

·综述·

一种可提高和改善步行功能的装置：动力下肢外骨骼系统的设计及应用

王一吉, 李建军

[摘要] 下肢外骨骼系统是一种结合了人工智能和机械动力装置的机器人。近年来, 下肢外骨骼机器人发展迅速, 相关技术不断成熟, 极大增强了人类的步行能力, 但是一些新技术在缺乏实际环境中的检验。本文主要回顾下肢外骨骼机器人的结构配置、控制方式和仿真检验, 认为今后的研究方向应将各种新技术结合起来, 更好地推动下肢外骨骼机器人的发展。

[关键词] 下肢外骨骼; 机器人; 步行功能; 综述

Design and Application of Active Lower Extremity Exoskeleton System: Appliance to Improve Walking Function (review) WANG Yi-ji, LI Jian-jun. Department of Spinal Cord Injury Rehabilitation, Capital Medical University School of Rehabilitation Medicine, Beijing Charity Hospital, China Rehabilitation Research Centre, Beijing 100068, China

Abstract: Lower extremity exoskeleton system is a kind of human-machine robot, which combines the artificial intelligence with the power of mechanism. Recent years, the field of lower extremity exoskeleton robots have rapidly evolved and development of relevant technologies have dramatically increased these robots available for facilitating human walking function that could only be imagined a few years ago. Some technologies are so new that they lack the scientific evidence that would justify their use in the real setting. This paper presents an over view of design configurations, control methods and simulation test used for lower extremity exoskeleton robots. Further research efforts are required in order to incorporate many of the new technologies described in this review to promote the development of the lower extremity exoskeleton robots.

Key words: lower extremity exoskeleton; robot; walking function; review

[中图分类号] R496 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-9771(2011)07-0628-04

[本文著录格式] 王一吉, 李建军. 一种可提高和改善步行功能的装置: 动力下肢外骨骼系统的设计及应用[J]. 中国康复理论与实践, 2011, 17(7): 628—631.

外骨骼(exoskeleton)一词最初来源于生物学, 是指能为生物体内柔软器官提供构型、架构和保护支持的坚硬外部结构, 如虾、蟹等节肢动物体上坚韧的骨骼。随着科技的进步, 科学家们对其赋予了新的含义: 外骨骼是一种结合了人工智能和机械动力装置的机器人^[1]; 穿戴在操作者外部, 融合了控制、传感和人机结合等技术, 提供支撑、运动、防护等功能的机械装置^[2], 在军事、生活、医疗等方面具有广泛的应用前景^[3]。按应用部位来说, 可以分为下肢外骨骼和上肢外骨骼。本文主要介绍可提供行走辅助和医疗康复作用的动力下肢外骨骼系统。

1 外骨骼的发展历史和现状

下肢外骨骼已有 60 余年的发展历史。从时间来看, 前苏联和前南斯拉夫开发最早, 欧美国家和日本发展最快, 我国在这一领域起步较晚, 但也取得了一定成果。从应用方向来看, 军事上的研究较早, 技术领先; 而用于日常辅助和康复方面的研究较晚, 技术相对落后。

早在 1948 年, 前苏联 Bernstein 教授设计出世界上第一套电机驱动下肢外骨骼系统^[4]。1971 年, 前南斯拉夫的 Vukobratovic 教授研制出第一个应用于脊髓损伤患者的气缸驱动下肢外

骨骼^[5]。随着相关技术的成熟, 下肢外骨骼在 20 世纪末得到了飞速发展^[6]。

美国伯克利大学研制的主要用于军事方面的下肢外骨骼(Berkeley Lower Extremity Exoskeleton, BLEEX)由金属腿、能量控制单元、计算机以及后背架组成, 使用液压传动系统和箱式微型 Exoskeleton 空速传感仪, 通过计算机预测身体动作来提供助力^[7]。美国国防部高等研究计划局耗巨资最新研制的 XOS 2 代表了外骨骼领域最尖端的技术。其他的如“Spring-Walker”、“RoboWalker”也正准备进行商业化生产。

用于日常辅助的有日本筑波大学 Yoshiyuki Sankai 教授研制的世界上第一款商业外骨骼机器人(Hybrid Assistive Limb, HAL), 通过附着在下肢屈伸肌表面的肌电和肌肉刚度传感器来控制步行^[8], 主要用于提高老年人的步行能力。已经用于康复治疗的典型代表是瑞士 HOCOMA 公司的 Lokomat^[9], 可以使患者在减重状态下进行步行功能训练。德国柏林自由大学的 HapticWalker 利用二自由度的双曲柄摇杆系统带动步行^[10], 并可进行上下楼梯和稳定性训练^[11]。其他已经应用于康复治疗的还有美国南方保健医疗中心的 AutoAmbulator、Gait Trainer

作者单位: 1. 中国康复研究中心北京博爱医院脊柱脊髓损伤康复科, 北京市 100068; 2. 首都医科大学康复医学院, 北京市 100068。作者简介: 王一吉(1982-), 男, 湖南衡阳市人, 医师, 主要研究方向: 脊髓损伤的后期康复。

(GT)^[12]。国内具有代表性的有哈尔滨工业大学研制的 AVR 单片机下肢外骨骼系统^[13]。此外,北京工业大学李剑锋、华东理工大学曹恒等研制的下肢外骨骼机器人均已获得国家专利。

2 下肢外骨骼的主要结构

下肢外骨骼结构在不同的应用领域略有不同,但大体上主要由控制系统、驱动系统、机械腿和传感器4部分组成^[14]。

2.1 控制系统 控制系统是控制机械腿的启动、调速、运动、制动的主令装置。常采用模块化或层次化的控制结构,便于对各个组分进行分析测试,避免局部故障对整体的影响。可将控制器自上而下分为行走规划层、步态综合层和关节控制层。通过层次化的区分可以很好地理解控制流程。

首先,由行走规划层对传感器反馈的数据进行分析并计算出步行模式;然后将信息传送至步态综合层,由步态综合层完成步态的拟合,并算出步行时各关节角度;再将信息传递到关节控制层中,由关节控制层实时地对驱动器进行闭环控制^[15]。也可将行走规划层和步态综合层归于上位机控制系统,关节控制层归于下位机控制系统。

控制系统与计算机系统类似,也包括硬件和软件。功能强大的软硬件可以更好提高控制系统的精确性。上位机控制系统的硬件主要包括控制装置、运动控制卡、数据采集卡、交流伺服系统、角度编码器等^[16];下位机控制系统的硬件主要包括单片微型计算机,简称单片机,可以直接对驱动装置进行控制。最常用的有 AT89S51 单片机^[17]。对于软件来说,应具有稳定性、复用性和扩展性等特点。用于上位机控制系统的软件较多,常用的有 NI-LabVIEW+NI-motion、MatLab 和 LabVIEW,三者各有优势。NI 软件可用于无硬件知识的用户^[16],MatLab 在进行复杂控制算法方面十分方便和高效,LabVIEW 可进行虚拟控制。下位机控制系统常用 C 语言实现对硬件的直接控制^[17]。

2.2 驱动系统 驱动系统又叫传动部,一般为电动机、耦合器和减速器的总称,是各种机械的动力源。根据应用的能源不同将驱动方式分为电动、气动或液压3种。驱动器的放置有2种方式,一种放置在远程站中,另一种方法是直接安装在外骨骼上。

目前大多数下肢外骨骼系统的驱动器都采用伺服电机,其优点是技术较成熟,控制精度高,但也存在开发成本高、抗过载的能力差、难以小型化等不足,主要应用于仅需中、小功率时。

气动系统主要由气泵、气缸和气动比例流量阀3部分组成。其优点有选型范围广、设计条件宽、承载能力好、开发成本低,但需二次能源转换,效率较低^[17]。最近,气动人工肌肉(简称“气动肌肉”, Pneumatic Muscle, PM)因其良好的仿生性受到国内外的广泛关注,它是由压缩空气作为驱动力来完成类似肌肉的屈伸,已经投入市场的有英国 Shadow 气动肌肉,德国 Fluidic Muscle 等^[18]。随着技术的进一步成熟,气动肌肉的应用范围必将更加广泛。

液压驱动与气动系统都有压力泵,但液压驱动是由容量可

变的液压泵和执行机构组成,通过流体液压来驱动机械装置。它具有稳定和承受转矩大等特点,符合下肢承重、减震等仿生学的特点^[19]。但这种驱动方式需要油缸及液压管路,导致外骨骼负荷量的增加,从而限制了行走时抬腿及下蹲的幅度^[20]。

安装在远程站中的驱动器主要通过电缆、刚性连接、气动或液动系统来传送动力^[19],其优点是驱动器的重量不受限制,可提供大功率能量;但需解决传输效率和耐久度较低,无法精确控制等问题^[21]。直接安装在外骨骼上的驱动器可提高传输效率和人机关节校准度,但会增大外骨骼重量^[22]。

2.3 机械腿 机械腿由双侧对称的机械结构组成,固定在平行四边形机构上^[23];在髋、膝、踝处各有一个转动关节,由独立的带滚珠丝杆和减速齿轮的驱动机构驱动,可实现矢状面上屈伸^[24],并装有用于监测关节转动角度的角度电位计。机械腿长度可自由调节,以适应不同身高的使用者^[16];而机械腿上的卡环和绷带搭扣可将使用者下肢固定在机械腿上进行辅助步行^[25]。

2.4 传感器 传感器是一种检测装置,主要安装在外骨骼的重要部位,获取各项数据(包括能量、角度以及扭矩等),然后将数据按一定规律转换成电信号或其他形式的信息,传递到控制系统,是实现自动检测和自动控制的首要环节。华东理工大学的曹恒等研制出一种用于测量下肢外骨骼足底压力的小型轮辐式传感器,可识别不同步态足底的压力变化,并可对微弱信号进行放大,实用价值很高^[26]。

3 下肢外骨骼控制步行的方式

步行是一个非常复杂的运动,需要各方面的协调配合,尤其是要达到可在各种环境下完成行走的目标来说,下肢外骨骼需要一个可进行复杂操作和高级决策的控制方式,以更好地适应外界环境,实现行走的稳态控制。常用的控制方式有肌电控制、地面反作用力(Ground Reaction Force, GRF)控制、零力矩点(Zero Moment Point, ZMP)控制、灵敏度放大控制(Sensitivity Amplification Control, SAC)和预编程控制等,它们的控制原理各不相同,也各有优劣。

肌电控制的应用十分广泛,大部分外骨骼装置都采用肌电控制,最成功的应用是 HAL,通过下肢肌肉的主动收缩来控制步行。控制路径为提取信号→提取运动模式特征值→识别动作模式→控制外骨骼。其中最基本的问题就是肌电信号特征的识别,识别的方法有时域法、频域法、时域-频域法、高阶谱及混沌与分形等。由于电极能与表皮直接接触,受外界因素影响小;但由于缺乏关节力矩与电信号之间对应关系,在激烈运动下电极易脱落、易位^[1],在应用范围,尤其是军用上受到一定的限制。

GRF 控制是区别于传统的控制方法,目前仍在研究阶段。GRF 是步行中除了重力之外惟一作用于身体的外力,并且是惟一可推动质心移动的力。由于外骨骼与人的质量特性相似,所以如果外骨骼与人的地面反作用力相似,就可通过 GRF 控制外骨骼与人同步行走。零力矩点最早由 Vukobratovic 教授提出,是判定机器人动态稳定运动的重要指标,至今仍广泛应用

于下肢外骨骼动态稳定运动的规划与控制中。BLEEX 是其最典型的代表。SAC 是通过将人作用在外骨骼上的外力定义为灵敏度函数,然后将该函数最大化,从而实现用较小的力来控制外骨骼的运动;由于不需要安装任何传感器,可大大提高舒适度,但建立其控制的数学模型较难^[27]。预编程控制是通过预先编好的程序来控制外骨骼,步行模式十分有限并且需要手杖或者助行器来保持步行的稳定,操作者只能进行如“开始”或者“停止”等有限的干预^[1]。

4 下肢外骨骼运动的仿真检验

设计下肢外骨骼的最终目的是可顺利地进行步行,因此必须对其进行实用性检验。以往需要制造实际样机,但制作样机耗时、费力,改动繁琐。随着计算机技术的进步,近年来,虚拟样机技术在外骨骼仿真检验中的应用越来越成熟。虚拟样机技术(virtual prototyping technology)是一项新生的工程技术,是使用虚拟样机来代替物理样机,对设计方案的某一方面进行仿真测试和评估的过程。它采用计算机仿真与虚拟技术,把外骨骼相关资料集成到一个可视化的环境中,建立虚拟样机模型,结合控制软件进行样机的运动学、动力学以及控制方面的检验。常用辅助软件有 Automatic Dynamic Analysis of Mechanical system(ADAMs)、CAD 三维建模软件(如 CATIA、Pro/E、UG、Solidworks 等)。对于简单的机械模型可直接用 ADAMs 建模,但对于复杂的机械模型需用 CAD 软件建模^[28]。

5 当前的问题和研究方向

虽然下肢外骨骼的开发已取得了很大进步,但整体来说还处于发展阶段,今后可加大在人机结合、设计、能源和伦理等方面的研究。随着神经网络技术的成熟,加强神经系统与外骨骼之间信息交流逐步成为现实,是下肢外骨骼机器人发展重要的趋势。在 2011 年 1 月展示的最新 HAL 套装可通过安装在阿克曼腿上的感应器监测大脑传递到下肢肌肉的信号来实现意念控制,使用者只需进行想象就可进行步行^[8]。

就目前外骨骼的设计来说,结构笨重、功率较低、耗能大等都限制了外骨骼的应用,需开发便携式下肢外骨骼以减少步行时对体力的要求,如“第二皮肤”可以更好地适应骨突部和组织的变化^[2]。

能源的供给也是一个极具挑战性的问题。近年来,高性能电池成为新的研究方向,如锌空气电池(zinc air battery)。它是用活性炭吸附空气中的氧或纯氧作为正极活性物质,以锌为负极,以氯化铵或苛性碱溶液为电解质的一种原电池,又称锌氧电池。其基本工作原理为阴极上的锌与空气中的氧发生电化学反应(负极反应),类似银氧或汞氧电池的化学反应,优点是性价比、储能大、功能时间长等^[29]。

此外,下肢外骨骼必须有很高的安全性和依从性^[30],并制定相应的伦理规范^[15]。

值得一提的是相关信息交流不足也是限制外骨骼发展的因素。由于营利性公司不会轻易地公布他们的研究与开发,缺少严格控制的科学研究和公开出版的高端技术,因此大学和学院里的研究者需要与营利性公司合作,共创互利共赢的局面^[31]。

综上所述,虽然大多数下肢外骨骼研制目的是在军事上提高士兵行军速度和承载能力,但是科学家和工程学家们正在将其应用于更广的领域,如重建神经损伤患者步行功能、辅助分析下肢运动生理、解决日常生活中的问题等。随着驱动器、传感器、材料、能源和计算机技术的进步,下肢外骨骼肯定会得到更大的发展。

[参考文献]

- [1]杨智勇,张静,归丽华,等.外骨骼机器人控制方法综述[J].海军航空工程学院学报,2009,24(5):520-526.
- [2]Herr H. Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions[J]. Neuroeng Rehabil,2009,6: 21.
- [3]Miyoshi T,Hiramatsu K,Yamamoto SI,et al. Robotic gait trainer in water: Development of an underwater gait-training orthosis[J]. Disabil Rehabil,2008,30:81-87.
- [4]董亦鸣,杨灿军.下肢康复医疗外骨骼训练控制系统研究与初步实现[D].杭州:浙江大学,2008.
- [5]Vukobratovic M,Boorvae B,Surla D,et al. Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control, and Application[M]. Berlin: Springer-Verlag,1990.
- [6]Pratt J,Krupp B,Morse C,et al. The roboknee: an exoskeleton for enhancing strength during walking[C].// New Orleans:IEEE Conf. on Robotics and Aut.,2004: 2430-2435.
- [7]Zoss AB,Kazerooni H,Chu A. Biomechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) [J]. IEEE/ASME Trans Mechatronics,2006,11(2):128-138.
- [8]Romero J. Robot Suit[Z]. HAL Demo at CES 2011,2011-01-09.
- [9]Hocoma. Lokomat® - functional locomotion therapy with augmented feedback[OL]. <http://www.hocoma.ch/en/products/lokomat/>. [2009-12-08].
- [10]Schmidt H,Hesse S,Bernhardt R,et al. Hapticwalker: a novel haptic foot device[J]. ACM Trans Appl Percept (TAP),2005,2: 166-180.
- [11]Hesse S. Robot-assisted motor rehabilitation of upper and lower extremities after stroke: it's evidence[J]. Clin Neurophysiol, 2008,119: S1-S131.
- [12]Sinikka H,Airaksinen O,Huuskonen P,et al. Effects of intensive therapy using gait trainer or floor walking exercises early after stroke[J]. Rehabil Med,2009,41: 166-173.
- [13]Reinkensmeyer DJ,Aoyagi D,Emken JL,et al. Tools for understanding and optimizing robotic gait training[J]. Rehabil Res Dev,2006,43(5):657-670.
- [14]Hiroaki K,Yoshiyuki S. Power assist method based on phase sequence driven by interaction between human and robot suit[C].// Okayama Japan:13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication,2004: 491-496.
- [15]张蕊,张佳帆,江灏.可穿戴式柔性外骨骼人机智能系统可靠

- 性及应用伦理问题研究[J].机电产品开发与创新,2008,21(5):19-21.
- [16]李荫湘,钱晋武,沈林,等.步行康复机器人轨迹控制方法研究[J].机电工程,2010,27(6):47-51.
- [17]张欣,陈鹰,杨灿军.下肢康复医疗外骨骼气动控制系统的设计和实验研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- [18]谭世江,王岚.气动助力机械腿机构设计及实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学.
- [19]Veneman JF,Kruidhof R,Hekman EEG,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.
- [20]赵彦峻,徐诚,张景柱.人体下肢外骨骼关键技术分析与研究[J].机械设计,2008,25(10):1-4.
- [21]Hussain S,Xie SQ,Liu GY. Robot assisted treadmill training: Mechanisms and training strategies[J]. Med Eng Phys,2010,12:13
- [22]Banala SK,Kim SH,Agrawal SK,et al. Robot assisted gait training with active leg exoskeleton (ALEX)[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng,2009,17(1):2-8.
- [23]余伟正,钱晋武,冯治国,等.下肢外骨骼矫形器运动学分析[J].上海大学学报(自然科学版),2010,16(2):130-134.
- [24]Feng ZG,Qian JW,Zhang YN,et al. Biomechanical design of the powered gait orthosis[C].// Sanya,China:Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics,2007:1698-1702.
- [25]王企远,钱晋武,冯治国,等.下肢步态矫形器的生理学步态规划与试验[J].中国机械工程,2009,20(8):928-932.
- [26]曹恒,孟宪伟,凌正阳,等.两足外骨骼机器人足底压力测量系统[J].传感技术学报,2010,23(3):326-330.
- [27]刘明辉,顾文锦,陈占伏.基于骨骼服的虚拟人体建模与仿真[J].海军航空工程学院学报,2009,24(2):157-161.
- [28]陈占伏,杨秀霞,顾文锦.下肢外骨骼机械结构的分析与设计[J].计算机仿真,2008,25(8):238-241.
- [29]McGlaun S. Upcoming Zinc-air batteries store more than three times the energy of Lithiumion[J]. Dailylech,2009-10-30.
- [30]Zhang YS,Yang ZY,Wu GS,et al. Mechanical design of power assist exoskeleton suit NES-3 Based on Backstay Cable[J]. Appl Mechanics Materials,2011:1016-1021.
- [31]Ferris DP. The exoskeletons are here[J]. Neuroeng Rehabil, 2009,6:17.

(收稿日期:2011-04-20)