

能量辅助骨骼服的研究现状及发展趋势

杨智勇¹, 归丽华², 张 静³, 方登建¹

(1. 海军航空工程学院 七系, 山东 烟台 264001; 2. 总后勤部华东军用物资采购局, 上海 200437;

3. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘要:借助外部智能装置提高自身能力是人类不断追求的目标,其表现形式之一为通过穿戴人机同型机器人(骨骼服)以增强人体能力。综合国内外文献发现,当前能量辅助骨骼服的研究已逐渐进入高潮期,但是仍然有许多亟待解决的关键技术,例如人体意图判断、骨骼服机械结构设计、能耗的降低以及穿戴舒适性的提高等。详细阐述了能量辅助骨骼服,特别是下肢能量辅助骨骼服在国内外的研究现状,探讨了骨骼服在结构形式、能源驱动、生物传感等方面的发展方向。

关键词:外骨骼机器人;骨骼服;能量辅助;人机结合

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)05-0041-09

Research Status and Development Trend of Energy-assisted Exoskeleton Suit

YANG Zhiyong¹, GUI Lihua², ZHANG Jing³, FANG Dengjian¹

(1. Department 7, Naval Institute of Aeronautical Engineering, Yantai, Shandong 264001, China;

2. Huadong Military Materials Procurement Agency, The General Logistics Department of PLA, Shanghai 200437, China;

3. Department of Electrical Information Engineering, Naval Institute of Aeronautical Engineering, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: With external intelligent devices to improve the ability of human beings is the constant pursuit of the goal of mankind, its manifestations will be the human-machine robot similar to the structure of the human body, i. e. , the exoskeleton suit worn on the human body to enhance human capacity. References found at home and abroad that this energy-assisted exoskeleton suit has gradually reached a climax period, but still there are many key technologies to be solved, such as the human intent judgment, the mechanical structure design of the exoskeleton suit, the reduction of energy consumption, and the improvement of wearing comfortibleness, etc. The energy-assisted exoskeleton suit was elaborated, especially, the research status of lower limb energy-assisted exoskeleton suit at home and abroad, and the development directions of the exoskeleton suit in the structural style, energy drive and biosensing were also explored.

Key words: exoskeleton robot; exoskeleton suit; energy assistance; man-machine combination

生物学中,外骨骼(exoskeleton)指为生物提供保护和支持的坚硬的外部结构。对无脊椎动物而言,外骨骼具有支撑躯体、保护身体重要器官、提供敏捷运动能力和感知环境的重要作用。外骨骼的诸多优点引起了科学家的极大兴趣,各国学者纷纷从仿生学的角度出发,研究人工外骨骼^[1],外骨骼机器人应运而生,其本质是一种可穿戴机器人。外骨骼机器人融合了传感、控制、驱动、信息融合等技术,可为操作者提供保护和支撑等功能,因此又被称为助力机器人、辅助腿、机械腿、辅助服等^[2]。因这种装置一般为刚性机械机构,并且像衣服一样穿戴于人体外部,起到与人体骨骼一样的支撑负荷作用,因此,又可以形象地称其为骨骼服。

从用途上,骨骼服可以分为两种:一种是以提高正常人负荷能力为目的的能量辅助骨骼服,另一种是辅

收稿日期:2012-05-31

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2010FM009)

作者简介:杨智勇(1977—),男,河南洛阳人,讲师,博士,主要从事智能控制和人机交互系统方面的研究。

E-mail: yzy913@sina.com

助老年人或者残疾人行走或康复训练的康复骨骼服。本文主要讨论能量辅助骨骼服,简称为骨骼服。

骨骼服的出现是运载方式的革新,它适用于崎岖的山地、茂密的丛林等各种机动车辆不适合的地域,可以快速输送大批物资和装备,因此在军事和民用中具有重要地位。骨骼服设计的基本思想是将人的智能与机械的力量相结合,人作为系统的主体主要完成路径规划、决策感知和保持平衡等功能,外骨骼通过传感器感知人体运动意图、跟随或辅助人体运动,并完成承载负荷的功能。

国外在骨骼服方面的研究持续了 40 多年,目前已进入蓬勃发展阶段。而我国在 2004 年后才有涉足,虽然近几年有更多的科研院所开始着手该领域的研究,但是与国际研究水平存在较大差距,因此,希望通过对骨骼服的研究现状和发展趋势的阐述激发更多研究人员的兴趣,加快我国骨骼服技术的发展。

1 骨骼服的研究现状

1.1 国外骨骼服研究发展现状

1.1.1 美国的骨骼服

美国是最早进行骨骼服项目研究的国家。早期大多是对骨骼服的一些概念研究,由于技术不成熟,这些骨骼服均以失败告终。例如:美国的 Yagn 在 1890 年设计的纯机械式骨骼服^[3];1963 年,美国陆军外弹道实验室的 Zaroodny 进行的一项名为“有源矫正辅助器(powered orthopedic supplement)”的工作^[3];二十世纪六七十年代,美国通用电气公司开发测试的一种称为哈迪曼(Hardiman)的全身型外骨骼装置,如图 1 所示^[3-4]。

1) DARPA 的 EHPA 计划

外骨骼能够有效提高单兵作战能力,因而在军事领域具有很大的吸引力。从 2000 年开始,美军国防计划预先研究局(DARPA, defense advanced research projects agency)重新开始了雄心勃勃的骨骼服研制计划,首先就是“增强人体机能的外骨骼”(EHPA, exoskeleton for human performance augmentation)项目^[5],目的是研制新一代的基于外骨骼的单兵作战装置。这套作战外骨骼系统不仅自身具有能源供应装置,提供保护功能,而且集成了大量的作战武器系统和现代化的通信系统、传感系统以及生命维持系统,从而把一个普通的战士武装成一个“超人”。参与 EHPA 项目研制的单位主要有加利福尼亚大学 Berkeley 分校机器人和人体工程实验室、Oak Ridge 国家实验室、盐湖城人体机能研究所、“千年喷气机”公司、SARCOS 公司(目前已经被雷神公司收购)、麻省理工学院等。其中,Berkeley 分校、SARCOS 公司和麻省理工学院展示了实验样机,其他单位则在传感、驱动、人机界面、生物力学、人因、测试等方面进行了分析与实验^[6-7]。

2) 伯克利大学的骨骼服

伯克利大学是最早进行骨骼服样机演示的研究机构,其领导者是 Kazerooni 教授,2004 年,展示了第一个演示样机——伯克利下肢外骨骼(BLEEX, Berkeley lower extremity exoskeleton),如图 2 所示。正是这个样机使大量学者产生了浓厚的兴趣,掀起了骨骼服研究的新高潮。一个 75 kg 的人穿上 BLEEX



图 1 通用公司的哈迪曼

Fig. 1 Hardiman of General Electric Company



图 2 伯克利的 BLEEX

Fig. 2 BLEEX of Berkeley University

后,能背负 34 kg 的背包以 1.3 m/s 的速度轻松行走。BLEEX 解决了外骨骼设计的几个关键技术,包括机械结构、控制策略和能源供给等,可以说,BLEEX 是第一个真正意义上可实际应用的智能化负重携行装置^[4,8-9]。然而,BLEEX 由于结构复杂,能量消耗大,操作者长时间使用很不舒服,因此未获得 DARPA 第二阶段的资助^[10]。

3) 洛克希德-马丁公司的下肢外骨骼(HULC)

BLEEX 虽然未获得进一步的资助,但是 Kazerooni 教授和他的学生成立了伯克利仿生(Berkeley Bionics)公司,争取吸引风险投资并对骨骼服技术进行市场化运作,设计开发了更加轻便、简洁、实用的 HULC(human universal load carrier)^[5-11],如图 3 所示。HULC 被著名的武器承包商洛克希德-马丁公司收购,HULC 质量为 24 kg(不含电池),两块电池质量为 3.6 kg,士兵穿戴上 HULC 之后,能够额外负重 91 kg,是 BLEEX 系统负重能力的 3 倍。电池可供以 5 km/h 的速度连续行走 3 h,速度峰值可达到 16 km/h。可以说 HULC 是最接近实战应用的一款骨骼服,目前正在进行进一步的集成开发,同时进行部队的演示验证实验。

4) 雷神公司的骨骼服^[3,10]

在洛克希德-马丁公司收购 HULC 之后,人们更加坚信骨骼服的前景是光明的,军火巨头雷神公司也不示弱,立即收购了参与 EHPA 项目的 SARCOS 公司,并将其研制的第一代骨骼服更名为 XOS。第一代 XOS-1 就展现了其巨大的能力,例如:可以携带 84 kg 的负荷;操作者可以背负一个人并单腿站立;操作者在背负 68 kg 和手持 23 kg 的负荷时,可以 1.6 m/s 的速度行进;样机可以实现弯腰、下蹲和跪地等动作。2010 年,XOS-2 问世,其能量消耗减少了一半,并且比第一代更强更快,如图 4 所示。虽然 XOS-2 仍然离不开地面供电,但是其能量消耗已经是 XOS-1 的一半,相信随着技术的发展,小型能量模块的问题应该能够解决,骨骼服也将真正迎来其发展的春天。遗憾的是有关 XOS 的各类技术信息至今没有公开^[12]。

5) 麻省理工学院的骨骼服^[3,13-14]

麻省理工学院(MIT,Massachusetts Institute of Technology)在骨骼服的研究上另辟蹊径,主要针对骨骼服能量消耗大的问题,提出了一种与伯克利和 SARCOS 公司完全不同的研究思路,即一种准被动的外骨骼控制概念,并开发了样机,如图 5 所示。虽然在单支撑阶段,骨骼服将负荷的 80%传递到了地面,传递效率较高,但是,MIT 的骨骼服在进行新陈代谢实验时的结果令人失望,同样背负 36 kg 的负荷,使用骨骼服时的新陈代谢比不用骨骼服时增加了 10%,这项指标是人体在使用骨骼服时能量消耗的生物指标,表明人体的能量消耗依然较大。

总之,美国的骨骼服以军事应用为背景,资助力度大,资助范围广,对骨骼服各个方面的研究最为深入,呈现百花齐放的状态。



图 3 洛克希德马丁公司的 HULC

Fig. 3 HULC of Lockheed Martin Company



图 4 雷神公司的骨骼服

Fig. 4 Exoskeleton suit of Raytheon



图 5 麻省理工学院的骨骼服

Fig. 5 MIT's exoskeleton suit

态,研究水平居世界前列。

1.1.2 日本的骨骼服

日本是当仁不让的机器人技术强国,但是,骨骼服的军事意义相当明显,因此,日本主要从骨骼服的民事应用入手,在助残、护理、劳动等应用领域对骨骼服展开了广泛的研究,成绩显著。略去助残骨骼服,介绍如下几款能量辅助骨骼服。

1) 筑波大学的混合辅助腿

日本筑波大学的山海嘉之和他的团队是最早进行骨骼服研究的团队之一,他们从 2000 年就开始相关技术问题的研究,并于 2004 年推出了世界上第一种商业外骨骼机器人“混合辅助腿”(HAL, hybrid assistive leg)。2004 年推出的是 HAL-3, 这款骨骼服仅有下肢助力,2006 年,推出了 HAL-5 型,如图 6 所示。HAL-5 比 HAL-3 更漂亮、更轻便,特别是关节电机更短小,能源供给装置更小巧、使用时间更长(约 160 min),更重要的是增加了上肢能量辅助功能^[15-16]。HAL 使用了生物肌电传感器,但是生物肌电信号使用不便,每次使用必须粘贴到肌肉表面,对粘贴位置有严格要求,而且易受运动影响而易位,或者因汗水出现而影响信号,因此认为其前途较暗淡。虽然 HAL 可以进行能量辅助,但是由于骨骼服在能量辅助领域的市场前景还不明朗,目前,山海教授的主要研究方向是 HAL 的上肢助力及助残应用^[17-18],已经成立了 Cyberdyne 公司来对 HAL 进行市场推广,并在挪威设立了分支机构。

2) 神奈川理工学院的动力辅助服^[19-20]

日本的神奈川理工学院研制的“可穿戴的动力辅助服”(WPS, wearable power suit)可以说是骨骼服中的异类,它的下肢采用独特的气动驱动方式来控制髋关节和膝关节的屈伸运动,气压由安装在每个驱动器上的小气泵供给,从而使得骨骼服上遍布气囊、气管和电缆,使得穿戴者略显滑稽,在此也不得不佩服一下科学家的想象力,如图 7 所示。WPS 的使用对象是医院的护士,帮助她们照料体重较大或根本无法行走的病人,使得女护士的能力倍增,成为医院的亮点。同时,WPS 也尽量在机械结构设计上保证操作者和病人的舒适性,这一点对于其他的骨骼服研究项目具有一定的参考价值。

3) 本田公司的助力机械腿

本田机器人研究院研制了一种代步助力器,这种助力器是在与筑波大学合作开发 HAL-3 的基础上开发的,如图 8 所示。从结构上看,它的机械架与鞋子相连,上部安装有鞍状车座,其双下肢共有 6 个自由度,即每条腿的髋关节、膝关节和踝关节各有 1 个自由度。结构上采用了非拟人设计,并且独一无二地将两条外骨骼腿设计在人体两腿内侧,且无束缚于人体的连接,采用支撑座承受人体自重,膝关节和髋关节为驱动关节。目前该助力器已作为助力产品销售,获得了实际应用。它不仅可以帮助老年人行走,而且可以用于提高某些工种的工作效率。



图 6 筑波大学的 HAL-5

Fig. 6 HAL-5 of University of Tsukuba

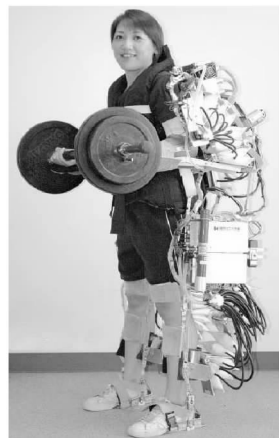


图 7 神奈川理工学院的动力辅助服

Fig. 7 Power-assisted suit of Kanagawa Institute of Technology



图 8 本田公司的骨骼服

Fig. 8 Honda's exoskeleton suit

4) 东京农业大学的骨骼服

日本东京大学农业技术学院的研究人员最近研究出了一个骨骼服系统,如图 9 所示。这种系统可以提供强大的外部力量供用户驱使,可用于改善农民和园丁等人群的工作情况,也就是说这款产品主要是针对农业领域开发的。虽然总重量达到约 20 kg,但它可以支撑自身重量,并依靠配置的 8 个马达和 16 个传感器,帮助佩戴者瞬间增力。该系统目前尚处于研究阶段。

1.1.3 其他骨骼服

1) 汉阳大学的骨骼服

韩国汉阳大学研制的骨骼服采用了多传感器下肢运动信息采集和步态分析系统,用于人体下肢运动信息采集和步态分析,如图 10 所示。该系统包括随动腿系统,数据采集、处理系统和步态分析软件等。该系统能够实时获得随动腿的关节运动信息及测力鞋的压力信息,同时,还能够分析穿戴者在行走、单腿摆动以及坐-立运动状态下的步态特征。此外,在人体下肢运动状态分析方面,提出了一种综合随动腿关节运动信息及测力鞋压力信息的步态分析方法^[21-22]。

2) 新加坡南洋理工大学的骨骼服^[23-24]

NTULEE(Nanyang Technology University lower extremity exoskeleton)是新加坡的南洋理工大学研究和开发的下肢外骨骼。NTULEE 的设计和开发借鉴了机器人控制中的一个重要概念,即零力矩点(ZMP, zero moment point)。NTULEE 在骨骼服的鞋子里面安装两层力传感器,分别测量人和骨骼服的零力矩点,利用人和骨骼服的 ZMP 之间的偏差生成控制信号,控制骨骼服的 ZMP 跟踪人的 ZMP,从而保证骨骼服在行进中的稳定性。但是,NTULEE 采用了内外两个骨骼服框架,内部骨骼服测量人体运动角度,外部骨骼服承担负荷,提供助力,其本质类似于主从控制,设计过于复杂,实用性一般。

3) 俄罗斯的骨骼服研制计划

2009 年 10 月 27 日,俄罗斯国防部第 3 中央研究所宣布,将在 2015 年之前研制出“战士 21”(Boyets · 21)作战服。它能够让步兵携带重物飞奔,而且在电力耗尽时迅速脱下。这种作战服比上一代轻 14 kg。俄国方面没有公布“战士-21”的负重能力,并且没有公开文献。

4) 其他未演示的骨骼服

尚有许多骨骼服的研究项目没有公开演示,相关资料也较少,但有限的资料也有一定的参考价值,比如:意大利 PERCRO 实验室的研究人员采用新型紧凑轻便驱动器来进行骨骼服的设计^[25];日本的 Hokkaido 大学通过分析搬起重物这一动作设计了一款骨骼服,与 HAL 相似采用了 EMG 传感器^[26];日本三重大学针对提升重物这一能量辅助模式进行了骨骼服的控制方法研究^[27];意大利生物机器人研究所设计了一种压力传感鞋垫用于感知人体行走的足底压力信息,可用于骨骼服中进行人体行走模态的判断^[28];美国西北大学研究了一种单自由度骨骼服的负阻尼控制(主动阻抗控制的特殊情况)方法^[29-30];意大利技术学院研究了新型变刚度驱动器并将其应用于类似于骨骼服的人机交互机器人中^[31];悉尼科技大学对单自由度的下肢骨骼服助力系统进行了初步研究^[32]。



图 9 东京农业技术大学的骨骼服

Fig. 9 Exoskeleton suit of Tokyo University of Agricultural Technology



图 10 汉阳大学的骨骼服

Fig. 10 Exoskeleton suit of Hanyang University

1.2 国内骨骼服系统发展现状

国内对于骨骼服研究相对滞后,2004 年之后才有少量文献涉及骨骼服的研究,并且由于经费的限制,大多集中在理论研究方面。

有样机展示的主要有以下几家:

1)浙江大学机械电子控制工程研究所正在进行相关方面的研究工作。他们基于人机耦合的层次式控制框架,采用气动系统设计出一套外骨骼原型试验系统^[33],并且对骨骼服的控制系统进行了详细的设计^[34]。

2)中国科技大学对骨骼服的构型、感知和控制方法等进行了分析,其样机如图 11 所示^[35]。近年来,对骨骼服的传感器感知系统进行了较深入的研究^[36-37]。

3)华东理工大学进行了骨骼服虚拟样机的研究,还研制了实物样机,其原理类似于 HULC,采用液压驱动方式,实现了足底压力感知和关节助力等多种功能,如图 12 所示^[38-39]。

4)海军航空工程学院也是国内最早进行骨骼服研究的院校之一,2006 年就设计完成了第一代骨骼服样机^[40],如图 13 所示。海军航空工程学院的第二代骨骼服样机于 2008 年问世,如图 14 所示。该样机采用了全新的设计思路,大大降低了骨骼服腿部的重量,同时简化了控制方法。2009 年又设计了第三代骨骼服样机,在腰环、传感靴、关节设计、结构设计等方面都有进一步的改进,如图 15 所示;同时,在人体运动分析、传感器设计以及控制方法等领域也展开了较深入的研究^[2,41-43]。

另外,还有很多大学也开始参与骨骼服项目的研究,包括:南京理工大学对外骨骼进行了初步的探讨和研究^[44-45];哈尔滨工程大学对穿戴式下肢康复机器人的建模及控制系统仿真进行了一定的研究^[46];北京工业大学在下肢外骨骼的机构设计与分析方面进行了较深入的研究^[47]。越来越多的院校和科研机构开始涉足骨骼服研究领域。

总体来看,国内在骨骼服研究方面起步较晚,大多处于理论研究阶段,所研究的样机也由于经费投入不足而略显粗糙。因此,加快对骨骼服各项技术的研究,对于提高我国骨骼服研究水平,具有重要意义。

2 能量骨骼服研究发展趋势

鉴于能量辅助骨骼服具有重要的军事和民用价值,研究人员必将会继续加强其实用化的研究。骨骼服的其发展方向为:

1)目前问世的骨骼服大多仅为上肢或下肢^[48-50]助力,因此同时具有上肢和下肢助力的全身型外骨骼是一个重要的研究方向;



图 11 中国科技大学的助力机器人样机
Fig. 11 Power-assisted robot prototype of China University of Science and Technology

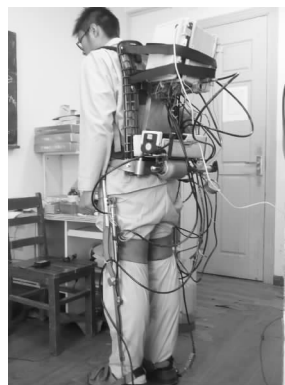


图 12 华东理工大学的骨骼服样机
Fig. 12 Exoskeleton suit prototype of East China University of Science and Technology



图 13 海军航空工程学院的第一代骨骼服样机
Fig. 13 The first generation exoskeleton suit prototype of Naval Institute of Aeronautical Engineering

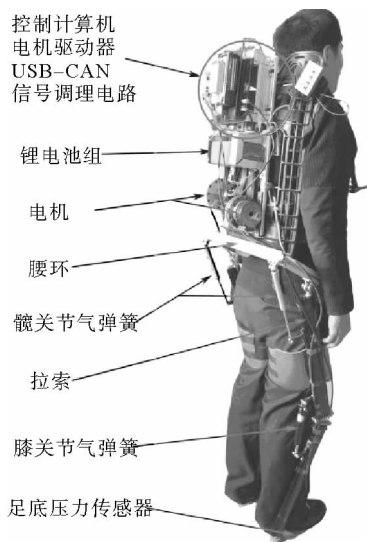


图 14 海军航空工程学院的第二代骨骼服样机

Fig. 14 The second generation exoskeleton suit prototype of Naval Institute of Aeronautical Engineering



图 15 海军航空工程学院的第三代骨骼服样机

Fig. 15 The third generation exoskeleton suit prototype of Naval Institute of Aeronautical Engineering

2) 现有的外骨骼大多只能实现有限的运动形式,甚至在某些情况下会阻碍人体的运动,因此具有更多运动形式(例如跑、跳等)的外骨骼也是一个发展方向;

3) 由于现有的能源,不管是电池还是各种化学燃料,其能量密度不能满足骨骼服的需求,所以更加节能的外骨骼是一个重要的研究方向;

4) 现有的骨骼服采用的大多是传统的驱动方式,例如液压驱动、电机驱动和气压驱动,但是这几种驱动方式都有其固有的缺点,因而,新型的驱动方式是一个重要的研究方向;

5) 研究特种能量辅助骨骼服,例如能飞的外骨骼装置、辅助潜水员运动的外骨骼等;

6) 骨骼服的使用一定不能对人体的运动造成阻碍,因此,研究骨骼服的穿戴舒适性,大力提高其舒适度是骨骼服的研究方向之一;

7) 骨骼服是一个典型的人机耦合系统,研判人体运动意图是该系统的重要组成部分,使用新型超前感受、无缝连接的生物传感器(如脑电信号传感器等)来获取人体运动意图是骨骼服研究的重要方向之一。

3 结束语

能量辅助骨骼服的研究经历了二十世纪六七十年代的第一次研究高潮之后,经过近二十年的沉寂,再到二十一世纪的爆发,说明研发实用的骨骼服来增强人类自身的能力是人类不灭的梦想。然而,事实证明,外骨骼技术是一项涉及到生物力学、人机耦合、自动控制、机械设计、驱动机构设计、传感、能源、通信等多个学科的综合性的技术,人们虽然在许多方面取得了一定的进展,但是仍有很长的路要走。随着科学技术的进步和人们认识的深入,以及令人神往的“超人”梦想,能量辅助骨骼服将得到更加深入而广泛的研究。

参考文献:

[1] 李晓明. 基于外骨骼技术的机器人远程控制[D]. 杭州:浙江大学,2004.
[2] 杨智勇. 单兵负重骨骼服的力控制方法与样机设计[D]. 烟台:海军航空工程学院,2009.
[3] DOLLAR A M, HERR H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(1): 144-158.
[4] KAZEROONI H, STEGER R. The Berkeley lower extremity exoskeleton[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 128(3): 14-25.

- [5] KONTOS G. Exoskeletons for human performance augmentation[EB/OL]. (2007-01-31)[2012-04-25]. http://www.aceize.com/exoskeletons_human_performance_augmentation.
- [6] RICHARDSON B S, JANSEN J F, BIRDWELL J F, et al. Phase I report: DARPA exoskeleton program[R]. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2003/216. Oak Ridge, Tennessee, 2004; 1-8.
- [7] JANSEN J, RICHARDSON B, PIN F, et al. Exoskeleton for soldier enhancement systems feasibility study[R]. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2000/256. Oak Ridge, Tennessee, 2000; 25-30.
- [8] RACINE J L C. Control of a lower extremity exoskeleton for human performance amplification[D]. Berkeley: University of California, 2003.
- [9] STEGER R, KIM S H, KAZEROONI H. Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX)[C]//2006 International Conference on Robotics and Automation. Orlando, Florida, May 15-19, 2006; 3469-3477.
- [10] 孟钊宇. 救援盔甲[J]. 科技新时代, 2008(6): 64-75.
MENG Zhaoyu. Rescue armor[J]. Popular Science, 2008(6): 64-75.
- [11] BEN C. Berkeley Bionics' newest exoskeleton lets wheelchair users walk[EB/OL]. (2010-10-08)[2012-04-25]. <http://www.gizmag.com/berkeley-bionics-elegs-exoskeleton/16599/>.
- [12] TEWSKBURY M. Raytheon unveils lighter, faster, stronger second generation exoskeleton robotic suit[EB/OL]. (2010-09-27)[2012-04-25]. <http://multivu.prnewswire.com/mnr/raytheon/46273/>.
- [13] WALSH C J, ENDO K, HERR H. A quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2007(5): 1-21.
- [14] WALSH C J, PALUSKA D, PASCH K, et al. Development of a lightweight underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation[C]//2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, Florida, May 15-19, 2006; 3485-3491.
- [15] HIROAKI K, SANKAI Y. Power assist method based on phase sequence driven by interaction between human and robot suit[C]//2004 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Kurashiki, Okayama, Japan, Sep. 20-22, 2004; 491-496.
- [16] KAWAMOTO H, KANBE S, SANKAI Y, et al. Power assist method for HAL-3 estimating operator's intention based on motion information[C]//2003 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Millbrae, California, Oct. 31-Nov. 2, 2003; 67-72.
- [17] ATSUSHI T, YASUHISA H, SANKAI Y. Gait Support for complete spinal cord injury patient by synchronized leg-swing with HAL[C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco, Sep. 25-30, 2011; 1737-1742.
- [18] KAWAMOTO H, SHIRAKI T, OTSUKA T, et al. Meal-assistance by robot suit HAL using detection of food position with camera[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Phuket, Thailand, Dec. 7-11, 2011; 889-894.
- [19] 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. Roma, Sep. 22-24, 2004; 661-666.
- [20] YOSHIITSU T, YAMAMOTO K. Development of a power assist suit for nursing work[C]//SCIE 2004 Annual Conference. Sapporo, Japan, Aug. 4-6, 2004; 577-580.
- [21] KIM Y S, LEE J W, LEE S Y, et al. A force reflected exoskeleton-type masterarm for human-robot interaction[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2005, 35(2): 198-212.
- [22] KIM W S, LEE S H, LEE H D, et al. Development of the heavy load transferring task oriented exoskeleton adapted by lower extremity using quasi-active joints[C]//ICROS-SICE International Joint Conference. Fukuoka, Japan, Aug. 18-21, 2009; 1353-1358.
- [23] LIU X P, LOW K H, YU H Y. Development of a lower extremity exoskeleton for human performance enhancement[C]//2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan, Sep. 28-Oct. 1, 2004; 3889-3894.
- [24] LOW K H, LIU X P, GOH C H, et al. Locomotive control of a wearable lower exoskeleton for walking enhancement[J]. Journal of Vibration and Control, 2006, 12(12): 1311-1316.
- [25] BERGAMASCO M, SALSEDO F, MARCHESECHI S, et al. A novel compact and lightweight actuator for wearable robots

- [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, May 3-8, 2010; 4197-4203.
- [26] NARUSE K, KAWAI S, KUKICHI T. Three-dimensional lifting-up motion analysis for wearable power assist device of lower back support[C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Alberta, Aug. 2-6, 2005; 2959-2964.
- [27] RAHMAN S M M, IKEURA R, HAYAKAWA S, et al. Design and control of a power assist system for lifting objects based on human operator's weight perception and load force characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3141-3150.
- [28] DE ROSSI S M M, LENZI T, VITIELLO N, et al. Development of an in-shoe pressure-sensitive device for gait analysis [C]//33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, Boston, Massachusetts, 2011; 5637-5640.
- [29] COLGATE J E, PESHKIN M A, GOSWAMI A, et al. A 1-DOF assistive exoskeleton with virtual negative damping: Effects on the kinematic response of the lower limbs[C]//2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, Oct. 29-Nov. 2, 2007; 1938-1944.
- [30] COLGATE J E, PESHKIN M A, GOSWAMI A, et al. Active-impedance control of a lower-limb assistive exoskeleton[C]//2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, Noordwijk, The Netherlands, June 13-15, 2007; 188-195.
- [31] TSAGARAKIS N G, VANDERBORGHT B, CALDWELL D G. A novel actuator with adjustable stiffness (AwAs)[C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Oct. 18-22, 2010; 4201-4206.
- [32] COLGATE J E, PESHKIN M A, GOSWAMI A. Inertia compensation control of a one-degree-of-freedom exoskeleton for lower-limb assistance: Initial experiments[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2012, 20(1): 68-77.
- [33] 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.
- [34] 刘志娟. 多自由度下肢外骨骼控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [35] 陈峰. 可穿戴型助力机器人技术研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007.
- [36] 田双太. 一种可穿戴机器人的多传感器感知系统研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2011.
- [37] 姚俊章. 助力机器人传感器信号倍频算法与腕关节并联机构控制系统研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2011.
- [38] 雷兵. 协行助力机械腿结构优化及性能评估系统研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [39] CAO H, YIN Y H, LING Z Y. Walk-aided system with wearable lower extremity exoskeleton for brain-machine engineering[C]//International Conference on Cognitive Neurodynamics, Shanghai, Nov. 17-21, 2007; 849-855.
- [40] 归丽华, 杨智勇, 顾文锦, 等. 能量辅助骨骼服 NAEIES 的开发[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(4): 467-470.
GUI Lihua, YANG Zhiyong, GU Wenjin, et al. Development of power assistance exoskeleton suit (NAEIES)[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(4): 467-470.
- [41] 杨智勇, 归丽华, 杨秀霞, 等. 骨骼服神经网络灵敏度放大控制方法研究[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(3): 824-829.
YANG Zhiyong, GUI Lihua, YANG Xiuxia, et al. Exoskeleton suit neural network sensitivity amplification control technique[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(3): 824-829.
- [42] 归丽华. 单兵负重骨骼服的控制方法研究及系统结构设计[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2011.
- [43] 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.
LIU Minghui, GU Wenjin, CHEN Zhanfu. Virtual body model's modeling and simulation based on exoskeleton[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(2): 157-161.
- [44] 赵彦峻. 人体下肢外骨骼工作机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [45] ZHAO Y J, XU CHENG, LUO Y F, et al. Design modeling and simulation of the human lower extremity[C]//2008 Chinese Control and Decision Conference, Yantai, July 2-4, 2008; 3251-3255.
- [46] 赵豫玉. 穿戴式下肢康复机器人的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [47] 尹军茂. 穿戴式下肢外骨骼机构分析与设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [48] 王岚, 王婷, 张立勋, 等. 助力机器腿仿真研究[J]. 机械设计, 2006, 23(9): 12-15.
WANG Lan, WANG Ting, ZHANG Lixun, et al. Simulation research of assist robot leg[J]. Mechanical Design, 2006, 23(9): 12-15.
- [49] WANG L, DENG Z Q, ZHANG L X, et al. Analysis of assistant robotic leg on MATLAB[C]//2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, June 25-28, 2006; 1092-1096.
- [50] CHEN J Z, LIAO W H. Design and control of a magnetorheological actuator for leg exoskeleton[C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Sanya, Dec. 15-18, 2007; 1388-1393.