自由度的转变,在体积经历了由笨重向小巧的变化,其个性化、智能化也在不断的提高。随着技术的发展,下肢康复机器人的类型也逐渐丰富,不仅有面向疾患者群的下肢康复机器人,如HAL和ReWalk^[11],也有面向健康人群的下肢机器人,如BLEEX^[12];还有针对卒中偏瘫患者的机器人WA-H和脊髓损伤的患者。除此之外,部分下肢康复机器人的负重辅助设计可以帮助患者减轻患肢的沉重感,帮助患者更好地使用和提升用户体验感。

2 下肢康复机器人在脊髓损伤患者中的应用

2.1 下肢康复机器人在完全性脊髓损伤患者中的应用 Wu CH等^[19]通过对2位完全性脊髓损伤患者进行动力外骨骼步态训练,待8周训练期结束后,2位患者均能在治疗师的“监督”下走6步,用动力外骨骼机器人进行坐立和行走;而且与使用膝-踝-足矫形器(KAFO)相比,患者可以走得更快、更远,且没有受伤和摔倒事件发生。在帮助患者完成训练的同时,也有助于骨密度的增长。Kwon SH等^[20]通过随机交叉设计,对10位完全性脊髓损伤患者进行KAFO和机器人(ReWalk)在能量效率和患者满意度方面的比较,经过10周的训练(交换训练方式前暂停2周训练)发现,ReWalk机器人可以帮助患者使用更低的能量行走,但ReWalk训练组在患者满意度方面并不优于KAFO训练组,其原因是ReWalk太笨重、佩戴和操作困难且价格高昂。下肢康复机器人可以辅助完全性脊髓损伤患者更好的恢复下肢运动功能,且具有较高的安全性,所需的能量更少,因此完全性脊髓损伤患者可以在治疗师的指导下安全使用下肢康复机器人以协助恢复下肢运动功能。

2.2 下肢康复机器人在不完全性脊髓损伤患者中的应用 Martinez SA等^[21]对脊髓损伤患者进行多模式皮质和皮质下运动与跑步机训练的比较,其研究表明,多模式训练有助于促进短间隔H反射,跑步机训练倾向于改善动态坐姿平衡;但由于参与试验人数较少,两者并未显示出显著差异。Fang CY等^[22]的研究显示,机器人辅助步态训练可以改善脊

髓损伤患者的痉挛状态和步行能力,有利于脊髓损伤患者肌肉张力的正常化和下肢功能的改善,且不会引起额外的疼痛,但机器人辅助步态训练后,疼痛并未随着痉挛的减轻而减轻。Kanazawa A 等^[23]对单病例的反向设计研究显示,慢性脊髓损伤患者通过结合步态训练、HAL 辅助和常规步态训练及物理治疗,可以在短时间内改善步行能力。Hwang S 等^[24]对 29 例脊髓损伤患者进行下肢康复机器人训练,4 周后评估 BBS 得分高于 7 分,SCIM-III-M 得分高于 6 分,这说明脊髓损伤患者通过使用下肢康复机器人训练一定时间后,其步态、步速、步行等能力有明显改善。Midik M 等^[5]将 30 例不完全创伤性脊髓损伤患者随机分为常规康复组和机器人辅助步态训练组,研究结果显示两组 LEMS、WISCI-II 和 SCIM-III 评分较治疗前均有改善,但机器人辅助步态训练组的 LEMS、SCIM-III 评分效果更好,这表明机器人辅助步态训练组在下肢运动功能和功能独立性方面更占优势;但是由于治疗人数有限,因此需要更进一步的大规模前瞻性研究来证实。Yoshikawa K 等^[25]的单病例分析证明下肢康复机器人可以帮助患者改善步态、步速、步行等能力。张子英等^[26]的研究表明,下肢康复机器人训练可以改善患者的平衡能力、下肢运动功能、步行能力及下肢肌力;但下肢康复机器人对脊髓损伤患者步行能力的改善还受年龄、受伤时间,以及损伤程度等因素的限制^[24]。该研究表明下肢康复机器人在不完全性脊髓损伤患者的下肢运动功能恢复方面具有显著优势,且会改善痉挛等其他状态,但由于参与实验人数少,未来仍需大规模的临床实验继续补充该方面的欠缺。

2.3 下肢康复机器人的局限性与改善建议 随着经济的发展,下肢康复机器人越来越多的被用以改善脊髓损伤患者的下肢功能;与此同时,下肢康复机器人的局限性也逐渐暴露出来:①患侧肢体肌肉无法发挥主动性,需患者在肢体和认知上均参与^[27];②下肢康复机器人不能根据人体生理变化进行微调^[28];③由于仪器笨重和费用昂贵,难以居家使用,因此使用场地基本限于医院^[20];④缺少与日常生活的结合,使用时受电源和不同路况的影响,限制患者运动^[29];⑤缺乏多中心大样本的前瞻性研究^[30],且对完全性脊髓损伤患者的研究也较少;⑥我国目前虽然已经研发出多款外骨骼机器人,但还存在如结构不紧凑、使用材质较重、传感器不够精确

等问题需要解决,且能用于临床和实践的还较少。因此,仍需要对提供感觉反馈提高其智能化程度,使患者在使用过程中能发挥肌肉的自主性,促进肌张力的恢复;继续进行内部结构的改善,促进下肢机器人根据使用者的身高、肌肉等变化进行个性化调整 and 适应,根据人体生理变化进行微调;改进机器人使用的材质以促进其轻便化和平民化的发展,进一步改变使用场地的限制;通过与其他康复手段的结合,如脑机接口、脑电图、肌电生物反馈等,提高人机配合度;进行大规模的前瞻性研究以提供更充分的证据。

3 总结

随着经济的快速发展以及机器人技术的成熟,辅助型机器人在医院康复科得到广泛应用,帮助患者恢复。由于大脑的可塑性及患者的积极参与,下肢康复机器人通过利用患者的残存功能对患侧肢体进行训练,从而提高神经肌肉的兴奋性,促进骨骼肌肉功能的恢复;患者通过运动训练可进一步增加患侧本体感觉和运动觉的输入与输出,从而促进中枢神经系统功能的重塑,加速肢体功能恢复,改善患者的步行能力。虽然下肢康复机器人在脊髓损伤患者步行能力改善方面已经取得不错的成果,提高了患者的生活水平和生存质量,但是其依然存在很多问题,因此需要继续对辅助型机器人进行研究,未来除了继续对下肢机器人的结构进行改善以使其便携化、平民化外,还可以考虑通过神经肌肉控制、意念控制力等实现对辅助型机器人的控制,从而继续提高机器人的智能化程度,并使其根据人体的生理变化进行个性化调试。除此之外,还可以使下肢康复机器人与其他设备联合使用,如脑机接口、肌电生物反馈等,通过其相辅相成的作用共同致力于脊髓损伤患者中枢神经系统的重塑、残存功能的恢复及步行能力的改善,帮助更多有运动功能和感觉功能障碍的患者更好地改善或恢复身体功能,提高其生命质量和生活水平。

参考文献:

- [1]张建梅,李娜,朱亮,等.盆底生物反馈电刺激联合下肢康复机器人训练对脊髓损伤患者肠道功能的影响[J].脑与神经疾病杂志,2021,29(1):53-57.
- [2]Kjell J,Olson L.Rat models of spinal cord injury:from pathology to potential therapies[J].Dis Model Mech,2016,9(10):1125-1137.
- [3]New PW,Guilcher SJT,Jaglal SB,et al.Trends, Challenges, and Opportunities Regarding Research in Non-traumatic Spinal

- Cord Dysfunction [J]. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*, 2017, 23(4): 313-323.
- [4] 白鹤. 针刺联合康复训练对不完全性脊髓损伤患者康复效果的影响[J]. *光明中医*, 2021, 36(24): 4220-4222.
- [5] Midik M, Paker N, Bugdayci D, et al. Effects of robot-assisted gait training on lower extremity strength, functional independence, and walking function in men with incomplete traumatic spinal cord injury [J]. *Turk J Phys Med Rehabil*, 2020, 66(1): 54-59.
- [6] 毛兵兵, 白瑞. 高压氧联合下肢康复机器人辅助训练对脊髓损伤患者下肢肌张力和步行能力的影响 [J]. *医学临床研究*, 2018, 35(12): 2335-2337, 2342.
- [7] Dawson-Elli AR, Adamczyk PG. Design and Validation of a Lower-Limb Haptic Rehabilitation Robot [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(7): 1584-1594.
- [8] 周曲, 韦宇炜, 何汉武, 等. 下肢康复机器人的设计 [J]. *中国高新技术企业*, 2016(35): 3-4.
- [9] 王年文, 朱亦吴, 姜文博, 等. 下肢外骨骼康复机器人人机交互系统分析 [J]. *现代商贸工业*, 2018, 39(1): 181-183.
- [10] 靳兴来. 液压驱动下肢外骨骼机器人摆动相控制系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [11] 李伟达, 李娟, 李想, 等. 欠驱动异构式下肢康复机器人动力学分析及参数优化 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(2): 222-228.
- [12] 盛文涛. 基于人机耦合系统特性分析的外骨骼单腿参数辨识方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [13] 陈婕. 气动肌肉驱动的下肢康复外骨骼机器人的设计与研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [14] Postol N, Spratt NJ, Bivard A, et al. Physiotherapy using a free-standing robotic exoskeleton for patients with spinal cord injury: a feasibility study [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 180.
- [15] 王让让, 孟纯阳. 下肢康复机器人对脑卒中偏瘫患者步行功能的影响 [J]. *济宁医学院学报*, 2021, 44(6): 447-451.
- [16] 张超. 下肢助力外骨骼机器人研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [17] 赵英朋, 邓斌. 外骨骼负重重心自适应凸轮连杆机构设计与性能研究 [J]. *液压与气动*, 2018(11): 108-112.
- [18] 黄欣. 基于专利情报分析的国内外老年智能康复辅助器械行业发展预测研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [19] Wu CH, Mao HF, Hu JS, et al. The effects of gait training using powered lower limb exoskeleton robot on individuals with complete spinal cord injury [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 14.
- [20] Kwon SH, Lee BS, Lee HJ, et al. Energy Efficiency and Patient Satisfaction of Gait With Knee-Ankle-Foot Orthosis and Robot (ReWalk)-Assisted Gait in Patients With Spinal Cord Injury [J]. *Ann Rehabil Med*, 2020, 44(2): 131-141.
- [21] Martinez SA, Nguyen ND, Bailey E, et al. Multimodal cortical and subcortical exercise compared with treadmill training for spinal cord injury [J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0202130.
- [22] Fang CY, Tsai JL, Li GS, et al. Effects of Robot-Assisted Gait Training in Individuals with Spinal Cord Injury: A Meta-analysis [J]. *Biomed Res Int*, 2020, 2020: 2102785.
- [23] Kanazawa A, Yoshikawa K, Koseki K, et al. A Consecutive 25-Week Program of Gait Training, Using the Alternating Hybrid Assistive Limb (HAL[®]) Robot and Conventional Training, and Its Effects on the Walking Ability of a Patient with Chronic Thoracic Spinal Cord Injury: A Single Case Reversal Design [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2019, 55(11): 746.
- [24] Hwang S, Kim HR, Han ZA, et al. Improved Gait Speed After Robot-Assisted Gait Training in Patients With Motor Incomplete Spinal Cord Injury: A Preliminary Study [J]. *Ann Rehabil Med*, 2017, 41(1): 34-41.
- [25] Yoshikawa K, Mutsuzaki H, Koseki K, et al. Gait Training Using a Wearable Robotic Device for Non-Traumatic Spinal Cord Injury: A Case Report [J]. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*, 2020, 11: 2151459320956960.
- [26] 张子英, 刘恒, 赵静, 等. 肌电生物反馈联合下肢康复机器人训练对脊髓损伤患者下肢功能恢复的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2020, 42(12): 1075-1077.
- [27] Chang SH, Afzal T, Berliner J, et al. Exoskeleton-assisted gait training to improve gait in individuals with spinal cord injury: a pilot randomized study [J]. *Pilot Feasibility Stud*, 2018, 4: 62.
- [28] Di Marco R, Rubega M, Lennon O, et al. Experimental Protocol to Assess Neuromuscular Plasticity Induced by an Exoskeleton Training Session [J]. *Methods Protoc*, 2021, 4(3): 48.
- [29] Palermo AE, Maher JL, Baunsgaard CB, et al. Clinician-Focused Overview of Bionic Exoskeleton Use After Spinal Cord Injury [J]. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*, 2017, 23(3): 234-244.
- [30] Ramanujam A, Ciriogliaro CM, Garbarini E, et al. Neuromechanical adaptations during a robotic powered exoskeleton assisted walking session [J]. *J Spinal Cord Med*, 2018, 41(5): 518-528.

收稿日期: 2021-12-12; 修回日期: 2022-02-28

编辑/肖婷婷