

助力型下肢外骨骼机器人现状及展望

欧阳小平, 范伯骞, 丁硕

浙江大学流体传动与机电控制国家重点实验室, 杭州 310027

助力型下肢外骨骼机器人是模仿人体下肢运动、增强穿戴者运动能力的智能机器人装置,可以在灾难现场救援、野外施工及军事用途等车辆无法通行的环境中发挥作用。通过分析国内外下肢助力型外骨骼机器人的研究现状,指出目前国内研究仍处于理论分析和实验室测试阶段。提出了助力型下肢外骨骼机器人研究的关键技术,并对助力型外骨骼机器人的发展趋势进行了展望。

外骨骼机器人是一类模仿人体生理构造,能被人穿戴、协同穿戴者运动的同时辅助穿戴者的智能机械装置。外骨骼机器人可以提高人们在行走耐久性、负重能力等特定方面的体能。

目前外骨骼机器人的分类方法很多。按照仿生部位分为下肢外骨骼、上肢外骨骼、手掌/手指外骨骼和全身外骨骼。按照机器人运动方式分为作动型机器人和助力型机器人。作动型机

器由机械肢体带动穿戴者运动,是人-机整体做出运动的决策者,通常用于偏瘫、神经损伤患者的医疗康复。助力型机器人自身不会主动做出运动,而是通过感知穿戴者的运动意图来跟随穿戴者,协助穿戴者运动。助力型外骨骼机器人在工作环境上可分为室内型和室外型。室内型外骨骼机器人可以方便地获得持续可靠的电力供应,从而无需集成动力模块。而室外型外骨骼

机器人,多用于灾难现场救援、野外施工及军事用途,在工作环境恶劣、没有电力保障的场地,集成了动力模块的助力型外骨骼机器人可以发挥出其他类型机器人或装置不可替代的重要作用。

作动型与助力型外骨骼机器人的对比见表1。由于助力型外骨骼机器人展现出的特殊性能和应用前景,国内外众多研究机构均已开展该领域的研究工作。

表1 作动型与助力型外骨骼机器人对比

对比项	作动型	助力型/室内	助力型/室外
控制方式	机器人带动穿戴者	机器人感知穿戴者运动意图,跟随穿戴者	
主动关节	与用途相关	全身	全身/下肢
动力源	外部电力	外部电力/电池	电池/发动机等
作动器	电机/气动元件	电机/气动元件	电机/液压/气动
用途	医疗康复等	医疗护理等室内作业	救援/野外施工/军事等

1 国外研究状况

助力型外骨骼机器人的研发探索始于20世纪中期。1965年通用电气公司在美国国防部的支持下,与康奈尔大学合作研发可穿戴式机械样机 Hardiman,设计目标是可使穿戴者举起1500磅(约682 kg)的物体。该项目只完成了一只自重约750 kg、能够举起约341 kg重量的机械手臂,之后无相关报道。

近20年来,得益于高性能微处理

器、以永磁材料研发为基础的无刷永磁电机、各类传感器等一系列新技术、新元件的发展,助力型外骨骼机器人的研发不断取得成功。美国加州大学伯克利分校的BLEEX样机、日本筑波大学的HAL样机、美国洛马公司的HULC样机和Raytheon公司的XOS样机是国外机构研发的助力型下肢外骨骼样机中较为成熟的典范。

美国加州大学伯克利分校是较早

开展外骨骼研究的机构之一。Kazerooni等在美国国防先进研究项目局DARPA的资助下从2000年开展研究,解决了一系列问题,并研发出BLEEX样机。该团队2004—2006年共发表10余篇相关论文^[1-12],分别从仿生学设计^[1,2]、动力源实现方案^[3,4]、控制方法^[5-8]、系统辨识^[9]等角度对BLEEX样机进行了较全面的介绍和展示,样机外形如图1(a)所示。BLEEX样机由发动机作为动力



源,发动机输出轴同时驱动交流发电机和液压齿轮泵,下肢髋关节、膝关节和踝关节共6个关节由液压作动器驱动。控制方式上,BLEEX样机采用动力学模型求逆的方法,通过关节作动器末端的力传感器及机器人肢体运动鞋信息反求人机间作用力,从而得到穿戴者运动意图。该课题组后期也尝试过设计电机驱动关节^[12]。

HAL系列外骨骼机器人由日本筑波大学 Yoshiyuki Sankai 博士领导的科研团队开发,外形见图1(b)。第一代样机 HAL-1 于2000年研制成功,随后该团队与 Cyberdyne 公司合作,2008年 Cyberdyne 将 HAL 样机投入商业生产。该系列外骨骼机器人采用充电电池作为能源,通过皮肤电极获取肌电信号(EMG)判断穿戴者的运动意图,使用电动机作为执行器对上下肢的肩关节、肘关节、髋关节和膝关节进行驱动。该团队发表过的资料也较丰富^[13-20]。目前 HAL 系列外骨骼机器人已发展出多种机型适应不同的应用场合,并已投入商业生产,主要应用于医疗康复、残疾人助力、灾害现场救援等用途。

HULC 样机于2000年在 Berkeley

Robotics and Human Engineering Laboratory 研制成功;2009年后移交佛罗里达 Lockheed Martin Missiles & Fire Control business unit 进行。样机外形见图1(c)。HULC 样机使用两块总质量3.6 kg的锂聚合物电池作为动力源,采用液压作动器对下肢膝关节进行驱动。据新闻媒体报道,该样机已经交付美国军方评估。

美国 Raytheon 公司 XOS 样机最初由依托 University of Utah Research Park 的 Sarcos 公司开发,2007年被 Raytheon 公司收购,外骨骼机器人项目代号也改为 XOS,目前介绍较多的 XOS2 样机是其第2个版本,样机外形见图1(d)。XOS2 样机采用高压液压系统驱动,但并未集成泵源和动力模块,而是采用外部的独立液压泵源提供高压介质的方式驱动机器人运行,液压油箱也设置在机器人外部。

上述各样机的关键方案选择总结见表2。

2 国内研究状况

华东理工大学智能传感测控研究室第一阶段实验平台样机 ELEBOT 于

2008年研制初步完成。外形见图2,相关理论研究见文献[21]~[25]。ELEBOT 设计承载30 kg,以总重9 kg的锂离子电池作为能源载体,通过直流无刷(BLDC)电机驱动液压泵向下肢膝关节处的液压作动器提供液压能源。液压系统工作压力为10 MPa,液压作动器由高速开关阀控制。样机主要传感器包括位于液压作动器末端的力传感器和位于机器人下肢足底的力传感器,前者用于采集作动器输出力,后者采集穿戴者脚底压力。该样机控制系统主要包括控制器电源、定制的 MCU 控制器和传感器信号调理电路。

浙江大学杨灿军教授团队研发了采用气动作动器的下肢外骨骼样机如图3(a)所示,对下肢髋关节和膝关节进行驱动,作动器由高速开关阀控制。控制策略上将穿戴者脚底压力传感器作为输入信号,采用自适应模糊人工神经网络控制的方法计算出外骨骼预期动作^[26,27]。浙江大学欧阳小平团队研发的助力型外骨骼机器人样机如图3(b)所示。样机以户外负重应用为设计目标,集成了主要由小型发动机驱动高速液压泵和小型无刷发电机构成的高



图1 国外研发的助力型下肢外骨骼样机

表2 国外典型样机

研发单位及样机	动力源	作动器	驱动关节	运动意图来源
伯克利 BLEEX	发动机驱动混合动力模块	液压	下肢髋、膝、踝3个关节	下肢机构动力学模型求逆
筑波大学 HAL	电池	电机	上肢和下肢	下肢肌电信号
洛马公司 HULC	电池	液压	下肢膝关节	未公开
雷神公司 XOS	外部提供	液压	上肢和下肢	未公开



图2 华东理工大学ELEBOT样机

功率密度混合动力源,其中高速液压泵用于驱动下肢作动器,而小型无刷发电机用以向控制系统提供电力。外骨骼机器人集成的微控制器实现模拟对机器人肢体进行控制。下肢机构中采用伺服阀控液压缸对髋关节、膝关节进行驱动,系统工作压力10 MPa;踝关节为自由关节,采用球关节保留3个方向的旋转自由度。

哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室研发的外骨骼机器人样机,如图4所示。样机下肢机构通过仿生学分析的方法设计^[28],并采用直流无刷伺服电机对髋关节和膝关节进行驱动^[29]。文献[30]中介绍了该样机的控制方法,控制方法基于下肢外骨骼动力学模型求逆的方法消除穿戴者对外骨骼机器人肢体的作用力;并采用ADAMS对下肢行走过程做出仿真验证。

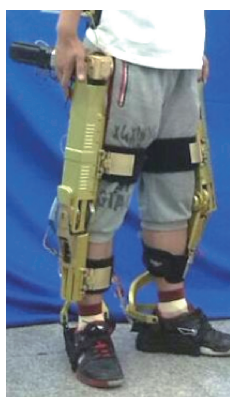


图4 哈尔滨工业大学外骨骼机器人样机

电子科技大学航空航天学院研发的液压驱动下肢外骨骼机器人,如图5(a)所示。机器人样机以直流电机驱动齿轮泵作为液压源,通过溢流阀调压、过滤器过滤后向下肢关节作动器提供液压油;作动器是伺服阀控制的液压缸,对膝关节进行驱动。根据文献[31],机器人对穿戴者运动意图的感知来自穿戴者膝关节角度传感器;文献[32]将人体行走步态分解成5个部分(sub-phase),并提出了一种控制策略,先通过传感器判断穿戴者步态所处的部分,再依此对机器人肢体进行控制。电子科技大学机器人智能研究所研发的PRMI外骨骼机器人样机如图6所示。该样机采用扁平电机与谐波减速器的组合对髋关节和膝关节进行驱动,机器人感知系统则主要由安装在机械肢体上的姿态仪、安装在电机上的编码器 and 布置在机器人鞋底前脚掌、后脚掌的脚底压力传感器构成^[34,35]。

东南大学研发的动力辅助外骨骼机构SPAEX如图6所示。样机采用套索和液压驱动关节,仅在腰部和踝关节处与穿戴者绑定^[36]。样机通过检测人体与机器人肢体间踝关节的位



(a) 气动样机



(b) 液压样机

图3 浙江大学助力型下肢外骨骼样机

置偏差来计算穿戴者的运动意图,使外骨骼机器人做出跟随动作。

新兴东方航空装备公司研发的TG外骨骼样机2014年11月首次出现在珠海航展。该样机相关资料和介绍较少,外形如图7所示。样机以电池驱动电机为作动方案,驱动下肢增强穿戴者运动能力。根据新闻媒体介绍,该样机可协助穿戴者背负50 kg负重行走2 h,步行速度1 m/s。

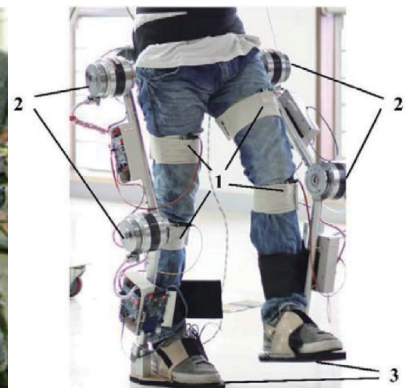
上述样机的动力来源、作动方式选用和驱动关节方案各有不同。现将样机方案总结如表3所示。

国内助力型下肢外骨骼机器人的研究多侧重于运动控制策略,对外骨骼机器人的动力源实现方式、控制器实现形式及性能分析则普遍分析较少。

目前国内几家军工单位也在积极



(a) 液压样机



(b) PRMI样机

图5 电子科技大学下肢外骨骼机器人



投入到外骨骼机器人的研制过程中,并取得了一些成果,由于特殊性的原因,目前还没有相关成果报道。据了解目前这些机构的研究还处于实验室研究阶段,在外骨骼关键技术处理上还没有达到预期要求,尚未获得实际应用。

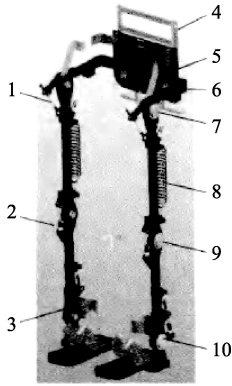


图6 东南大学 SPAEX 机器人样机

3 关键技术

3.1 新型传感元件

外骨骼机器人整体体积较小、设计紧凑,对其采用的元件有很多限制,因而广泛应用于工业环境下的通用元件往往难以满足外骨骼机器人的需求。

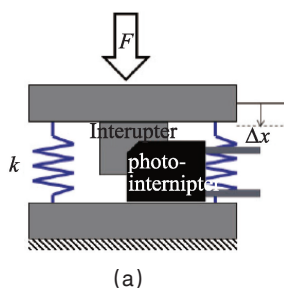


图7 新兴东方航空装备公司 TG 样机

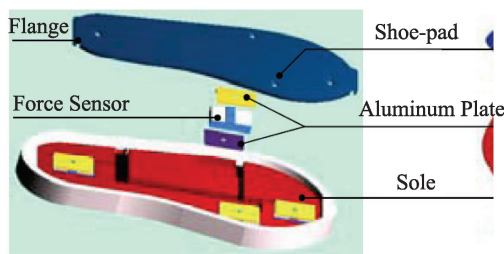
外骨骼机器人系统用到的传感器可分为采集机器人系统自身状态的传感器和采集穿戴者-机器人交互信息的传感器。外骨骼机器人外形和结构复杂,因而通常需要研究者根据实际应用场所设计所需的传感器结构。文献[24]介绍了采用应变片组建的惠更斯电桥作为敏感单元,应用于机器人足底的压力传感器设计;文献[36]介绍了以光学传感元件为敏感单元的微型拉压力传感器,原理见图8(a)。文献[23]和[37](图8(b))分别介绍了采集机器人穿戴者足底压力信息的传感靴设计。文献[38]展示了一种带有传感功能的绑带用以固定穿戴者和外骨骼肢体,绑带上分布有如图8(c)所示的微型敏感元件阵列,敏感元件测量穿戴者施加在绑带上的接触压力计算运动意图。

表3 国内样机采用的关键方案

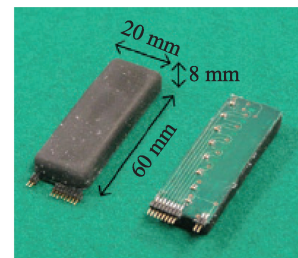
研发单位及样机	动力	作动器	驱动关节	运动意图来源
华东理工大学 ELEBOT	锂电池	液压	膝关节	足底力、作动器力传感器
浙江大学气动样机	外部提供	气动	髌/膝关节	足底力传感器
浙江大学液压样机	小型发动机	液压	髌/膝关节	足底力/人体关节角度传感器
哈尔滨工业大学外骨骼机器人	—	无刷电机	髌/膝关节	下肢机构动力学模型求逆
电子科技大学样机	48V DC 动力源	液压/电机/减速器	髌/膝关节	膝关节角度传感器/下肢姿态仪/编码器/足底力传感器
东南大学 SPAEX	—	液压、套索	髌/膝关节	踝关节人机位置误差传感器
新兴东方航空装备公司 TG 样机	电池	液压	膝关节	—



(a)



(b)



(c)

图8 新型传感元件

3.2 新型执行元件

新型作动器的研究关注作动器的阻抗特性、响应速度、安全性等问题。文献[39]介绍了近期广泛采用的串联弹性转动作动器(RSEA)的控制方式,该类型作动器在关节的驱动电机与机械结构之间添加一个弹簧,通过测量弹簧形变可以得到作动器的输出扭矩从

而实现关节的扭矩控制和阻抗控制。文献[40]介绍了采用电机、带轮实现的刚度可变的作动器,如图9(a);文献[41]介绍了以调节串联弹簧在关节处作用力臂长度的方式实现的变刚度作动器,如图9(b)。文献[29]介绍了一种并联-串联结构作动器,如图9(c),作动器集成的弹性单元可以在运动周期内存储

和释放能量。文献[42]介绍了一种采用气动人工肌肉实现的外骨骼机器人作动器,见图9(d),并对其频率响应、阻抗等特性进行了详细的测试。

3.3 高功率密度动力源

动力源的实现是助力型下肢外骨骼机器人的关键难点之一。室内应用的助力型外骨骼机器人可以方便地得

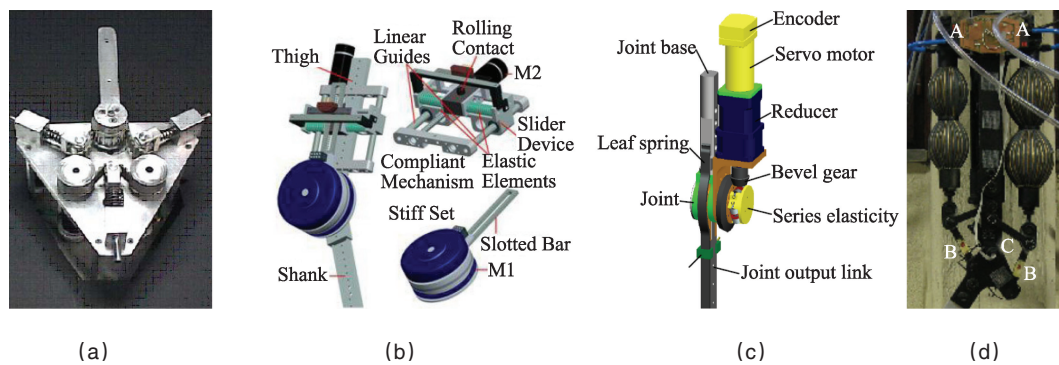


图9 新型作动器

到电力能源供应而无需集成动力源,但电力供应的可靠性和稳定性应得到足够重视。室外应用的助力型外骨骼机器人受到应用环境的限制通常难以获得外部能源供应,能否实现可靠、高密度、长续航时间的集成动力源是机器人样机能否实现的核心问题之一。

较早对外骨骼机器人集成动力模块产生重视而开展的研究是伯克利分校在BLEEX样机研发过程中提出的以发动机为动力源的混合动力模块^[3],模块构成外形如图10(a)所示。在BLEEX样机动力模块相关的文献^[4]中,作者通过Ragone图展示了通过计算对比多种典型的小型发动机的Ragone曲线选择了外骨骼机器人动力源的最优型号,为一台用于航模飞机的小型双缸汽油发动机,发动机输出轴同时驱动一台齿轮泵和一部交流发电机。

浙江大学研发的高功率密度动力模块如图10(b),该模块采用小型单缸汽油发动机驱动小型高速柱塞泵,为

外骨骼液压系统提供约1.6 kW 动力,发动机同时驱动小型永磁无刷电机产生约100 W 电力。

值得注意的是,许多其他类型机器人也有集成动力模块、向机器人系统提供动力的需求。美国波士顿动力公司研发的大狗(BigDog)四足仿生机器人集成了15马力的水冷两冲程内燃机驱动液压泵作为动力源^[43];美国航空航天局主持研发的双足人形机器人Valkyrie集成了1.8 kW·h、重约14 kg的电池,在没有外部电力供应的情况下向机器人提供能源,维持约1 h的工作时间^[44]。这些相关机器人的动力模块实现形式和相关技术值得外骨骼机器人设计者参考学习。

Logan等^[45]从质量和功率的角度对比了电池和发动机-发电机作为移动机器人或小型车辆动力源的方案,结论中指出当动力模块需要的电池质量大于2.7 kg时,发动机-发电机方案的性能总是优于电池提供的性能。

除电池和发动机以外,也有学者探索过可作为外骨骼机器人潜在能源的其他方案,如采用燃料电池为外骨骼机器人提供电力的方案^[46]、采用自由活塞发动机驱动液压系统的方案^[47]、采用自由流体活塞发动机实现的压缩机向气动系统提供动力的方案^[48]。但目前条件

下这些方案技术不成熟,没有得到实际应用。

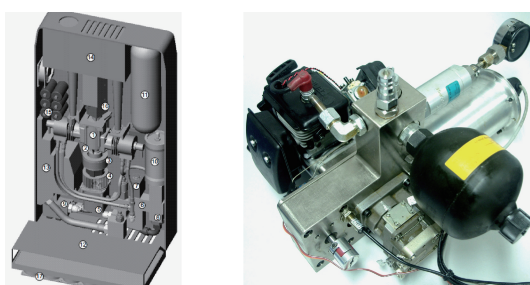
3.4 机器人肢体控制策略

机器人肢体控制策略主要包含两个问题,即机器人肢体预期做出何种动作,和机器人肢体如何完成预期动作。前者涉及到外骨骼机器人集成的各路传感器信息融合处理,进而实现穿戴者运动意图的获取,以及机器人肢体运动模式的选取(关节位置控制,力控制等);后者则包含了下肢机构动力学分析、控制器软硬件设计等课题。

文献^[49]中,作者利用膝关节驱动装置展开研究,将膝关节机械结构与人体之间的耦合关系建模为图11(a)所示的串联阻抗,并实现人体与机械下肢小腿部分整体的等效质量和等效阻尼控制。文献^[50]将人体与外骨骼机械肢体之间的相互作用抽象建模成虚拟阻抗,如图11(b),并根据阻抗模型采用动力学补偿的方式控制机械肢体的运动。文献^[51]介绍了一种被动下肢外骨骼实验装置如图11(c),用来获得穿戴者步态信息、人机交互力、体能负载等信息,作为人机交互特性的数据支持。文献^[52]提出一种非绑定的助力型下肢外骨骼机器人,通过在穿戴者肢体上捆绑若干惯性测量单元(IMU)感知穿戴者的运动,并跟随穿戴者的动作。

3.5 机器人噪声控制

来自外骨骼机器人动力系统的发动机、电动机、液压泵,以及来自下肢作动器的电动机等元件都会产生不同程度的噪声和振动,不仅大幅降低穿戴者舒适性、影响外骨骼机器人的工作环



(a) BLEEX样机动力模块

(b) 浙江大学外骨骼动力模块

图10 基于发动机的外骨骼动力模块样机

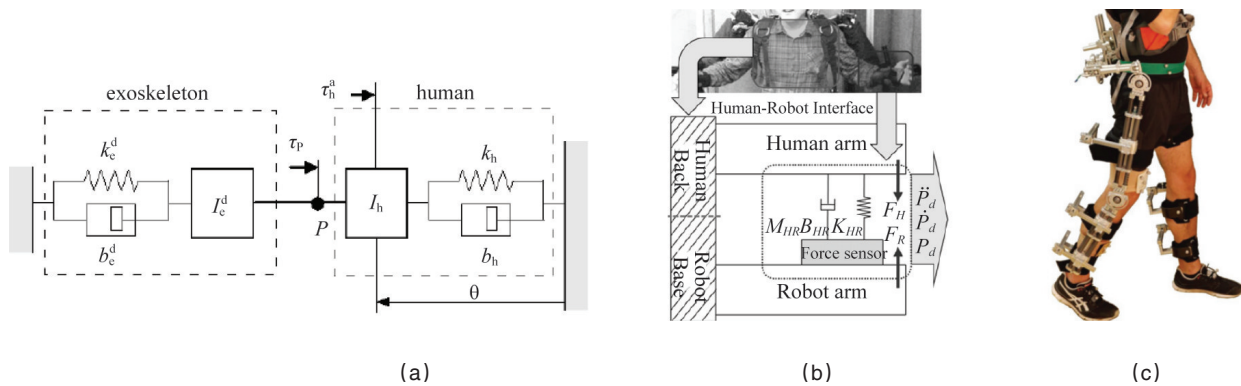


图 11 外骨骼机器人肢体控制研究

境,也对外骨骼机器人的传感器、作动器等关键元件寿命造成损害。

外骨骼机器人噪声振动的控制,主要通过隔离消除机械振动和屏蔽噪声两个途径实现。在伯克利混合动力模块中,定制消音器消除发动机特定频率的噪声;发动机外围用两层钣金件外壳包围,钣金外壳两侧装有弹性阻尼吸声材料,最终发动机噪声降至 87 dBA 的水平^[4]。

4 展望

尽管国内外机构对外骨骼机器人的研究取得了很好的成果,还需在以下几个方面继续开展研究,以便进一步提高外骨骼机器人的实用性。

4.1 新型材料应用

当前外骨骼样机通常用金属材料实现机械结构;无论采用传统的钢材还是较为轻便的铝合金材料,外骨骼样机的自重仍难以达到实用中可接受的程度。而外骨骼机器人自重过大,会带来有效载荷和承载效率低下、等效惯性大、响应速度慢等问题,在实际应用中如果发生误动作、跌倒等故障,更会对穿戴者带来很大的危险。因此外骨骼机器人选用轻量化材料是其投入实际应用之前必须解决的问题。采用钛合金材料新型高分子材料、高强度碳纤维材料等制造外骨骼机器人机械结构、液压系统阀块和作动器都可以大幅提高强度-质量比,是未来外骨骼机器人样机候选的解决方案。

4.2 高功率密度动力模块

目前外骨骼机器人采用的集成动力源方案主要有发动机动力源和蓄电池动力源。两种方案各有优点和不足。

以蓄电池为动力源、采用直流无刷电机驱动下肢关节的方案被多数外骨骼样机所采用,这种方案具有工程实现简单、易控制、噪声小等优点;但当前技术条件下的蓄电池功率密度和能量密度都有待提高,采用蓄电池为能源的样机通常持续工作时间短、输出功率较低。此外,蓄电池充电速度往往远小于其放电速度,采用蓄电池的动力模块能源补充效率也是设计者要解决的问题。

以发动机驱动液压泵的方案实现的动力模块,可为外骨骼机器人提供较大的功率和相对较长的持续工作时间,在燃料耗尽时可以快速补充燃料继续运行,但该方案必须解决发动机的噪声、振动、散热等工程问题,同时发动机与电机相比更难以控制,发动机启动时需要较大的扭矩,其启动方式往往成为限制发动机应用的关键因素。

4.3 实际应用测试

国内外研究单位对助力型下肢外骨骼机器人样机获得的相关数据大部分在实验室环境下得到,但实验室测试环境与样机的实际工作状态有较大差别,如环境温度、地面材质、地形地貌、外骨骼承载情况、工作周期等。目前缺少广泛认可的实际应用环境中外骨骼机器人自身性能、外骨骼对穿戴者的协助效率等方面的评估方式和指标。随

着助力型下肢外骨骼机器人样机逐渐完善和趋于实用,来自应用现场的机器人性能数据和行为特征,以及来自穿戴者的体验报告将为研究人员提供重要的反馈信息。

4.4 安全性问题

助力型外骨骼机器人在工作时与穿戴者直接捆绑接触,常常背负较大质量,作用力远大于穿戴者;如果外骨骼机器人在工作中发生故障将严重威胁到穿戴者的安全。因此助力型外骨骼机器人的安全性是硬件、软件设计中不可忽视的问题。外骨骼机器人的安全性研究往往被忽略。由于多数样机并未进入整机测试阶段,现有试验数据无法开展故障分析,因此在如何保证外骨骼机器人安全性的问题上国内外并没有统一的认识和措施。

实现外骨骼机器人安全性的研究,可以从故障预防和故障应急措施两方面展开。外骨骼机器人的故障预防需要实现机器人自身的故障检测,同时对传感器、控制回路等关键元件和子系统进行冗余设计。故障的应急措施需要从设计阶段入手,研究如何设计安全的控制策略和机械结构,一方面在故障发生时外骨骼机器人做出尽可能保证穿戴者安全的应急动作;另一方面可以使穿戴者尽可能快速和安全的与外骨骼机器人脱离。

5 结论

当前国内助力型下肢外骨骼机器

人仍处于样机试验测试和完善阶段。在未来的外骨骼机器人物理样机研究工作中,需要在高功率密度动力源、机

器人安全性、承载工况下动力学特性、人机耦合运动控制策略、多传感器信息融合等方面不断提高技术水平。相信

在科技工作者的努力下,会成功研制出高性能、高可靠性、应用广泛的助力型外骨骼机器人。

参考文献(References)

- [1] Zoss A B, Kazerooni H, Chu A. Biomechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex)[J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2006, 11(2): 128-138.
- [2] Chu A, Kazerooni H, Zoss A. On the biomimetic design of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex)[C]//*Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005: 4345-4352.*
- [3] Amundson K, Raade J, Harding N, et al. Hybrid hydraulic-electric power unit for field and service robots[C]//*Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2005: 3453-3458.*
- [4] Amundson K, Raade J, Harding N, et al. Development of hybrid hydraulic-electric power units for field and service robots[J]. *Advanced Robotics*, 2006, 20(9): 1015-1034.
- [5] Kazerooni H, Racine J-L, Huang L, et al. On the control of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex)[C]//*Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005: 4353-4360.*
- [6] 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.
- [7] Steger R, Kim S H, Kazerooni H. Control scheme and networked control architecture for the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex)[C]//*Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006: 3469-3476.*
- [8] Ghan J, Steger R, Kazerooni H. Control and system identification for the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex)[J]. *Advanced Robotics*, 2006, 20(9): 989-1014.
- [9] Ghan J, Kazerooni H. System identification for the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex)[C]//*Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006: 3477-3484.*
- [10] Kazerooni H. Exoskeletons for human power augmentation[C]//*Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2005: 3459-3464.*
- [11] Kim S, Anwar G, Kazerooni H. High-speed communication network for controls with the application on the exoskeleton[C]//*American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004. IEEE, 2004: 355-360.*
- [12] Zoss A, Kazerooni H. Design of an electrically actuated lower extremity exoskeleton[J]. *Advanced Robotics*, 2006, 20(9): 967-988.
- [13] Kasaoka K, Sankai Y. Predictive control estimating operator's intention for stepping-up motion by exo-skeleton type power assist system hal[C]//*Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2001: 1578-1583.*
- [14] Lee S, Sankai Y. Power assist control for walking aid with hal-3 based on emg and impedance adjustment around knee joint[C]//*Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2002: 1499-1504.*
- [15] Kawamoto H, Kanbe S, Sankai Y. Power assist method for hal-3 estimating operator's intention based on motion information[C]//*Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003. The 12th IEEE International Workshop on. IEEE, 2003: 67-72.*
- [16] Kawamoto H, Lee S, Kanbe S, et al. Power assist method for hal-3 using emg-based feedback controller[C]//*Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on. IEEE, 2003: 1648-1653.*
- [17] Hayashi T, Kawamoto H, Sankai Y. Control method of robot suit hal working as operator's muscle using biological and dynamical information[C]//*Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2005: 3063-3068.*
- [18] Kawamoto H, Sankai Y. Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for hal[J]. *Advanced Robotics*, 2005, 19(7): 717-734.
- [19] Suzuki K, Mito G, Kawamoto H, et al. Intention-based walking support for paraplegia patients with robot suit hal[J]. *Advanced Robotics*, 2007, 21(12): 1441-1469.
- [20] Tsukahara A, Kawanishi R, Hasegawa Y, et al. Sit-to-stand and stand-to-sit transfer support for complete paraplegic patients with robot suit hal[J]. *Advanced robotics*, 2010, 24(11): 1615-1638.
- [21] Cao H, Yin Y, Ling Z, et al. Walk-aided system with wearable lower extremity exoskeleton for brain-machine engineering[C]//*Advances in Cognitive Neurodynamics ICCN 2007. Springer, 2008: 849-855.*
- [22] Cao H, Ling Z, Zhu J, et al. Design frame of a leg exoskeleton for load-carrying augmentation[C]//*Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009 IEEE International Conference on. IEEE, 2009: 426-431.*
- [23] 曹恒, 贺成坤, 孟宪伟, 等. 下肢外骨骼服传感靴的结构优化分析[J]. *工程设计学报*, 2010, 17(1): 35-39.
- [24] 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.
- [25] 方明周, 王瑜, 朱钧, 等. 负重型下肢外骨骼机器人机构研究与仿真[J]. *华东理工大学学报: 自然科学版*, 2014, 40(4): 112-115.
- [26] Can-Jun Y, Bin N, Ying C. Adaptive neuro-fuzzy control based development of a wearable exoskeleton leg for human walking power augmentation[C]//*Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2005: 467-472.*
- [27] 牛彬. 可穿戴式的双足步行外骨骼控制机理研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学系, 2006.
- [28] Zhu Y, Cui J, Zhao J. Biomimetic design and biomechanical simulation of a 15-dof lower extremity exoskeleton[C]//*Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 1119-1124.*
- [29] Zhu Y, Yang J, Jin H, et al. Design and evaluation of a parallel-series elastic actuator for lower limb exoskeletons[C]//*Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014: 1335-1340.*
- [30] Zhu Y, Zhang G, Zhang C, et al. Biomechanical modeling and load-carrying simulation of lower limb exoskeleton[J]. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 2015, 26(Suppl 1): 729-738.
- [31] Guo Q, Zhang X, Jiang D, et al. Hydraulic pressure control system simulation and performance test of lower extremity exoskeleton[M]//*Social Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 612-620.*
- [32] Guo Q, Jiang D. Method for Walking Gait Identification in a Lower Extremity Exoskeleton based on C4. 5 Decision Tree Algorithm[J]. *Int J Adv Robot Syst*, 2015, 12: 30.



- [33] Huang R, Cheng H, Zheng H, et al. Study on master-slave control strategy of lower extremity exoskeleton robot[C]//Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress on. IEEE, 2014: 985-991.
- [34] Duong M K, Cheng H, Tran H T, et al. Minimizing Human-Exoskeleton Interaction Force Using Compensation for Dynamic Uncertainty Error with Adaptive RBF Network[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015: 1-21.
- [35] 贾山, 路新亮, 韩亚丽, 等. 在摆动相中用于下肢外骨骼跟踪人体踝关节轨迹的方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 87-92.
- [36] Gu G M, Lee D, Kim J. Development of a low cost force sensor for wearable robotic systems[C]//Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 1450-1455.
- [37] Yu H, Wang D H, Yang C J, et al. A walking monitoring shoe system for simultaneous plantar-force measurement and gait-phase detection[C]//Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2010: 207-212.
- [38] Lenzi T, Vitiello N, Rossi S M M D, et al. Measuring human-robot interaction on wearable robots: A distributed approach[J]. Mechatronics, 2011, 21(6): 1123-1131.
- [39] Kong K, Bae J, Tomizuka M. Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human-robot interaction applications[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2009, 14(1): 105-118.
- [40] Toniatti G, Schiavi R, Bicchi A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction[C]//Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005: 526-531.
- [41] Cestari M, Sanz-Merodio D, Arevalo J C, et al. Ares, a variable stiffness actuator with embedded force sensor for the atlas exoskeleton[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2014, 41(6): 518-526.
- [42] Beyl P, Van Damme M, Van Ham R, et al. Pleated pneumatic artificial muscle-based actuator system as a torque source for compliant lower limb exoskeletons[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2014, 19(3): 1046-1056.
- [43] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot[C]//Proceedings of the 17th IFAC World Congress. COEX, South Korea: International Federation of Automatic Control, 2008: 10823-10825.
- [44] Radford N A, Strawser P, Hambuchen K, et al. Valkyrie: Nasa's first bipedal humanoid robot[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(3): 397-419.
- [45] Logan D G, Pentzer J, Brennan S N, et al. Comparing batteries to generators as power sources for use with mobile robotics[J]. Journal of Power Sources, 2012, 212: 130-138.
- [46] Thangavelautham J, Gallardo D, Strawser D, et al. Hybrid fuel cells power for long duration robot missions in field environments [C]//14th International Conference on Climbing and Walking Robots. Paris, France: World Scientific Publishing, 2011.
- [47] Raade J W, Kazerooni H. Analysis and design of a novel hydraulic power source for mobile robots[J]. Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, 2005, 2(3): 226-232.
- [48] Kumar N, Hofacker M, Barth E. Design and control of a free-liquid-piston engine compressor for compact robot power[J]. Vanderbilt Undergraduate Research Journal, 2013, 9(2013).
- [49] Aguirre-Ollinger G, Colgate J E, Peshkin M, et al. Active-impedance control of a lower-limb assistive exoskeleton[C]//Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on. IEEE, 2007: 188-195.
- [50] Lee H, Lee B, Kim W, et al. Human-robot cooperative control based on phri (physical human-robot interaction) of exoskeleton robot for a human upper extremity[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(6): 985-992.
- [51] Bartenbach V, Wyss D, Seuret D, et al. A lower limb exoskeleton research platform to investigate human-robot interaction[C]//Rehabilitation Robotics (ICORR), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 600-605.
- [52] Wang M, Wu X, Liu D, et al. A human motion prediction algorithm for non-binding lower extremity exoskeleton[C]//Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 369-374.

Status and prospects of the lower extremity exoskeleton robots for human power augmentation

OUYANG Xiaoping, FAN Boqian, DING Shuo

State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract The lower extremity exoskeleton used for human power augmentation is an intelligent robotic device that imitates the movement of the wearer to improve his capacity of load-carrying, walking speed and duration. Therefore it is an important tool in rescuing, field manipulating and military applications. In this paper, the state-of-the-art prototype development at home and abroad is analyzed, which reveals that the domestic research is still in the theoretical analysis and laboratory test stage. A review on the key techniques of the lower extremity exoskeletons is presented. Some developing trends are stated at the end of this paper.

Keywords exoskeleton; wearable robots; human power augmentation

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2013FZA4004); 浙江省重点科技创新团队(2013TD01)

作者简介: 欧阳小平, 副教授, 研究方向为外骨骼机器人、航空液压系统、电液控制, 电子信箱: ouyangxp@zju.edu.cn

(责任编辑 刘志远)