

外骨骼机器人驱动方式的研究

张增峰,陈炜,李浩,李坦东,侍才洪,李瑞欣,苏卫华,张西正

[摘要] 外骨骼机器人是一种可穿戴的机械装置,为穿戴者的运动提供助力以提高穿戴者的运动能力和耐力。驱动系统作为外骨骼机器人的关键系统,是外骨骼机器人提供助力的动力来源。介绍了外骨骼机器人驱动系统的主要分类,并对不同驱动方式的优缺点进行了分析比较,为后续外骨骼机器人驱动系统的选提供了参考。

[关键词] 外骨骼;机器人;驱动

[中国图书资料分类号] R318;TP242 [文献标志码] A [文章编号] 1003-8868(2016)08-0126-04

DOI:10.7687/J.ISSN1003-8868.2016.08.126

Study on exoskeleton robot driving system

ZHANG Zeng-feng¹, CHEN Wei^{1,2}, LI Hao¹, LI Tan-dong¹, SHI Cai-hong², LI Rui-xin², SU Wei-hua², ZHANG Xi-zheng^{1,2}

(1. Tianjin University of Technology, Tianjin Key Laboratory of Design and Intelligent Control of Advanced Mechatronical System, Tianjin 300384, China; 2. Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China)

Abstract The exoskeleton robot is a wearable mechanism which can improve the moving ability and endurance of the wearer by providing extra power to his movement. As the key system of an extremity exoskeleton robot, the driving system is the source of the power. The classification of exoskeleton robot driving systems was introduced, and the advantages and disadvantages of theirs were compared, so that references were provided to further study on exoskeleton robot driving system. [Chinese Medical Equipment Journal, 2016, 37(8): 126-129]

Key words exoskeleton; robot; driving system

0 引言

外骨骼是一种可以对其内部生物提供保护的坚硬构造。基于此,科学家提出了一种外骨骼机器人的概念,用于保护穿戴者并为穿戴者的运动提供助力。外骨骼机器人是一种典型的人机一体化的机械装置,使用时将其穿戴于人体躯干的外侧^[1]。它综合了机械、力学、动力、传感、控制等各方面的技术,其功能主要是为穿戴者的运动提供助力和将穿戴者的负重通过机械结构转移到地面,以减少穿戴者的体能消耗和提高穿戴者的行走速度。外骨骼机器人有着广阔的军用和民用前景,如士兵负重行军、战场救援、抗震救灾、建筑施工、医疗康复行走等。本文主要从目前外骨骼机器人发展存在的问题、外骨骼驱动系统的分类、外骨骼机器人驱动方式的对比分析3个方面进行阐释,以期为后续外骨骼机器人驱动系统的选提供一些参考。

1 外骨骼机器人技术发展中存在的诸多问题

自从1960年第一代外骨骼机器人哈迪曼诞生^[2]以来,世界各国已经研制出多种型号的外骨骼机器

人,比较典型的有雷神公司的XOS系列全身外骨骼机器人^[3]、洛克希德·马丁公司的HULC全身外骨骼机器人^[4]、伯克利大学的BLEEX下肢外骨骼机器人^[5-6]、美国Yobotics公司的Roboknee、以色列的REWALK外骨骼助力装置以及日本筑波大学的“混合辅助腿”HAL外骨骼机器人。国内关于外骨骼机器人的研究虽然起步较晚,但是发展迅速,目前各大高校、研究院也已经研制出若干款外骨骼机器人,例如中科院先进院已经研制出一款康复下肢外骨骼机器人^[7],中科院常州先进制造研究所的EXOP-1^[8]外骨骼机器人已经进入了最后的调试阶段,兵器工业集团202研究所的外骨骼机器人^[9]则是一款单兵用外骨骼机器人。以上外骨骼机器人中,XOS、HULC、BLEEX以及兵器工业集团202研究所的外骨骼机器人采用的是液压驱动方式,REWALK、HAL、中科院先进院的外骨骼机器人则采用的是电驱动方式。虽然目前外骨骼机器人技术发展较快,但还存在着诸多问题,主要表现在以下几个方面^[10]:

(1) 机械结构方面^[11]。采用仿生学的思想对外骨骼进行结构设计,首先要研究人体的运动机理,选择合适的自由度。从生物解剖学的角度出发,包括外骨骼机械结构和关节运动副的优化设计、主动运动自由度分配和冗余自由度的选择等,以便使穿戴者穿

作者简介:张增峰(1989—),男,研究方向为外骨骼机器人,E-mail:zhangzengfeng2008@163.com。

作者单位:300384 天津,天津理工大学机械工程学院,天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室(张增峰,陈炜,李浩,李坦东,张西正);300161 天津,军事医学科学院卫生装备研究所(陈炜,侍才洪,李瑞欣,苏卫华,张西正)

通讯作者:张西正,E-mail:z56787@sohu.com

着舒适、操作灵活,达到人机合一的效果。同时机械结构的设计还要从安全的角度考虑,进行机构设计时要考虑人体关节的最大转动角度,设计限位装置以防在控制系统出错时外骨骼机器人的关节转动角度大于人体关节的极限转动角度而对穿戴者造成损伤。由于人体的负重绝大多数是通过外骨骼机器人的机械结构传递到地面,因此外骨骼机器人零部件的强度设计也是机械结构设计方面的一个重点和难点。

(2)动力驱动方面。在保证输出足够大转矩的前提下,要求驱动系统本身具有体积小、结构紧凑、质量轻等特点。所以,如何选用合理的驱动方式,使得驱动系统本身体积小、质量轻、驱动力足,是一个关键的问题,也是制约外骨骼机器人发展的一个瓶颈。

(3)能源方面。外骨骼机器人的能量源必须是可移动的,并且能够为机器人提供足够的能量。能量必须能够连续供给,同时不会在任务进行中出现衰减,而且能量源要保证安全、清洁无污染。现有的能量供给系统大多比较笨重,不利于携带,而且连续供能的时间也很有限。未来需要研制出更加节能、体积小、便于携带、容量大的能量供给系统。

(4)控制方面^[12-13]。外骨骼机器人控制技术是一项融合传感、算法、信息、移动计算等为一体的复杂技术。对于外骨骼机器人的控制,要使其做到能够准确、快速地预判穿戴者的意图,同时及时发出控制指令给机器人做出响应动作。而且,目前很多测试实验结果都是在穿戴者动作缓慢的情况下得到的,一旦穿戴者进行高速运动或者做相对复杂的动作,外骨骼机器人可能会无法达到预期的响应运动。因此,研究人体的运动机理,提出更好的控制理论以及设计更好的控制器件是未来一个需要解决的难题。

2 外骨骼机器人驱动系统的分类

近年来,国内外各研究机构对外骨骼机器人已经进行了大量的研究,目前应用在外骨骼机器人上的驱动方式主要包括电动机驱动、液压驱动、气压驱动以及人工肌肉驱动等^[14],下面将分别对以上几种驱动方式进行阐述。

2.1 外骨骼机器人电驱动方式

在外骨骼机器人上使用电驱动方式一般有2种方案。一种方案是在旋转关节上直接安装盘式电动机,利用电动机转子的旋转带动关节旋转。这种安装方式结构简单,易于维护拆卸。但是采用这种方案,将使得外骨骼机器人的旋转关节十分笨重,加之安装空间有限,往往会由于电动机尺寸的限制而达不

到理想的输出驱动力,因此这种方案大多用于实验室原理样机上用以开展相关实验研究。另一种方案就是利用电动推杆驱动,在电动推杆两端用连接耳与外骨骼连接,将电动机的旋转运动转化为推杆的直线运动,推动转动关节转动。电动推杆一般由电动机和丝杠组成,通常采用的是直流电动机,其原理是电动机的转动带动丝杠的螺母转动,然后螺母利用螺旋副的原理推动丝杠做直线运动,从而使丝杠带动外骨骼机器人的大腿、小腿、足部分别绕髋关节、膝关节和踝关节做旋转运动,实现髋关节、膝关节和踝关节在矢状面内的屈伸运动。日本筑波大学的 HAL、美国 Yobotics 公司的 Roboknee、中科院常州先进制造研究所在 2014 年研制的外骨骼机器人 EXOP-1 采用的都是电动机驱动方式。EXOP-1 在髋部、膝部和踝部各设置一个电动推杆,分别驱动髋部、膝部和踝部在矢状面内旋转,其结构如图 1 所示。

2.2 外骨骼机器人液压驱动方式

液压驱动^[15]是以流体(液压油)为工作介质进行能量传递的一种传动方式,包括液体介质、能源装置、执行装置、控制调节装置、辅助装置等 5 个部分。其工作原理为:液压泵吸油口从油箱中吸油,油液在液压



图 1 中科院常州先进制造研究所
外骨骼机器人 EXOP-1¹⁴

泵中由于容腔容积的变化而被加压,再从排油口排出高压油,通过一系列压力控制阀、流量控制阀以及方向控制阀的控制,使油液以理想的状态到达液压缸(执行元件),推动液压缸的活塞做直线运动,最终转化成大腿、小腿、足部在矢状面内绕髋部、膝部和踝部的旋转运动。同等功率的设备,液压传动装置的体积更小,质量更轻,结构紧凑,即液压驱动方式的推重比较大。液压装置通过不同的组合可以实现不同的动作,而且由于液压油具有不可压缩性,其动态响应更快。液压驱动技术已经应用在国外很多成熟的外骨骼机器人上,而国内由于外骨骼机器人的研究起步较晚,液压驱动技术应用得比较少。美国的

BLEEX 外骨骼机器人、洛克希德·马丁公司的全身外骨骼机器人 HULC、美国雷神公司的 XOS 系列外骨骼机器人采用的是液压驱动。为了节约能源而提高续航, HULC 外骨骼机器人在髋关节和膝关节各设置一个液压缸, 在踝部不设置液压缸。其结构如图 2 所示。



图 2 HULC 全身外骨骼机器人^[4]

腿、小腿和足部连接耳, 将气缸活塞的伸缩运动转化为各关节的转动以实现外骨骼机器人的行走功能。气压驱动方式在外骨骼机器人上应用较少, 意大利研制的 PAGO 机器人、日本神奈川大学的 Wearable Power Assist Suit 采用的是气压驱动方式。图 3 为日本研制的气动外骨骼机器人^[17]。



图 3 日本的气动外骨骼机器人^[17]

2.4 外骨骼机器人工肌肉驱动方式

采用人工肌肉^[18]的驱动方式则是充分利用了拟人化的设计思想, 外骨骼机器人的每个转动关节由 2 个人工肌肉驱动。这 2 个人工肌肉来回收缩, 使转动关节转动, 从而使外骨骼机器人实现运动。人工肌肉分为气动工肌肉和新型人工肌肉^[19], 其中气动工肌肉与气缸类似, 以气体为介质驱动;

新型人工肌肉是科学家用制作钓鱼线和缝线的纤维扭成非常紧的线圈制成, 并利用温度变化使其收缩与放松, 这种聚合物肌肉能举起的质量是同样大小天然肌肉的 100 倍, 未来这种新人工肌肉的应用, 可能包括机器人微创手术、义肢以及制造功能更强的机器人。人工肌肉驱动方式目前技术还不够成熟, 使用该驱动方式的外骨骼机器人较少, 如美国华盛顿大学研制的气动肌肉动力假肢、英国索尔福德大学研制的康复助行器、Stelarc 外骨骼、日本研制的 Hideyuki Umehara 人造肌肉外骨骼机器人^[20]和哈尔滨工程大学研制的气动助力机械腿等均采用人工肌肉驱动。图 4 为日本的 Hideyuki Umehara 人造肌肉外骨骼机器人。



图 4 Hideyuki Umehara 人造肌肉外骨骼机器人^[20]

3 外骨骼机器人驱动方式的对比分析

采用电动机驱动方式的优点是电动机驱动的技术成熟、控制模式相对简单、响应快、控制精度易于保证、使用维护方便、信号检测和传递处理方便、驱动效率高、对环境污染小、成本较低。但是, 从外骨骼机器人的应用角度出发, 要求驱动系统的体积小且质量轻, 在外骨骼机器人负重的情况下, 如果要实现较大的动力驱动, 则选取的电动机尺寸也会偏大, 不利于整体的轻量化, 而且也会影响机构的灵活性。

采用液压驱动方式的优点是:(1)在输出同样大小功率时, 液压传动方式的结构紧凑、体积小、质量轻。(2)液压传动方式工作比较平稳, 易于实现系统整体的柔顺性。(3)液压油能润滑液压部件, 使得液压系统寿命较长。液压驱动方式的缺点是:(1)由于液压油的可压缩性和存在泄漏等因素, 液压传动不能保证严格精确的传动比。(2)液压传动中, 能量损失较多, 使得系统效率低。(3)液压传动对油液温度的变化比较敏感(主要是黏性), 系统的性能随温度的变化较大, 不宜在温度较低或者较高的地方工作。(4)为减少泄漏, 液压元件需要有较高的加工精

度,使得加工成本较高。(5)液压传动一旦出现故障不易找出故障源^[9]。

气压驱动是一种较为成熟的驱动方式,其优点是:(1)气压驱动工作压力低、使用安全、加速很快,制造精度强度要求比液压元件低且维护简单。(2)气压传动的介质是取之不尽的空气,流动损失小,可集中供气,废气排放处理方便、无污染、成本低。(3)气压驱动方式与液压驱动原理类似,其控制方法可以参考更成熟的液压驱动。其缺点是:(1)气动装置的信号反馈速度较慢。(2)空气具有可压缩的特点,导致气动执行元件的动作稳定性差,速度及位置控制不够精确。(3)压缩空气需要除水,泵驱动时噪声十分大,会造成噪声污染。(4)气压驱动方式的推力偏小,不易实现精确的中间位置调节,通常是在2个极限位置使用。

人工肌肉驱动是一种很有发展前景的新兴驱动方式。相对于其他传统的驱动方式,人工肌肉驱动有较好的柔性,不会对穿戴者造成损伤。在质量相同的情况下,人工肌肉的输出力较大,同时其能量转换效率高、无泄漏、无污染、柔顺性好,但与传统驱动元件相比其行程小,高精度的控制较为困难。另外,气动人工肌肉的抗弯能力很差,只能承受拉力,不能承受压力载荷。由于其技术还不够成熟,人工肌肉驱动方式的经济性也较差。

综上所述,电驱动技术以及液压驱动技术由于相对成熟,大多数外骨骼机器人都采用这2种驱动方式。对于用在康复等用途的外骨骼机器人,由于其负载作用力较小,大多采用的是电驱动方式;对于用在战场行军和抗震救灾等用途的外骨骼机器人,由于其负载较大,大多采用的是液压驱动方式;人工肌肉驱动方式发展迅速,在未来很有发展前景。

4 结语

外骨骼机器人动力系统是外骨骼机器人重要的系统之一。它为外骨骼机器人提供驱动力,就像人体的肌肉之于人体一样,驱动方式的选择对于外骨骼机器人的研制至关重要。驱动系统中各个元件的布局应该从仿生学的角度出发,参考人体各主要的代表性肌肉的分布,模拟人体行走运动时这些肌肉相应功能,从而实现外骨骼机器人与穿戴者的“人机合一”。本文通过对外骨骼机器人不同驱动方式的分析比较,得出了各种驱动方式的优缺点,希望能够为外骨骼机器人驱动方式的选择提供一些参考。

【参考文献】

- [1] 伍宏芳,王佳流,史腾达,等.下肢外骨骼助力装置设计 [J]

科技创新与应用, 2014, 9: 298-299

- [2] 李美成.可穿戴下肢康复外骨骼结构设计及有限元分析 [D]长春:长春理工大学, 2014
- [3] XOS外骨骼系统 [EB/OL] [2015-10-15] <http://baike.haosou.com/doc/7581576-7855670.html>
- [4] HULC [EB/OL] [2015-11-26] <http://baike.haosou.com/doc/2586261.html>
- [5] Berkeley lower extremity exoskeleton [EB/OL] [2015-10-15] <http://bleexme.berkeley.edu/research/exoskeleton/bleex/>
- [6] 邢凯,赵新华,陈炜,等.外骨骼机器人的研究现状及发展趋势 [J]医疗卫生装备, 2015, 36(1): 104-107
- [7] 高交会机器人专展:外骨骼机器人助人行走 [EB/OL] [2012-11-19~2015-11-26] <http://www.iautomation.com/pages/2012-11/h43935.shtml>
- [8] 中科院研制意念控制外骨骼:可一拳打穿墙体 [EB/OL] [2014-06-20~2015-10-25] http://big5.gmw.cn/g2b/legal/gmw.cn/2014-06/20/content_11668847.htm
- [9] 外骨骼:一拳打穿墙体,让你成为钢铁侠 [EB/OL] [2015-07-13~2015-11-12] <http://news.sqq.com/a/20150713/017650.htm>
- [10] CAO H, ZHU J, XIA C, et al. Design and control of a hydraulic-actuated leg exoskeleton for load-carrying augmentation [C]//Third International Conference, ICIRA 2010, November 10-12, 2010, Shanghai China Berlin Springer-Verlag 2010: 590-599
- [11] 张楠,易子凯.外骨骼机器人结构设计与动力学仿真 [J]现代制造, 2014, 3: 106-109
- [12] 王海燕.液压驱动双足机器人运动系统设计与控制 [D]济南:山东大学, 2014
- [13] KAZEROONI H, STEGRE R, HUANG L. Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 5-11, 2005, Orlando Florida [C] New York: ASME, 2005
- [14] 刘会勇,赵青.下肢外骨骼助行机器人驱动系统分析 [J]机床与液压, 2013, 41(13): 168-171
- [15] 许福玲,陈尧明.液压与气压传动 [M]北京:机械工业出版社, 2007
- [16] 沈向东.气压传动 [M]北京:机械工业出版社, 2012
- [17] 日大学生研制外骨骼机器人盔甲,人体肌肉作动力源 [EB/OL] [2011-03-16~2015-11-26] http://news.sctv.com/kjw/qy/201103/20110316_638076.shtml
- [18] 张丹婷.基于气动肌肉的外骨骼上肢助力系统研究 [D]杭州:浙江大学, 2014
- [19] 人工肌肉 [EB/OL] [2015-10-12] <http://baike.haosou.com/doc/1505520.html>
- [20] 日本最新研制外骨骼机械装置“人造肌肉” [EB/OL] [2015-10-12] <http://www.al213.net/news/html/2012-4/39281.html>

(收稿:2015-11-30 修回:2016-03-02)

(栏目责任编辑:李惠萍)