

·综述·

康复机器人概述

周媛¹ 王宁华^{1,2}

1 康复机器人的概念

康复机器人是能自动执行任务的人造机器装置,用以取代或协助人体的某些功能,从而在康复医疗过程中发挥作用。康复机器人领域的主要发展目标包括:研发医疗人员和患者方便使用的康复器械及以此为依托的技术;促进临床康复治疗效果;为患者的日常活动提供方便。作为生物医学工程的分支领域,康复机器人融合了生命科学、工程学、计算机科学、心理学、康复医学等多个学科,其研发目标尤其侧重于临床实用性。

2 康复机器人的分类

现有的康复机器人可以从不同角度进行分类。按照功能目的可粗略的分为:辅助/替代型和训练/治疗型等。按照其针对的躯体部位,可分为上肢机器人、下肢机器人和手部机器人;按照人机结合的方式,可分为外骨骼式和嵌合式;按照其移动方式,可分为固定式和移动式。

2.1 辅助/替代型机器人

这一类型的机器人是通过辅助或者直接替代患肢的功能来帮助患者完成日常活动,其功能覆盖较广泛,包括进食、饮水、个人卫生、工作和娱乐、行动、够物等。按照其载体的不同又可以分为:固定式机器人、移动式机器人以及智能假肢和支具^[1]。

2.1.1 固定式机器人:固定式机器人包括工作站机器人和床旁机器人。其设计理念旨在令残障人士在特定工作或生活环境下实现功能性的独立,以便提高其就业或生活能力。工作站机器人以桌面作业辅助机器人(Desktop Vocational Assistive Robot, DeVAR)、职业作业辅助机器人(Professional Vocational Assistant Robot, ProVAR)、机器人技术(Robotic Technology, RT)为代表。DeVAR系统是一个以“可编程通用装配机械手”为基础的声控智能工作站,将所有的外周设备以特定形式预置在工作站上,以便机器人能按需获取,并设计有接口可与现有办公设施配合使用,可以协助残障人士处理一些日常活动及职业活动,但还不能脱离人力帮助,实现完全独立工作。RT机器人是一系列改良“选择顺应性装

配机器人手臂”机械手,可在水平面内移动,有结构轻便、响应快的特点,是许多康复机器人项目的基础。上述两类有代表性的机器人都存在着与环境整合不理想的问题。

床旁机器人的典型代表是Handy1,是目前销量最大的康复机器人之一。Handy1设计的初衷是给残障人士喂食,近来也逐渐开发出盥洗、剃须、化妆等功能。与其功能相类的还有Winsford feeder (RTD-ARC, New Jersey, US)、MySpoon (Secom Co. Ltd, Tokyo, Japan)和Neater Eater (Buxton, UK)等。此类机器人系统为有特殊需求的人们提供了较大的自主性,使他们增加了融入到“正常”环境中的机会。

2.1.2 移动式机器人:移动式机器人包括智能轮椅、轮椅机器人和自动机器人。智能轮椅能够自动获取外界地标,以确定自身位置和移动路线。代表产品有Wheesley机器人轮椅系统、PamAid及其衍生产品Guido机器人助步器^[2]。轮椅机器人是安装在轮椅上的机械手,以Manus和Raptor为代表。前者是具有7个自由度的机械手,具有良好的纵向活动度并能紧密折叠后置于轮椅侧面^[3];后者的设计与Manus相类,但是以牺牲3个自由度为代价,将价格降为Manus的1/3。自动机器人种类较少,代表是移动作业辅助机器人(Mobile Vocational Assistant Robot, MoVAR)系统、凯斯特康复工程系统(KAIST Rehabilitation Engineering System, KARES) II,以及Wessex机器人。MoVAR系统是带轮子的DeVAR机器人,并配有摄像头及周边地图,可以在仪表盘上的显示器中给出反馈。KARES II系统的设计探索了多种控制模式,包括视觉伺服、眼控鼠标、触觉包,以及远程控制机械手。Wessex机器人是一种可移动式家用机器人,旨在满足家居生活中在多个房间内频繁移动的需求。

2.1.3 智能假肢和支具:采用自动控制技术的假肢/支具被称为智能假肢/支具。目前较成熟的智能假肢产品有Utah/MIT人工臂,其设计涵盖了自肩关节至腕关节的上肢全长,末端连接装饰性义手或钩形设备;分级电控假肢手南安普敦手^[4],可以模拟真实的人手进行多个轴向的活动;以及以南安普顿手^[4]和爱丁堡臂系统^[5]为基础的复合上肢高使用性全组

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2015.04.024

1 北京大学第一医院康复医学科,北京市西城区西什库大街8号,100034; 2 通讯作者
作者简介:周媛,女,博士研究生; 收稿日期:2014-03-18

合假上肢(Totally Modular Prosthetic Arm with High Workability, ToMPAW)项目。与此类似,智能下肢也分为部分下肢及全长下肢,目前大部分产品还处于实验室阶段或初期产业化阶段。智能假肢的研发热点之一是“脑-机接口”,即由计算机控制向使用者自主神经控制的转化。这一理念在动物和人体实验中都取得了很大进展^[6-7]。

智能支具是发展最早的康复机器人分支,目前较为先进的项目有尚在研发的上肢支具——动力上肢支具系统(Motorized Upper Limb Orthotic System, Mulos)及ReWalk、eLEGS等下肢支具。这两款下肢机器人都是通过拐杖中的传感器进行控制,向前移动右拐杖,则左腿随之向前移动,反之亦然。依靠这类机器人,部分截瘫患者已经可以完成独立的步行。

2.2 训练/治疗型机器人

机器人辅助下运动训练是近年来脑卒中康复领域中发展最快的课题。现有的康复机器人不但可以替代治疗师的部分工作,还能够完成许多人力不能完成的工作,有些还有诊断、评估的功能。

训练型康复机器人的代表有镜像运动能系统(Mirror Image Movement Enabler, MIME)^[8],具有6个自由度的上肢机器人,可以实现患肢或双上肢的主/被动运动训练,还有InMotion Arm机器人^[9]、ARMEO系列康复系统^[10]、ReoGo上肢康复机器人^[11]等。以ReoGo为例,它的机器臂可灵活完成三维空间内任意方向的上肢运动,对肩、肘、腕关节进行全方位运动训练;可让患者实时看到自己上肢的位置,帮助患者恢复本体感觉;还可针对患者不同的能力进行评估,如主动参与程度、动作平滑程度、主/被动关节活动度、目标追踪准确性等。

智能下肢系统能够辅助支撑患者的身体,帮助患者形成自然的步态,并能集中注意力同时进行其他的功能锻炼,主要应用于脑卒中患者的步态和平衡能力训练。代表性的产品包括Walkaround系统^[12]、WHERE I和WHERE II^[13]、Lokomat^[14]、LOPES(Lower extremity Powered ExoSkeleton,下肢动力外骨骼)^[15]、AutoAmbulator, HuREx(Human-inspired robotic exoskeleton,人体触发式机器人外骨骼)^[16]、KineAssist^[17]、WalkTrainer, HapticWalker^[18],以及Tibion仿生腿^[19]等。这些下肢机器人主要是外骨骼形式的,有些与减重悬吊系统、运动平板相结合。例如:KineAssist系统可以为躯干提供部分减重支持,并允许躯干和骨盆有多个轴向的运动能力,方便患者进行直线、转弯、迈上台阶等多种形式的步行训练;Lokomat系统让患者在运动平板上进行步行训练,它不仅提供躯干部分减重支持,还可以通过下肢外骨骼系统的约束和支持以及视觉反馈系统,更智能的进行步态训练;Tibion仿生腿则通过下肢外骨骼系统以及足底压力传感系统对膝

关节活动提供支持,扩大了使用者的行动范围,丰富了训练模式和工作环境。这些智能下肢机器人的出现,使患者的行动方式从借助轮椅代步发展到尽可能接近正常的步行模式,反映了现代康复理念“从功能替代到功能恢复”的进步。

3 机器人参与功能康复的机制

3.1 机器人参与训练有利于神经重塑

神经重塑是指中枢神经系统具有自我重塑的能力,这一概念是现代康复模型建立的基础^[20]。大量研究表明,运动学习能够促进神经重塑,从而促进神经系统损伤后的功能康复^[21]。与传统训练方式相比,机器人参与的运动训练具有几个明显的优势:良好的重复性,精确的控制力,客观的、可量化的评估标准等^[22]。因此,机器人可提供高强度的、任务导向型的训练,这对患者的运动学习十分有效^[23]。研究表明,机器人辅助下的运动训练中感觉和运动信息同步性较好,这对于神经系统重塑、形成正确感觉-运动回路很有帮助^[24]。

3.2 机器人参与训练的运动模式

根据机器人对患者作用力方式的不同,可将运动模式分为三种:被动运动、助力运动、阻力运动。被动运动模式下,患者的肌肉保持放松,主要用于保持关节活动度、训练前的热身和训练后的冷却。助力运动模式下,由患者主动发力启动一个运动,然后机器人按照预设线路和强度辅助患者完成这一运动,适用于患者肌力较弱或有协调性障碍的情况,例如使用上肢机器人ReoGo进行够物训练时,即可根据患者能力采用不同的助力模式^[11]。阻力运动模式下,机器人会在患者完成运动的过程中施加一定的阻力,例如使用Tibion仿生腿进行由站到坐的训练时,可以根据患者股四头肌离心控制的能力给予适当的阻力,让患者逐渐增强屈膝下蹲的控制能力^[19]。

3.3 机器人参与运动训练的控制策略

康复机器人的控制策略包括:辅助策略、挑战策略、触觉刺激策略、教练策略等^[25]。辅助策略是在患肢运动过程中给予辅助,帮助患肢完成训练任务;挑战策略与之相反,对训练设置障碍和挑战,如设置阻力,要求特殊发力模式,或放大错误动作等;触觉刺激策略是在虚拟空间中模拟训练日常活动任务^[26],具有灵活、方便、丰富有趣、安全等优势;教练策略中机器人不与患肢产生直接接触,而是通过教练的方式鼓励病患,促进其进行运动学习。在实际应用中,这些策略经常在同一训练中共同发挥作用。上述四种策略中,辅助策略是应用最广泛的,又可以再分为:基于阻力的(如ARM Guide)、基于平衡的(如减重悬吊系统)、基于肌电信号的(如MIT-MANUS)以及基于表现的(如MIT-MANUS)四种。辅助策略必须遵循“按需辅助”的原则,即:当使用者处于正确运动轨道时,机器人不加干预,当偏离预设轨道时,机器人通过适

当的机械力帮助其重建正确运动轨道(包括时间上的和空间上的)^[27]。挑战策略在康复治疗领域也有较长的使用历史,又可以再分为:阻力策略、限制-诱导策略以及错误放大策略等。其典型应用即为神经肌肉本体感觉促通技术,研究表明阻力训练能增加患肢投入程度,有利于运动功能的提高^[28]。

4 机器人参与康复训练的效果

与药物临床试验相比,康复机器人的临床试验不论在数量上还是样本量上都不具可比性。而且,机器人临床试验的质量也很难控制。首先,运动处方的剂量很难规范化;其次,试验期间不可能排除其他康复训练;第三,功能评定的敏感性和可靠性较差;第四,运动处方起效时间较慢、效果较不明显,为临床试验的实施增加了难度。综上所述,各种机器人参与康复训练的效果很难互相比较,也很难归纳总结。下面仅就个别规模较大、设计较完善的研究做简单论述。

有关下肢机器人的研究中,一项多中心随机对照试验表明,短期内(12周)机器人辅助治疗与对照康复治疗以及无康复治疗对于运动功能的改善无显著差异;长期(36周)来看,机器人辅助治疗比无治疗有所改善,与对照治疗无显著差异^[29]。一项涉及10项随机临床研究,包含218例被试的荟萃分析显示,机器人辅助治疗对于上肢近端运动功能的恢复有显著效果,对于上肢整体运动功能恢复效果不明,对于日常生活活动能力没有显著改善。这一结论与上肢近端和远端功能评估的异质性有关,也与日常活动能力评估指标的不敏感有关。在现有的超过30种见诸报道的手功能康复机器人中,有8种被临床研究证明能减轻患肢残障,促进患手功能。相关证据表明,机器人辅助下的手功能康复虽然处于发展初期,但前景颇有希望^[30]。除了与传统疗法联用,机器人辅助训练还可与虚拟现实或互动视频游戏结合使用,但尚无有效数据支持其效果评估^[31]。

5 康复机器人研发的主要问题及未来发展方向

康复机器人普遍存在着人-机接口设计不理想的问题。辅助/替代型康复机器人对作业功能有更高的要求,因此还存在着机器人-环境对接的问题。人-机接口问题决定了使用者能否舒适、便捷、有效的运用机器人,包括:机器人能否舒适、便捷的附着在人体上,是否足够轻便、易携、灵活,能否满足使用的时间长度和运动幅度,能否智能化的感知和理解使用者的需求,并给出适合的工作模式等等。机器人-环境接口问题决定了机器人能否更好地适应复杂的日常活动环境,包括:能否协助患者通过繁华的街道、陡窄的阶梯、湿滑的路面,其自由度能否满足精细复杂的洗漱、修饰、烹饪等日常活动,甚至职业活动,能否代偿患者的视觉、听觉、甚至触觉,等等。

康复机器人的经济效益也是其研发和商业化所不可回避的问题。限于康复机器人有限的使用量,经济学分析尚未显示机器人辅助训练比传统训练方法有明显的经济效益^[32]。

康复机器人参与的运动训练不仅需要考虑运动处方的安全性,还要考虑机器人自身的安全性。在现有的康复机器人临床研究中,涉及安全性评价的几乎没有^[33]。然而,大多数康复机器人都有强大的动力系统,一旦失控,后果不堪设想。对于临床工作者来说,如何审查其安全性无疑是一个巨大的挑战。

参考文献

- [1] der Loos Mv RD. Chapter 54: Health Care and Rehabilitation Robotics[M]. Springer Handbook of robotics, 1st. ed. Siciliano B K O, Berlin:Springer-Verlag,2008.1223—1251.
- [2] Rentschler AJ, Simpson R, Cooper RA, et al. Clinical evaluation of Guido robotic walker[J]. Journal of Rehabilitation Research & Development,2008,45(9):1281—1294.
- [3] Driessen BJ, Evers HG, van Woerden JA. MANUS—a wheelchair-mounted rehabilitation robot[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2001,215(3):285—290.
- [4] Kyberd PJ, Light C, Chappell PH, et al. The design of anthropomorphic prosthetic hands: A study of the Southampton Hand[J]. Robotica,2001,19:593—600.
- [5] Gow DJ, Douglas W, Geggie C, et al. The development of the Edinburgh modular arm system[J]. Proc Inst Mech Eng H,2001,215(3):291—298.
- [6] Velliste M, Perel S, Spalding MC, et al. Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding[J]. Nature,2008,453(7198):1098—1101.
- [7] Hargrove LJ, Simon AM, Young AJ, et al. Robotic leg control with EMG decoding in an amputee with nerve transfers [J]. New England Journal of Medicine,2013,369(13):1237—1242.
- [8] 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]. J Rehabil Res Dev, 2006,43(5):631—642.
- [9] Krebs HI, Volpe BT, Williams D, et al. Robot-aided neurorehabilitation: a robot for wrist rehabilitation[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng,2007,15(3):327—335.
- [10] Gijbels D,Lamers I, Kerkhofs L, et al. The Armeo Spring as training tool to improve upper limb functionality in multiple sclerosis: a pilot study[J]. Journal of neuroengineering and rehabilitation,2011,8(5):5.
- [11] Faran S, Einav O, Yoeli D, et al. Reo assessment to guide the ReoGo Therapy: Reliability and validity of novel robotic scores[C]. Virtual Rehabilitation International Conference.

- Haifa.2009.
- [12] Veg A, Popovic DB. Walkaround: mobile balance support for therapy of walking[J]. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*,2008,16(3): 264—269.
- [13] Seo KH, Lee JJ. The development of two mobile gait rehabilitation systems[J]. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*,2009,17(2):156—166.
- [14] Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke[J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*,2009,23(1):5—13.
- [15] Veneman JF, Kruidhof R, Hekman EE, et al. Design and evaluation of the LOPEs exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2007,15(3):379—386.
- [16] Mcdaid A, Kora K, Xie S, et al. Human-inspired robotic exoskeleton (HuREx) for lower limb rehabilitation[C]. *Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on Takamatsu*.2013.
- [17] Patton J, Brown DA, Peshkin M, et al. KineAssist: design and development of a robotic overground gait and balance therapy device[J]. *Topics in Stroke Rehabilitation*,2008,15(2):131—139.
- [18] Hussein S, Schmidt H, Hesse S, et al. Effect of different training modes on ground reaction forces during robot assisted floor walking and stair climbing[C]. *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on Kyoto International Conference Center*.2009.
- [19] Patil S, Mcguirk T, Patten C. Effect of Wearable Robotic Leg Orthosis on the Weight Bearing Symmetry during Sit-to-Stand in Individuals Post-stroke[M]. *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation*, Springer, 2013.103—107.
- [20] Johansson BB. Current trends in stroke rehabilitation. A review with focus on brain plasticity[J]. *Acta Neurologica Scandinavica*,2011,123(3): 147—159.
- [21] Brewer L, Horgan F, Hickey A, et al. Stroke rehabilitation: recent advances and future therapies[J]. *QJM*,2013,106(1):11—25.
- [22] Belda-Lois JM, Mena-Del Horno S, Bermejo-Bosch I, et al. Rehabilitation of gait after stroke: a review towards a top-down approach[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*,2011,8(1):66.
- [23] Langhorne P, Coupar F, Pollock A. Motor recovery after stroke: a systematic review[J]. *The Lancet Neurology*,2009,8(8): 741—754.
- [24] Hu XL, Tong KY, Song R, et al. A comparison between electromyography-driven robot and passive motion device on wrist rehabilitation for chronic stroke[J]. *Neurorehab Neural Repair*,2009,23(8):837—846.
- [25] Marchal-Crespo L, Reinkensmeyer DJ. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*,2009, 6(1):20.
- [26] Holden MK, Dyar TA, Dayan-Cimadoro L. Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke[J]. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*,2007,15(1): 36—42.
- [27] Kahn LE, Lum PS, Rymer WZ, et al. Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does[J].? *Journal of Rehabilitation Research and Development*,2006,43(5):619.
- [28] Morris SL, Dodd KJ, Morris ME. Outcomes of progressive resistance strength training following stroke: a systematic review[J]. *Clinical Rehabilitation*,2004,18(1):27—39.
- [29] Lo AC, Guarino PD, Richards LG, et al. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke[J]. *New England Journal of Medicine*,2010,362(19):1772—1783.
- [30] Balasubramanian S, Klein J, Burdet E. Robot-assisted rehabilitation of hand function[J]. *Curr Opin Neurol*,2010,23(6): 661—670.
- [31] Laver K, George S, Thomas S, et al. Cochrane review: virtual reality for stroke rehabilitation[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*,2012,48(3):523—530.
- [32] Wagner TH, Lo AC, Peduzzi P, et al. An economic analysis of robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke[J]. *Stroke*,2011,42(9):2630-2632.
- [33] Lo AC. Clinical designs of recent robot rehabilitation trials [J]. *Am J Phys Med Rehabil*,2012,91(11 Suppl 3): S204—S216.