

人体外骨骼服技术综述

张向刚 秦开宇 石宇亮

(电子科技大学 成都 611731)

摘要 人体外骨骼系统是一种穿戴在操作者身体外部的,融入了先进控制、信息、机械等技术的人机电系统,最终实现了力量的增强和感官的延伸。其研究将大大促进机器人技术、认知科学、医学等学科的发展,在抢险救灾、家庭护理等诸多方面具有广阔的应用前景,因此具有重要的科学理论意义和应用价值。首先介绍了人体外骨骼系统在国内外的发展和研究现状,然后简介了其基本功能结构和工作原理,接着阐述了实现外骨骼系统所涉及的主要关键技术,包括:仿生机械结构、人机接口、随动控制、驱动机构和能源系统技术等,并介绍了一些相关的新兴研究方向。

关键词 人体外骨骼,人机耦合

中图分类号 TP242.6

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.001

Review of Human Exoskeleton Suit Technology

ZHANG Xiang-gang QIN Kai-yu SHI Yu-liang

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract The human exoskeleton suit is an automatic electro-mechanical system, which is worn on the wearer's body to augment human strength and endurance, and extend human's capabilities. Human exoskeleton suit is a complex integrated combination of mechanics, computer technology, control technology, micro-drive technology, materials technology and other disciplines. It can be widely used in the healthcare, medical care, rehabilitation of stroke patients, outdoor sports, emergency situations, disaster relief, and so on. Many significant scientific achievements and applications can be derived from the researches on it. This paper provided a review of the history and the latest developments of human exoskeletons suit. Then the overview of the architecture and working principle were introduced, and this paper ended with a discussion of technological challenges and future research directions which are critical to the field of exoskeletons.

Keywords Human exoskeleton, Human-machine coupling

1 概述

外骨骼(Exoskeleton)这一名词来源于生物学中昆虫和壳类动物的坚硬外壳,外骨骼主要为昆虫和壳类动物提供了防护和支撑功能。人体机械外骨骼系统是一种穿戴在操作者身体外部的,融入了先进控制、信息、通信等技术的人机电系统,在为操作者提供了诸如保护、身体支撑等功能的基础上,通过融入传感、控制、信息耦合、移动计算等先进技术,为穿戴者提供了额外的动力或能力,增强了人体机能,能够在操作者的控制下完成一定的功能和任务。使人机融合为具有机器的力量和人的智力的超智能体,实现力量的增强和感官的延伸。

人体外骨骼服是人体与机器的完美结合。穿戴者和外骨骼成为了一个闭环的协同系统。机器能感受到穿戴者的运动状态和运动意图,实现人机多自由度、全运动过程的实时同步和功能辅助;同时人也能体验到机器的工作状态和运动辅助。这涉及到人体运动科学、传感与控制技术、机械工程等多学科、多领域的基础研究和工程技术。

围绕人体外骨骼系统的各种研究,吸引了全球研究者的

目光,包括神奈川理工学院(KIT)、筑波大学(Tsukuba)、加州大学伯克利分校(Berkeley)、麻省理工学院(MIT)、南洋理工大学等等。根据不同的划分标准,外骨骼系统可进行不同的分类。根据辅助人体部位,可分为上肢外骨骼、下肢外骨骼、全身外骨骼和某个关节外骨骼等。根据执行机构的不同,可分为电机驱动、液压驱动、气动驱动和被动辅助等。根据用途和功能,可以分为通过外骨骼技术,以提高身体机能的力量增强型外骨骼;以及通过外骨骼技术,补偿人体功能缺陷或不足的辅助型外骨骼,主要用于医疗保健和康复服务。

人体外骨骼系统在抢险救灾、探测越野、康复医疗、家庭护理等诸多方面具有广阔的应用前景,而且其技术的研究将促进人工智能、机器人技术、认知科学、医学、辅助医疗等学科的发展,因此具有重要的科学理论意义和应用价值。

本文首先简述人体外骨骼系统技术,然后介绍国内外的研究现状,之后介绍了外骨骼系统的组成和基本工作原理,最后阐述了关键技术和面临的挑战,以及该领域的一些新兴的发展方向。

到稿日期:2014-09-30 返修日期:2015-01-13 本文受中央高校基本科研业务费、康复训练下肢外骨骼机器人关键技术的研究资助。

张向刚(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向为人机耦合技术,E-mail:csxgzhang@uestc.edu.cn;秦开宇(1967-),男,博士,教授,主要研究方向为航天测控技术,E-mail:kyqin@uestc.edu.cn。

2 国内外研究现状

人类很早就开始了外骨骼系统的研究。早期的研究包括:1890年,Yagn在专利中设计的一个装置来辅助人类的行走^[1],如图1所示;1971年,美国通用电气设计的Hardman,它包含了30多个动力关节,能举起1500磅的重量^[2],如图2所示。

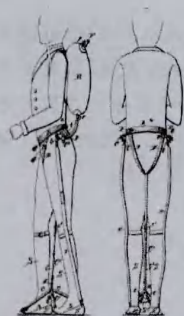


图1 Yagn的外骨骼



图2 通用电气的Hardman

自20世纪末以来,由于电子技术、控制技术、传感技术等相关技术的成熟,对于外骨骼系统的研究得到了全球研究者的广泛关注,形成了新一轮的研究热潮。

Raytheon公司的XOS是一款全身外骨骼系统,能帮助穿戴者轻易地举起200磅重物几百次,完成穿戴者无法独立完成的工作,同时又能减少紧张和疲劳。XOS由结构、传感器、执行器和控制器和高压液压几大系统组成^[3],如图3所示。

加州大学Berkeley分校的下肢外骨骼(BLEEX)是自供电的外骨骼,能够增强穿戴者的力量和耐力,使穿戴者能够背负更重的东西。其组成包括两个拟人的腿、一个电源单元、一个背包状框和动力机构等。BLEEX可以让人轻松地蹲下、弯腰、走路和上下斜坡,其控制系统采用灵敏度放大控制和位置控制相结合的控制策略。所有的电子单元通过一个全身的局域网络连接到一起^[4,5],如图4所示。



图3 Raytheon公司的XOS

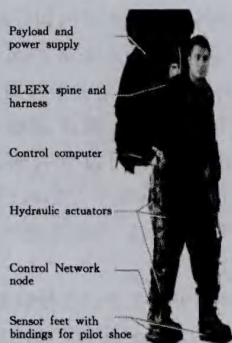


图4 Berkeley的BLEEX

MIT的外骨骼系统能够支持背部负荷的重量。其通过传感器采集膝关节角度和地面骨骼肌的力信息,在髌部和膝盖部位采用基于状态机的控制策略,把重量直接传输到地面。根据研究者的报告,原型系统能够减轻穿戴者80磅负荷的80%,但它会对人体的正常步态产生一定影响^[6-8],如图5所示。

Yobotics的RoboKnee是一种助力膝盖装置,它是一个单自由度的外骨骼,根据膝关节角度和地面反作用力推导出穿戴者的意图,通过补偿力矩来减轻肌肉的负担。RoboKnee允许穿戴者背负相当重量时上楼梯和较大角度地弯曲膝

盖^[9],如图6所示。



图5 MIT外骨骼



图6 Yobotics的RoboKnee

瑞士Hocoma AG公司的Lokomat是一种步态矫正器,且能够自动调整步态,满足患者步态轨迹在跑步机上变化的实时性要求^[10],如图7所示。

在日本,神奈川理工学院(KIT)设计的“可穿戴动力服装”能用来帮助护士照料体重较大或根本无法行走的病人,并防止背部损伤,它由肩部、胳膊、背部、腰部和腿部单元构成。胳膊、肩、腰和腿有气泵驱动的气动执行机构^[11],如图8所示。

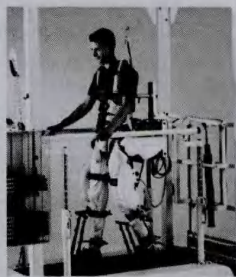


图7 机器人矫正器Lokomat



图8 KIT的骨骼服

日本筑波大学(Tsukuba)的HAL(Hybrid Assistive Leg)是目前比较成功的可以同时用于能量辅助和残疾人行走辅助的外骨骼。通过布置在人体表面的传感器捕获生物信号,并采用一定的校正算法来关联生物信号的强弱和关节力矩,控制器根据生物信号控制伺服电机。著名的有HAL-3型和HAL-5型,HAL-3型只有腿部功能,HAL-5型是一种包含了胳膊、腿和躯干的全身外骨骼,它能为穿戴者提供大约5倍的搬运能力^[12,13],如图9所示。

在南洋理工大学的骨骼服中,控制算法主要包括两个部分:腿部轨迹控制和ZMP控制,通过关节编码器、脚底传感器等计算获得腿部运动轨迹和ZMP,以此来进行外骨骼的运动控制和稳定性控制^[14],如图10所示。

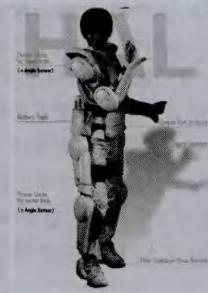


图9 Tsukuba的HAL



图10 南洋理工大学的骨骼服

此外还有韩国西江大学的外骨骼,其目的是帮助老年人和体弱行走不便的人群扩大运动范围和活动能力。此装置由两部分组成:外骨骼和手推车,电池、动力系统、控制设备等较重的部分都安装在手推车中。通过MFE信号计算关节力

矩,通过模糊算法来实现传感信号的融合和控制^[15],如图 11 所示。

以色列的 Argo 医疗技术公司推出的 reWalk 是一种帮助下肢功能障碍者行走、站立和上下楼梯的外骨骼系统。其结构包括轻量可穿戴的支撑结构、执行电机、传感系统、计算机控制系统和电源系统。其控制算法通过对上身运动进行分析,来触发和维持步态和其他操作,如爬楼梯和姿态转换等。穿用者也使用拐杖来获得稳定性和安全性^[16,17],如图 12 所示。



图 11 西江大学的外骨骼



图 12 Argo 的 reWalk

Honda 的行走辅助设备能够在人行走、上下楼梯和半蹲伏时帮助支撑体重,以减少用户双腿上的负载,从而减少疲劳和劳累。其结构包括电机、电池、控制系统、传感器和结构支架,总重量为 6.5kg,单次充电工作 2 小时^[18],如图 13 所示。

RUPERT 是为病人和治疗师设计的,在家中或诊所使用的低成本、安全的上肢外骨骼设备,在肩、肘和手腕配备气动驱动,从而驱动手臂在 3 维空间中的移动。重量轻和便携性使其便于为患者的日常生活相关运动提供治疗服务或辅助,以保持患者上肢的运动感觉,促进脑功能重塑^[19],如图 14 所示。



图 13 Honda 的行走辅助设备



图 14 RUPERT

ARMin 是一个适用于日常行为训练的手臂外骨骼,具有 6 个自由度的结构,具有低惯量、低摩擦、可反向驱动的特性。为了实现患者协同控制策略,其机械结构、执行器和力和位置传感器等都进行了相应的优化^[20],如图 15 所示。

浙江大学关于外骨骼的研究包括:①可穿戴式下肢辅助行走外骨骼机构,采用气动驱动方式。其利用前脚掌和后脚跟处的足底压力信号作为步态综合层的输入信号去触发驱动器的相应动作^[21],如图 16 所示。②基于肌电信号控制的康复医疗下肢外骨骼,采用电机驱动方式,髋关节和膝关节各一个自由度,自主式运动^[22]。③悬挂式下肢协助康复外骨骼,用于辅助脑中风和脊椎损伤患者恢复下肢步行能力,采用电机驱动方式,两个旋转运动副布置在下肢膝关节和膝关节,所有旋转副内都采用轴承,使转动平稳^[23]。④踝关节外骨骼原型系统,帮助踝关节进行康复训练,采用电机驱动,可完成踝关节 3 自由度的被动运动^[24]。

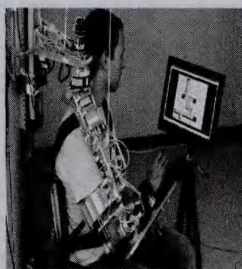


图 15 ARMin

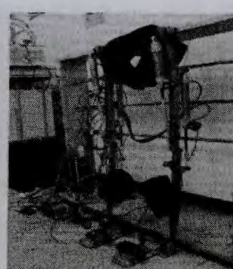


图 16 浙江大学的外骨骼

哈尔滨工业大学的外骨骼是分别针对上肢和下肢的康复训练所设计的。一是针对下肢残疾患者的助力机器腿的研究^[25];第二个研究方向是一款面向偏瘫患者的外骨骼^[26],提出了基于表面肌电信号(Surface EMG, sEMG)和关节力矩的进阶交互式康复训练策略。其能够满足不同患者、不同患侧、不同训练阶段的需要,如图 17 所示。

海航院研制了有动力驱动的外骨骼助力腿样机,该样机将所有的驱动装置、控制器、电源等全部放在了骨骼服的躯干上,骨骼服腿上设计了柔性的拉索装置和气弹簧。通过脚底安装的压力传感器判断人腿的运动模式^[27,28],如图 18 所示。

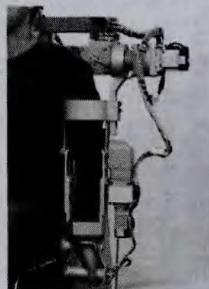


图 17 哈工大的外骨骼



图 18 海航院的外骨骼

电子科技大学研制的基于电机驱动和液压驱动的助力型外骨骼系统能够实现行走、转体、下蹲等动作,并通过多通道智能人机交互技术和分布式实时控制技术大幅提升样机性能的稳定和可靠性^[29,30],如图 19 所示。

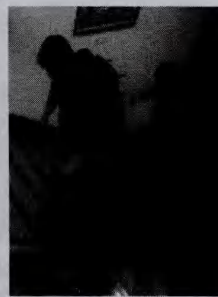


图 19 电子科技大学的外骨骼

3 结构与原理

人体外骨骼服的基本结构如图 20 所示,主要包括机械框架、感知系统、控制系统、通信计算系统、执行机构和能源动力 6 大部件。①仿形机械结构装置:采用仿生技术和优化机械结构,如:机械耦合设计技术,保持人机运动重心的自适应平衡;在髋部、膝部等关节处采用承载设计,实现高负荷承载平衡传递,增强穿戴者的承载能力;②智能感知系统:通过多传感器感知和数据融合技术等感知穿戴者的运动姿态和生理状

态等,同时预测穿戴者的运动意图;③控制系统:针对穿戴者的动作需求,通过多功能传感与随动控制技术实现外骨骼的多自由度、助力随动的目标;④通信计算系统:为各系统提供开放的、模块化的计算和通信处理平台;⑤执行机构:执行机构需要根据各关节动力学,综合应用电机、液压等驱动方式,实现高功率小型化的驱动助力;⑥能源系统:能源系统是各系统所需的能源。通过轻量化和智能化的技术,实现能源自主供给和能源高效使用,综合考虑低功耗技术、能源回收技术、安全性等,并尝试使用新能源。

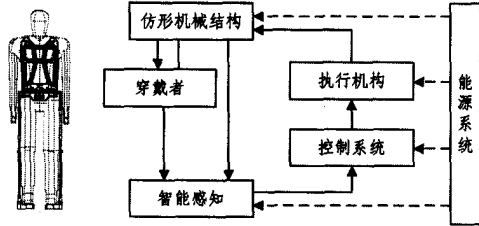


图 20 人体外骨骼系统的基本组成

其工作原理一般为:根据仿生学和动力学原理,设计机械结构,系统通过在人体和外骨骼系统中安放各种传感设备,如在足底、膝关节、背部和人体皮肤等位置上分别安放压力、角度、加速度和生理信号传感器等,实时感知人体和刚肢体的运动信息、力信息和生理信息,进行滤波和融合处理,并实时传输给嵌入式计算处理器。计算处理器综合各传感器信息,并通过相应的感知和预测算法,感知人体姿态、运动趋势和人机耦合度等。控制系统综合各种信息,将之转换为控制参数,采用人机耦合智能控制等方法,驱动执行器装置动作,实时跟踪人体运动并为人体运动提供高效合适的助力,并满足人机耦合协同运动的柔顺性要求,将人和机器整合成为完整的“人机耦合系统”。

4 关键技术

人体外骨骼服是集多学科于一体的国际性前沿课题,涉及到的技术涵盖人体生物力学、机电一体化、智能控制技术、高效能源、计算技术、传感器信息融合、信号处理等前沿学科。其设计和实现过程中主要需要解决如下关键技术。

4.1 仿生机械结构技术

机械结构的设计需要满足轻质、坚韧、舒适和承力的要求。轻质和坚韧要求机械结构既要重量轻,减少穿戴上后的人体负担,又必须能提供足够的支撑功能。轻质和坚韧的实现需要研究新型轻质高强多功能一体化复合材料,具体涉及到新型结构功能一体化复合材料的宏观结构研究,新型复合材料在热、力载荷作用下的本构关系和综合性能评估,新型复合材料在热、力载荷作用下的细观失效机理及疲劳强度研究等关键技术。新型材料应具有综合力学性能优异、可设计性强、一次整体成型等优点,满足结构自身轻量化、弹性等要求。

舒适性不仅是穿戴上后人体静止时的感觉,更重要的是最小化运动过程中的约束感;且能够应用于不同的身高和体型。对于室外使用的外骨骼系统,还需要其具有便携性;针对医疗和护理的外骨骼,还要考虑针对特殊人群的易穿戴和舒适性的特殊要求。舒适性要求需要充分研究人体仿生学、心理学和系统功能、应用场合等角度,综合考虑结构尺寸、自由度设计和增加人机接触缓冲装置等,要求根据人体结构和关节自由度来设计外骨骼的机械结构和自由度。此外,为了防

止外骨骼在控制系统故障时对操作者造成伤害,机械结构应该具有应急保护机制。

承力要求在不同运动姿态的情况下,外骨骼系统中的机械承载机构不仅要有适宜的支撑力,还要尽量维持运动过程中人机系统的重心平衡,支撑人体多自由度上的运动能力。承力需要研究运动学、动力学和力传递,分析各部位承受的载荷大小及方向,确立其力的传递。

机械结构的研究应将应用仿真、优化理论分析与测试试验相结合,如图 21 所示。在人群样本的数据积累基础上确定功能修正量、心里修正量,完善最佳功能尺寸。建立部件间的耦合关系,将助力系统各部件耦合为一个整体运动模型,分析各骨骼间的相应联系,建立整体的数学模型,并研究各部件承载与运动的特征关系,同时进行强度、刚度分析研究,以满足轻量化设计要求。通过实验方法与理论分析结果进行对比、优化。

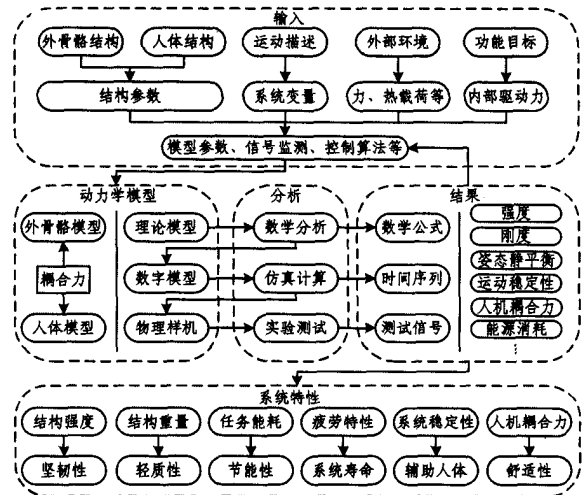


图 21 机械结构的研究模型

4.2 人机接口技术

实现人机协同工作的基础和前提是机器能够准确地了解穿戴者的运动和运动趋势,因此人机接口系统在外骨骼系统中扮演了一个重要的关键角色。它的功能可以归纳为 4 点:信息获取、数据传输、格式转换和语义理解。数据流可以是单向的,也可以是双向的。如果只是感知的要求,则只需要单向的数据流向;如果需要人机协同,则需要双向的数据流动。

人体结构是多关节、多自由度的链接,仅通过单一的传感设备无法分析人体的整体运动状态,人机接口系统需要综合运用大量的传感器,包括:惯性传感器、肌电传感器、薄膜传感器和光纤传感器等,建立多人机交互通道,使人机以自然、并行的方式进行人机交互,采集人运动过程中的力、位移、速度、加速度、倾角和生物电信号等信息,实现外骨骼系统对外界环境和穿戴者的灵敏精确感知。

为实现人机交互的自然性和高效性,需要综合利用人体运动规律、信号处理、多传感器数据融合处理、人工智能等技术。不仅要解决有噪、时变、非线性状态下的噪声干扰抑制和特征信号提取,也要基于物理模型、推理特征技术和知识模型等的智能技术实现数据融合和智能人机状态的感知和预测。

此外,新兴的脑机接口技术在穿戴者意识和外骨骼间建立直接的数据连接通路,穿戴者可以通过意识直接控制外骨骼,或外骨骼能直接感受穿戴者的运动意图,将为外骨骼系统

的人机交互提供全新的方式。其尤对神经传导障碍的患者具有重要的意义。

人机接口的原理示意图如图 22 所示。通过人机接口设备(包括:压力、加速度、触觉和生理传感器等,以及键盘、语音等输入输出设备)获取人、外骨骼服和环境的信息,通过体域网络的相互传送,再通过多传感器感知、数据融合技术和智能预测等技术复现人体整体的运动姿态,实时预测穿戴者的运动意图,最终形成 5 类信息:运动意图的预测信息、运动姿态的感知信息、生理状态的感知信息、机器状态的感知信息和环境的感知信息,并实时传输给嵌入式控制器,为控制系统和执行机构提供控制依据。

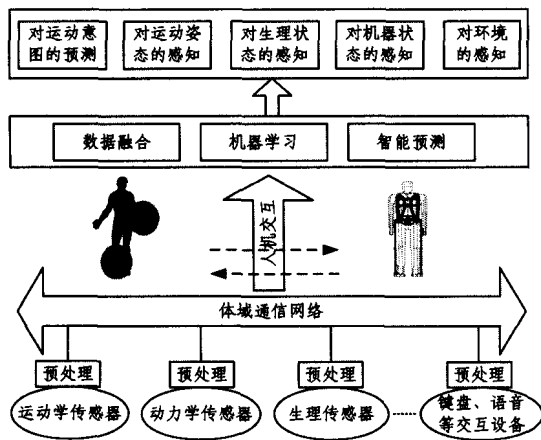


图 22 新兴的脑机接口技术原理示意图

人机接口的三大特点表现为:自然、并行和透明。自然是指人机之间的信息流动以接近于人习惯的方式进行;并行是指信息流动的双向性和各部分的的同时性;透明是指人机之间的信息交互不会对人和机的主要工作造成注意力的干扰。

4.3 随动控制技术

人体外骨骼服作为一种人机协同体,其控制系统需要完成的目标是:控制执行机构,使外骨骼同步于人体运动,或按照穿戴者的意图进行运动,并实时地给予恰当的助力;同时不能影响人体运动的自由和舒适性,并能自动适应不同的人群和环境,具有较高的鲁棒性。

对于不同的应用背景,需要采用不同的控制策略。如对于肢体没有运动能力患者的康复训练,需要采用程序规划的轨迹位置控制,而对于健康人群的骨骼服助力控制则需要控制系统跟踪或同步于人体运动或运动意图。

人体外骨骼服的一大特点是人和机成为了紧密的联合体,人的智慧不仅在控制决策层扮演了重要角色,人对自身肢体的控制也深深地影响了机器的控制过程。因此控制系统应该研究人在整个控制系统的作用,建立人和机器的任务合理分工;应该充分考虑人在控制环中对整个控制的影响,建立全新的人机协同控制理论。

人体外骨骼服控制的另一个特点是人体运动的随意性和环境的多样性。为实现精确同步、实时辅助的功能,控制系统要能根据设定的参数和轨迹进行控制,并需要能够运用机器学习等智能技术实现随动的智能控制,最终实现根据应用、环境和人体的实际需求,以人机协调一致完成任务为目的,解决控制的精确性、实时性、柔顺性、自适应性和智能性等问题。

其控制原理如图 23 所示。通过测量系统和计算,可以获得人机耦合关节运动力学和运动学模型;通过控制率的设计

和优化,实现对执行机构的实时随动控制;为了实现穿戴者与外骨骼服之间的高度人机耦合,需要进行人机耦合条件下参数自适应控制方法。

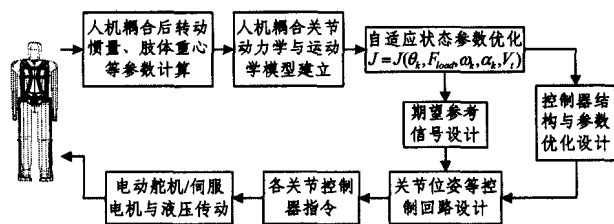


图 23 人体外骨骼服控制原理图

4.4 驱动机构技术

很多外骨骼服需要在户外长期使用,所以要求驱动机构效率高、体积小、重量轻、功耗低;同时为满足精确随动控制的要求,驱动机构应该响应快、惯性小、精度高;与人共处对其散热性和安全性也提出了较高的要求。

人体外骨骼服的驱动机构可采用液压、电动和气动 3 种技术途径。气动驱动的特点是气体的压缩性大,因而精度较低,在实现高速、高精度控制时存在困难。其优点是结构简单,成本价格较低。电动驱动的特点是利用各种电机产生力矩和力,其控制精度高,反应灵敏,可实现高精度的控制,适合于中小负载。电机驱动包括:直流电机、交流电机、步进电机和超声电机等。每种电机具有各自的工作原理、优势和不足。液压驱动的特点在于液体的不可压缩性,刚度,控制精度较高,容易获得较大的扭矩,功率大,通过流量控制可无级调速。

外骨骼系统的驱动技术需要根据各关节动力学情况,全面综合应用各种驱动方式,攻克高功率小型化的动力系统、伺服单元、驱动系统的高速高密度伺服控制等关键技术。

此外,人体骨骼服的驱动机构除了不断改进现有设备的能量体积比、输出最大功率、控制特性等指标外,新型驱动装置的研究也成为了解决外骨骼服驱动机构技术的重要途径。如:人造肌肉执行机构将会出现在新一代的机械外骨骼机器人的手臂上,实现通过人类意识控制人造肌肉的收缩和舒张来驱动外骨骼的运动。

4.5 高效能源及能源管理技术

能源一直是制约便携式设备的一个瓶颈。人体外骨骼服要求能源系统长效、轻便、高能、可靠和安全。

能源系统一方面需要研究常规电池或燃料电池的特性,设计续航时间长、质量功率比高、安全性能符合要求的专用动力输出能源,为动力、信号采集和控制机构提供能源;另一方面需要综合考虑低功耗技术、节能控制和能源回收技术等,通过智能化能源管理实现能源的高效管理和使用,如在液压驱动中采用泵阀联合控制,减少在溢流阀等原件上的能量消耗;也可以利用脚跟与地面碰撞进行部分的能源回收等。

结束语 人体外骨骼服是高度人机耦合的智能化的人机系统,其研究不仅具有广阔的应用价值,而且具有重要的学术研究价值。当前国内外研究机构掀起了人体外骨骼服技术的研究热潮,相关的原型和产品如雨后春笋,相关技术得到了广泛的研究。但仍然存在大量的技术挑战,实用化的产品寥寥无几,其关键缺陷在于人机协同无法很好地得到解决,即人机耦合技术有待突破。本文介绍了部分国内外的相关工作,然后介绍了外骨骼系统的基本结构、工作原理和关键技术,旨在为广大研究者提供参考。

参考文献

- [1] Yagn N. Apparatus for facilitating walking US420179A. 1890/01/28[OL]. <http://pdfpiw.uspto.gov/.piw?Docid=00420179>
- [2] Fick B R, Makinson J B, Hardman I prototype for machine augmentation of human strength and endurance[R]. Tech. Rep. S-71-1056, General Electric Company, Schenectady, NY, GE 1971
- [3] <http://www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479/>
- [4] Kazerooni H, Racine J-L, Huang Li-hua, et al. On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton(BLEEX)[C]// International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April 2005
- [5] Kazerooni H, Steger R, Huang Li-hua. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(5/6): 561-573
- [6] Walsh C J, Pasch K, Herr H. An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation[C]// IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS). Beijing, China, 2006: 1410-1415
- [7] Walsh C J, Paluska D, Pasch K, et al. Development of a light-weight, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation[C]// IEEE Int. Conf. Robot. Autom. . Orlando, FL, 2006, 2006: 3485-3491
- [8] Walsh C J, Endo K, Herr H. Quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation[J]. Int. J. Hum. Robot. , 1996, 4(3): 487-506
- [9] Pratt J E, Krupp B T, Morse C J, et al. The RoboKnee: An exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking[C]// IEEE Int. Conf. Robot. Autom. . New Orleans, LA, 2004: 2430-2435
- [10] <http://www.hocomma.com/en/products/lokomat/>
- [11] Yamamoto K, Hyodo K, Ishii M, et al. Development of power assisting suit for assisting nurse labor[J]. JSME Int. J. , Ser. C, 2002, 45(3): 703-711
- [12] Kawamoto H, Sankai Y. Power assist system HAL-3 for gait disorder person[C]// Int. Conf. Comput. Helping People Special Needs(ICCHP) (Lecture Notes on Computer Science). Berlin, 2002, 2398: 196-203
- [13] 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
- [14] Liu Xiao-peng, Low K H. Development and Preliminary Study of the NTU Lower Extremity Exoskeleton[C]// Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Singapore, 1-3 December, 2004
- [15] Kong Kyoungchul, Jeon Doyoung. Fuzzy Control of a New Tendon-Driven Exoskeletal Power Assistive Device[C]// Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM2005). United States, July 2005: 146-151
- [16] Bogue R. Exoskeletons and robotic prosthetics; a review of recent developments[J]. Industrial Robot; An International Journal, 2009, 36(5): 421-427
- [17] <http://www.argomedtec.com/products.asp>
- [18] <http://corporate.honda.com/innovation/walk-assist>
- [19] Sugar T G, He Ji-ping, Koenen E J, et al. Design and Control of RUPERT[J]. A Device for Robotic Upper Extremity Repetitive Therapy Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 15(3): 336-346
- [20] Nef T, Mihelj M, Colombo G, et al. ARMin-robot for rehabilitation of the upper extremities[C]// 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2006: 3152- 3157
- [21] 牛彬. 可穿戴式下肢步行外骨骼控制机理研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
Niu Bin. Study on the Design and Control of a Wearable Exoskeleton Leg for Human's Walking Power Augmentation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006
- [22] 费烨赞. 基于肌电信号的康复医疗下肢设计及研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
Fei Ye-yun. Design and Study of Lower Artificial Limb Exoskeleton Based on the Control of EMG for Rehabilitation Rhysic[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006
- [23] 张杰. 脑卒中瘫痪下肢外骨骼康复机器人的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007
Zhang Jie. Study on the Exoskeleton Leg for training paraplegic patients[D]. Hongzhou: Zhejiang University, 2007
- [24] 张煜. 踝关节康复医疗外骨骼系统开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010
Zhang Yi. Development and Research of Ankle-foot Rehabilitation Exoskeleton Orthosis[D]. Hongzhou: Zhejiang University, 2010
- [25] 薛渊, 吕广明. 下肢康复助行机构本体设计及运动学分析[J]. 机械设计与制造, 2006(5): 131-133
Xue Yuan, Lv Guang-ming. A design of the aid walking mechanism for legs rehabilitation and dynamics analysis[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2006(5): 131-133
- [26] 李庆玲. 基于 sEMG 信号的外骨骼式机器人上肢康复系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009
Li Qing-ling. Study on sEMG based Exoskeletal Robot for upper Limbs Rehabilitation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
- [27] 归丽华, 杨智勇, 顾文锦, 等. 能量辅助骨骼服 NAEIES 的开发[J]. 海军工程学院学报, 2007, 22(4): 467-470
Gui Li-hua, Yang Zhi-yong, Gu Wen-jin, et al. Development of Power Assistance Exoskeleton Suit[J]. Journal of Naval Engineering College, 2007, 22(4): 467-470
- [28] 张远山, 顾文锦, 穆国岩, 等. 下肢拉索式负荷携行系统 2009 20024329. 6[P]. 2010
Zhang Yuan-shan, Gu Wen-jin, Mu Guo-yan, et al. Lower limb cable type load carrying line system; 200920024329. 6[P]. 2010
- [29] Zhang Xiang-gang, Lin Qing-xia, Xiang Zeng-he, et al. Interlligent Perception System and Hydraulic Position Control Simulation of Lower Extremity Exoskeleton Suit[C]// The 3rd IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Science. Chengdu, China, 2013
- [30] Zhang Xiang-gang, Zhao Cao-yuan, Lin Qing-xia, et al. Multi-Channel Fusion Model of Perception System in Lower Extremity Exoskeleton Suits and it's Implementation[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. Atlantis Press, 2013