

穿戴式外骨骼康复辅具临床应用现状分析

陈学斌¹, 刘利荣², 安峥¹, 高敏¹, 高海鹏¹

1. 中日友好医院医学工程处, 北京 100029
2. 山东省诸城市人民医院康复医学科, 诸城 262200

摘要 穿戴式外骨骼康复辅具是一种可穿戴于人体上的智能化生机电控制系统, 该系统通过外骨骼与人体肢体间力-位移的交互实现人机动作的耦合, 可辅助人体实现某些特定功能, 在临床康复治疗领域具有重要应用前景。上肢外骨骼和下肢外骨骼是目前常见的穿戴式外骨骼。上肢外骨骼包括肩肘手臂外骨骼和手指外骨骼, 在康复训练中主要应用于中风后患者肩肘关节及腕手关节运动功能的康复训练。下肢外骨骼能够辅助下肢麻痹患者完成站立及运动, 在下肢运动功能的康复治疗方面具有巨大的应用潜力。本文综述了目前常见的穿戴式外骨骼康复辅具的特点及其临床应用现状, 并总结了目前国内外可穿戴外骨骼的研究进展。

关键词 外骨骼; 穿戴式设备; 康复辅具; 人机交互

中风是临床患者致残的首要原因^[1], 中风以后只有 10% 的患者能够完全恢复, 剩余的幸存者往往会发生肢体运动功能损伤。数据显示, 中风 6 个月后有 50% 的幸存者会发生半身麻痹, 30% 的患者在没有外力辅助的情况下无法行走, 65% 的患者会发生手部功能障碍, 为恢复患者的日常生活能力, 需要对患者进行临床康复训练^[2]。目前康复训练主要依赖于医护人员的手工进行, 康复训练设备相对陈旧、智能化程度不高且人机交互方式不便捷, 这在很大程度上限制了医疗机构临床物理康复治疗的能力, 造成大量患者无法完成有效的康复训练, 因此, 有必要发展新型的智能临床辅助技术装备来满足这种实际需求。

穿戴式外骨骼是一种可穿戴于患者肢体上, 通过模拟患者肢体的运动功能, 辅助患者进行康复训练的康复辅具, 实现了康复治疗的自主化和智能化, 弥补了传统康复治疗方式的不足, 因而受到了广泛关注。临床上根据穿戴位置的不同, 将外骨骼分为下肢外骨骼和上肢外骨骼。下肢外骨骼包括用于对髋关节、膝关节和脚踝关节进行康复训练的外骨骼装置; 上肢外骨骼包括可以对患者肩关节、肘关节及腕关节和手部关节进行康复训练的外骨骼装置。本文从临床角度, 总结分析了目前常见的穿戴式外骨骼康复辅具的特点及其临床应用现状。

1 穿戴式外骨骼机器人临床应用的国际发展

1.1 穿戴式上肢外骨骼

中风后患者临床康复治疗往往重视下肢运动功能的康复训练, 对上肢功能和手功能的康复训练重视不足, 再加上目前常规的康复训练是以医护人员手工进行, 而上肢功能的康复治疗需要进行更多更精细的康复训练, 因此中风后大部分患者会出现上肢和手功能的损伤。上肢外骨骼的出现使得患者可以自主进行康复训练, 患者可以对康复训练实现精确可控的设定, 实现人机互动, 而且可以节省大量的医疗资源。本节将总结目前常见的手臂和手功能康复训练相关外骨骼的临床应用情况。

1) ARAMIS 上肢外骨骼。ARAMIS 是一种用于神经康复训练的外骨骼装置, 专用于中风后偏瘫患者上肢功能康复训练使用(图 1)^[3]。它利用手臂和肩部肢体神经分布的功能相互作用, 提供解剖和生理功能的条件来支持上肢功能潜在的恢复。ARAMIS 外骨骼包括两个对称的穿戴式外骨骼, 在康复过程中其能够克服手臂的重力作用, 在力量和准确性上辅助上肢局部麻痹患者手臂的康复训练。在康复训练过程中它能够实现患者与外骨骼的互动, 在康复训练中可以对每位患者进行个性化的康复方法。

在康复训练过程中, ARAMIS 能够测量肩关节, 肘关节和

收稿日期: 2016-11-02; 修回日期: 2016-12-18

作者简介: 陈学斌, 博士, 研究方向为智能医疗设备研发及医疗设备管理, 电子信箱: chenxuebin116@163.com; 安峥(通信作者), 副主任医师, 研究方向为医疗设备检测及监管, 电子信箱: anz@vip.sina.com

引用格式: 陈学斌, 刘利荣, 安峥, 等. 穿戴式外骨骼康复辅具临床应用现状分析[J]. 科技导报, 2017, 35(2): 50-54; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.02.006



图1 ARAMIS 上肢外骨骼

Fig. 1 ARAMIS upper limb hand exoskeleton

前臂关节运动功能的基础线,并根据测量结果提供针对关节的康复训练方式。临床试验结果显示使用 ARAMIS 外骨骼进行康复训练 8 周后,患者的恢复状况与常规康复训练相比没有明显差异,说明该外骨骼装置能够为患者上肢功能的恢复提供有效的康复训练。

2) Armeopower 上肢外骨骼。Armeopower 上肢外骨骼是一种通过患者脑电控制主动模式的上肢外骨骼装置(图 2),针对肩部、肘部以及手腕关节,能够实现 7 个自由度的活动^[4]。对于严重功能损伤的患者,该外骨骼能够克服患者上肢的重力作用,辅助患者进行任务靶向的康复训练。该外骨骼通过位于头部的 64 个位置的电极检测脑电图的活动,进而控制手外骨骼完成手指康复训练时的虚拟任务,达到手功能康复训练的目的。



图2 Armeopower 上肢外骨骼

Fig. 2 Armeopower upper limb hand exoskeleton

3) NMES 上肢外骨骼。NME 上肢外骨骼^[5],针对由于高程度的脊髓损伤而导致无法随意活动肩部和上肢的患者,NMES 外骨骼是一个具有 3 个活动自由度的被动外骨骼装置,固定在患者的背三角肌和肱三头肌之上(图 3)。患者穿戴该外骨骼装备后可以通过眼球的转动控制外骨骼的运动路线,完成自己的目标。该外骨骼能够完成喝水、梳头以及按闹铃等日常常规动作。为保证手臂的安全性,外骨骼的一个关节运动时,另外 2 个关节的活动自由度被关闭。在测试

试验中,研究者选取了 5 名志愿者来完成从桌子上取水杯喝水的动作,结果显示,NMES 系统能够顺利完成测试。



图3 NMES 上肢外骨骼

Fig. 3 NMES hand exoskeleton

4) 柏林大学手外骨骼。柏林大学研发的手外骨骼装置,针对外伤或中风后导致的手功能损伤患者的康复训练(图 4)^[6]。该装置包括 5 个外骨骼手指,每个手指能够实现 4 个自由度的运动,所有该外骨骼可以实现整手 20 个自由度的活动。在该外骨骼中直流电机通过 3 个连杆装置控制每个手指的运动,电机的启停是通过患者前臂背部和手掌等处的 16 块肌肉所发出的肌电信号来控制的。在该外骨骼上安装有多种传感器,包括多种位置传感器、压力传感器及肌电传感器等,由于多种传感器的存在,该外骨骼能够保证患者在康复训练过程中安全有效地使用。

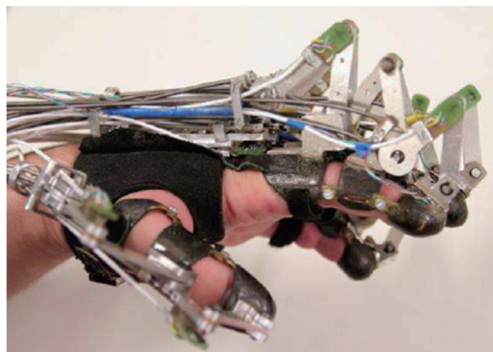


图4 柏林大学手外骨骼

Fig. 4 Berlin University hand exoskeleton

5) Handexos 手外骨骼。Handexos 手外骨骼装置可以用于辅助中风后患者手功能的康复训练,该装置有 5 个外骨骼手指结构,每个外骨骼手指能够实现 1 个自由度的活动,外骨骼手指的运动通过直流电机带动安装于外骨骼上滑轮装置上的线驱动(图 5)^[7]。这种外骨骼手指使用欠驱动机制,这种机制的优点是外骨骼具有自适应的能力,患者的手在穿戴上手外骨骼后能够通过适应抓握物体通用的形状来实现抓握物体。

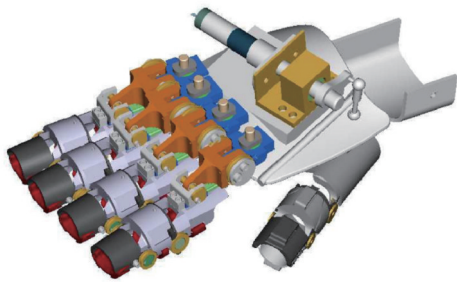


图5 Handexos 手外骨骼
Fig. 5 Handexos hand exoskeleton

1.2 穿戴式下肢外骨骼

下肢运动功能的丧失是最严重的运动功能损伤,腿部运动功能失灵不仅会增加患者身体的痛苦,而且会增加患者的沮丧情绪,降低患者的生活质量。最近的研究显示下肢外骨骼机器人作为一种可穿戴的仿生装备,可为患者腿部的运动提供外力支持^[9]。这种基于新技术的辅助装备,能够为完全腿部麻痹患者提供站立和运动的能力,由于可完全承重且具有互动模式,因此它们也可应用于康复领域,作为一种康复辅具来提高步行能力和承重能力。

1) BLEEX 下肢外骨骼。2004年,美国加州大学伯克利分校研究了一种可负重的动力型外骨骼 BLEEX 系统(图6)^[9]。该系统靠液压驱动,可以完整完成下肢7个自由度的活动,能够实现髋关节的弯曲伸展,内收外展,膝关节的屈伸和踝关节的内翻、外翻等动作;实验者穿戴该设备时,在负重35 kg时仍能轻松行走。为强调康复治疗应用,Berkeley Bionics 公司于2007年成立,以 BLEEX 系统为基础开发出了 eLEGS 系统(2010年),进而于2011年更名为 Ekso Bionics 公司,推出了系列 Ekso Bionics 下肢外骨骼。Ekso Bionics 系统的特色在于通过使用大量的轻质材料(铝合金、钛合金、碳纤维等金属和复合材料),使得系统质量轻且耐用(这是该外骨骼成本高昂的主要原因)。Ekso 外骨骼系统搭建了高精度的传感器、拟人化关节,还有运算功能强大的控制器和软件系



图6 伯克利下肢外骨骼:BLEEX、eLEGS、Ekso Bionic
Fig.6 Berkeley lower extremity exoskeleton BLEEX, eLEGS and Ekso Bionic

统。驱动装置使用锂电池供电,能够满足使用者1天的使用需求。该系统具有3种模式,分别是 First Step(医生辅助模式)、Active Step(用户自主模式)和 Pro Step(自感应动作模式),康复患者可以根据康复进度和自身的情况来选择系统模式。

2) Rewalk 外骨骼机器人。Rewalk 是以色列 Argo Medical Technologies 公司研制的康复下肢外骨骼辅具产品(图7),可辅助下身瘫痪患者运动,帮助患者康复实现生活自理。ReWalk 由电力驱动的腿支架、传感器和一个装有蓄电池及计算机控制系统的背包组成,此外还需要一副帮助维持平衡的拐杖;通过腕部的无线接口,可激活站立、坐下或者行走模式。该系统拥有被称为“自然步态”的功能,能够根据躯干倾角计数数据感应患者重心的变化,使得下肢杆件能够模仿自然行走的步态,实现双足运动;并能根据实际检测数据控制行走速度。目前只有 ReWalk 具备个性化自动调整的功能,且 ReWalk 是目前第一个通过美国食品药品监督管理局(FDA)认证的外骨骼产品。



图7 Rewalk 下肢外骨骼
Fig.7 Rewalk lower extremity exoskeleton

3) XOS 系列骨骼机器人。2008年美国的 Steve Jacobsen 等^[10]成功研制了 XOS-1 外骨骼机器人,穿戴该外骨骼后,穿戴者可以将重200磅的物体轻松举起,但该外骨骼相对笨重,可完成动作较少,工作时间较短。2010年推出的 XOS-2 改进型外骨骼机器人更加轻便,仿生性能更强,能够完成踢球、击打、上楼梯、下坡等动作。

4) NTU 下肢外骨骼机器人。南洋理工大学研制可辅助人体行走和搬运物体的 NTU 可穿戴式外骨骼机器人能够实现下肢关节在矢量面内3个自由度的活动,能够满足日常行走的需要,该外骨骼机器人可以在实时采集人体活动信号的同时完成对人体行走活动的控制。可辅助患者进行下肢运动能力的康复训练^[11]。

5) 密歇根大学下肢外骨骼机器人。该外骨骼机器人是由气动系统驱动,基于跑步机实现的可穿戴式外骨骼机器人,能够帮助偏瘫患者恢复运动机能,由于该外骨骼设计的

特性,其无法实现便携式,只可在家庭或医疗单位作为康复辅具使用^[12]。

6) 日本PAS气压动力服。PAS气压动力服是一种专门为医护人员设计的外骨骼装置,该装置包括肩部、手臂、腰及腿部等结构,该装置靠气动系统提供动力,可以辅助医护人员看护行动不便的患者,该装置能够增加人体0.5到1倍的人体力量^[13]。

2 中国穿戴式外骨骼机器人的发展现状

中国多家研究机构开展了外骨骼关键技术研究,并先后出现了几种典型的原型系统。在上肢外骨骼领域,2009年,北京航空航天大学就研制出了食指外骨骼手指,能够实现4个自由度的活动,并且安装有多种传感器以保证外骨骼手指的安全有效使用^[14]。哈尔滨工业大学研制的手外骨骼装置通过齿轮结构带动外骨骼的运动,能够实现手指2个自由度的活动^[15]。此外南京大学、上海理工大学等也研制出轻型化外骨骼手功能训练装置^[16-17]。在下肢外骨骼研究领域,浙江大学、华中科技大学等也有较好的研究。

但是,中国的外骨骼产品化工作推进缓慢,只有个别的双下肢外骨骼系统接近产品化。北京航空航天大学研制的大艾外骨骼机器人(图8)已经在北京积水潭医院、国家康复辅具研究中心等单位康复医疗专家团队的参与临床指导下完成了百余例临床实验;该系统能够实时监控穿戴者的行走特点,并通过在线反馈、智能引导、调整步态,助力脊髓损伤患者重新行走或使早期偏瘫患者重塑正确行走能力。



图8 大艾外骨骼机器人

Fig 8 Da ai lower extremity exoskeleton

电子科技大学研制的AIDER外骨骼机器人系统(图9)使用生机电一体化系统,通过外骨骼传感器感知人体站立、行走等运动意图,并把信息迅速传递给计算机,通过控制模块传达命令,实现电驱关节、机械连杆、智能鞋、腰部支撑及绑缚附件高效运转,从而帮助使用者自如行动。



图9 AIDER外骨骼机器人

Fig. 9 AIDER exoskeleton

3 展望

外骨骼机器人在临床上具有较好的应用前景,但是也存在一些问题如下。1) 目前外骨骼机器人的临床研究仍然较少,对外骨骼机器人在临床应用的有效性方面研究不多见。2) 外骨骼机器人是一种智能化的康复辅具,但是目前的报道来看无论是在设备柔性化还是在设备控制模式方面,穿戴式外骨骼机器人都存在仿生性能不足、无法与人体实现有机融合的问题。3) 目前研究的可穿戴式外骨骼机器人普遍存在设备臃肿笨重、不便于患者穿戴等问题。因此,在未来对穿戴式外骨骼辅具的研究中,除了在设备仿生能力的提高及设备的轻便化方向继续加强研究外,还应加强对外骨骼临床有效性的研究,通过比较外骨骼康复治疗与常规康复治疗对肢体康复效果的差异,加强外骨骼康复治疗后人身体力学改变情况的研究。

参考文献(References)

- [1] Feigin V L, Lawes C M M, Bennett D A, et al. Stroke epidemiology: A review of population-based studies of incidence, prevalence, and case-fatality in the late 20th century[J]. *The Lancet Neurology*, 2003, 2(1): 43-53.
- [2] Centers for disease control and prevention behavioral risk factor surveillance system: Turning information into health data[EB/OL]. (2008-09-15)[2016-12-20]. <http://www.cdc.gov/brfss>.
- [3] Pignolo L, Lucca L L, Basta G, et al. A new treatment in the rehabilitation of the paretic upper limb after stroke: The ARAMIS prototype and treatment protocol[J]. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità*, 2016, 52 (2): 301-308.
- [4] Brauchle D, Vukelic M, Bauer R, et al. Brain state-dependent robotic reaching movement with a multi-joint arm exoskeleton: Combining brain-machine interfacing and robotic rehabilitation[J]. *Frontiers in human neuroscience*, 2015, 9: 564.
- [5] Klauer C, Schauer T, Reichenfeller W, et al. Feedback control of arm movements using Neuro-Muscular Electrical Stimulation (NMES) combined with a lockable, passive exoskeleton for gravity compensation[J].

- Frontiers in Neuroscience, 2014, 8: 262.
- [6] Wege A, Hommel G. Development and control of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries[C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada: IEEE, 2005: 3046-3051.
- [7] Chiri A, Giovacchini F, Vitiello N, et al. HANDEXOS: Towards an exoskeleton device for the rehabilitation of the hand[C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, Missouri, USA: IEEE, 2009: 1106-1111.
- [8] Sale P, Franceschini M, Waldner A, et al. Use of the robot assisted gait therapy in rehabilitation of patients with stroke and spinal cord injury [J]. European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, 2012, 48 (1): 111-121.
- [9] Kazerooni H, Steger R, Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX)[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(5-6): 561-573.
- [10] Hayden, Kevin Cudby. Rex The Robotic Exoskeleton[EB/OL]. (2012-02-09)[2012-03-20]. <http://technology.tki.org.nz/Resources/Case-studies/Technologists-practice-case-studies/Electronics-and-contr01.technologies/Rex-the-robotic-exoskeleton>.
- [11] Low K H, Liu X, Yu H. Development of NTU wearable exoskeleton system for assistive technologies[C]//IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005. Niagara Falls, Canada: IEEE, 2005, 2: 1099-1106.
- [12] Sawicki G S, Gordon K E, Ferris D P. Powered lower limb orthoses: Applications in motor adaptation and rehabilitation[C]//9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. Chicago, United States: IEEE, 2005: 206-211.
- [13] Yamamoto K, Ishii M, Noborisaka H, et al. Stand alone wearable power assisting suit-sensing and control systems[C]//13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2004. Roman: IEEE, 2004: 661-666.
- [14] Wang J, Li J, Zhang Y, et al. Design of an exoskeleton for index finger rehabilitation[C]//2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Minneapolis, United States: IEEE, 2009: 5957-5960.
- [15] Fu Y, Wang P, Wang S. Development of a multi-DOF exoskeleton based machine for injured fingers[C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France: IEEE, 2008: 1946-1951.
- [16] Sun Z, Miao X, Li X. Design of a bidirectional force feedback data-glove based on pneumatic artificial muscles[C]//2009 International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China: IEEE, 2009: 1767-1771.
- [17] 易金花, 李继才, 胡鑫, 等. 轻量化外骨骼手功能训练器结构设计及实现[J]. 中国生物医学工程学报, 2014, 33(5): 630-634.

Clinical applications of wearable exoskeleton rehabilitation aids

CHEN Xuebin¹, LIU Lirong², AN Zheng¹, GAO Min¹, GAO Haipeng¹

1. Department of Medical Engineering, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China

2. Department of Rehabilitation Medicine, Zhucheng People's hospital, Zhucheng 262200, China

Abstract The wearable exoskeleton is an intelligent biomechatronic system directly attached to the human body. The human-machine coupling characteristics - from the dual point of view-are derived from the force/moment interaction between the two systems, which can compensate the insufficient capacity of the human body, especially for the disabled. The wearable exoskeleton has a great potential in the field of rehabilitation therapy. The upper limb exoskeleton and the lower extremity exoskeleton are main types of wearable exoskeletons, which can be used for the motor rehabilitation. The upper limb exoskeleton contains the shoulder-arm hand exoskeleton and the hand exoskeleton, which can be used for the physical therapy of the upper limb and the hand fingers. The lower extremity exoskeleton can assist the patients of lower limb paralysis with active standing or walking, with a great potential for lower extremity rehabilitation. This paper reviews the clinical application status of wearable exoskeleton rehabilitation technical aids, and analyzes the current situation and the prospect of the wearable exoskeleton in China.

Keywords exoskeleton; wearable device; rehabilitation aids; human-machine interaction

(责任编辑 田恬)