



智能机电技术丛书

可穿戴下肢外骨骼

人机协同设计与

实验研究

任彬 著



上海科学技术出版社

智能机电技术丛书

可穿戴下肢外骨骼 人机协同设计与实验研究

任 彬 著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书以可穿戴下肢外骨骼为研究对象,系统介绍了下肢外骨骼系统建模和基于人体数据采集的外骨骼传感系统,通过遗传算法的步态轨迹规划、自适应迭代的单腿协同、RBF神经网络的步态预测,对可穿戴外骨骼进行人机协同与实验设计,并研发了一套可穿戴下肢外骨骼设备。

本书内容涉及机械工程、医学工程、国防科技等领域,可供机械、军事、医疗康复、建筑施工等专业的科研开发和工程技术人员参考,也可作为高等院校或科研院所从事机器人、控制系统等方面研究的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

可穿戴下肢外骨骼人机协同设计与实验研究 / 任彬著. —上海:上海科学技术出版社,2020.4

(智能机电技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4795 - 4

I. ①可… II. ①任… III. ①人体—下肢骨—人—机系统—设计—研究 IV. ①R322.7②TB18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 033308 号

可穿戴下肢外骨骼人机协同设计与实验研究

任 彬 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11 插页 8

字数: 200 千字

2020 年 4 月第 1 版 2020 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4795 - 4/TH · 85

定价: 85.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

我国人口老龄化问题日益严重。截至 2018 年年底,我国 60 岁以上的老龄人口已接近 2.5 亿,约占总人口的 17%;上海已成为我国人口老龄化程度较高的城市之一。2016 年,国务院发布的《关于加快发展康复辅助器具产业的若干意见》指出,我国是世界上康复辅助器具需求人数最多、市场潜力最大的国家,康复辅助器具产业是“健康中国”的重要组成部分。民政部、上海市人民政府签署的《共同建设国家现代民政示范区合作协议》提到,积极推进具有中国特色和上海特点上海地区康复辅助器具产业综合创新示范工作,推进“健康上海”建设。

在工程中,机械外骨骼或称动力外骨骼,是一种由人造框架所构成的、可由人员穿戴的某种机器装备,通过这个装备提供给穿戴者额外的力量、速度或其他能力。下肢外骨骼可以帮助行动能力减弱的老年人及肢体残障患者,恢复行为能力或辅助其进行康复训练。下肢外骨骼也可以显著提高肢体健全穿戴者的力量、耐力水平,增加其工作效率。人机协同的下肢外骨骼甚至可以完成人力所无法完成的高危或繁重的作业,其在诸如抢险救灾、搜索失踪人员,以及物资救援、建筑施工、地质科考等方面都有广泛的应用前景。

另外,为提升单兵战斗能力,世界各国都在努力利用高新技术武装士兵,提高本国军队的单兵作战能力。但在不断提升单兵防护性、火力及信息化能力的同时,士兵的负荷量也不可避免地大幅增加。而可穿戴下肢外骨骼便是理想的解决方案,它可以替士兵负担额外的重量,携带更多防护装备和弹药补给,延长有效作战时间。

国外对于外骨骼机器人的研究经历了很长的时间,美国陆军外弹道实

实验室于1963年发表的相关研究报告,详细阐述了他们从1951年开始进行的一项名为“有源矫正辅助器”的工作,较为全面地阐述了有源外骨骼机器人装置的工程设计问题。国内对于外骨骼机器人的研究开展得相对较晚,2004年后才有少量文献涉及。目前,浙江大学、中国科技大学、华东理工大学、中国人民解放军海军航空大学等多所高校及科研单位都已经开展了有关外骨骼机器人的研究,并取得了一定的成果。

本书围绕下肢外骨骼系统建模做了以下研究:建立下肢肌肉-骨骼模型,利用肌肉控制算法,对所建立的人体下肢模型进行步行状态采集,得到人体运动所需的肌肉力、能量消耗等生理学曲线;构造人体-外骨骼机器人耦合模型,对该模型进行运动学与动力学仿真,得到耦合模型的人体生理学曲线,对比人体下肢肌肉-骨骼模型的仿真结果,可判别人机耦合程度。仿真结果可作为可穿戴下肢外骨骼实验设计和样机开发的基础。与国内外同类专著相比,本书侧重介绍人机交互理论、实验设计及可穿戴下肢外骨骼的自主研发。

本书在外骨骼系统建模的基础上,重点开展人机协同的实验设计与控制算法研究,具体包括以下几个方面:

(1) 从解剖学角度出发,分析了人体下肢结构及其运动特性。基于“完全拟人化”的设计思想,提出了基于混联机构的20个自由度的下肢外骨骼模型。其中,盆骨为6个自由度;对单腿而言,髋关节和踝关节分别为3个自由度、膝关节为1个自由度。此外,分析了混联下肢外骨骼模型在髋关节处的人机运动匹配问题。

(2) 将复杂的混联下肢外骨骼模型简化为矢状面的单腿模型进行分析。基于拉格朗日法建立了下肢外骨骼单腿支撑相、摆动相的动力学模型及物理型人机交互模型。采用自适应迭代学习控制方法,实现了下肢外骨骼的人机协同运动,并分析了人机交互力矩对人机协同控制误差的影响。

(3) 采用模型分块逼近的RBF神经网络策略,对穿戴者下一步态周期的步态运动进行预测。结合步态采集实验结果,对步态预测的效果进行了评估。

(4) 基于光学运动测量系统,设计了步态捕捉实验,获取了多种步态模式下的下肢各关节角度数据,为混联下肢外骨骼的人机运动匹配、矢状面内

下肢外骨骼单腿协同运动控制,以及髋关节步态预测等工作奠定了实验基础。

本书在介绍了下肢外骨骼系统建模、人体传感数据采集、人机协同控制算法等理论研究的基础上,展示了上海大学自主研发的可穿戴下肢外骨骼样机,该样机参展上海“第21届中国国际工业博览会”,获得了广泛关注和一致好评。

本书是作者多年来在人机交互机械领域的研究成果,也是上海大学医工结合一流学科方向建设的核心研究内容之一。本书是在控制理论的基础上,对人机交互领域的深入探讨。本书的研究工作得到了国家自然科学基金面上项目(51775325)、上海市高水平地方高校试点建设医工结合项目、上海市高校高峰高原学科建设计划、上海东方学者计划(QD2016033)、香港香江学者计划(XJ2013015)的联合资助。本书的编写参考了国内外相关著作,在此致以诚挚的谢意。感谢上海大学机电工程与自动化学院的领导对本书研究工作的支持与帮助。感谢参与相关研究的罗序荣、刘建伟、潘韞杰、赵中铭、丁钰杰、沈彩怡等同学。

任彬

2020年1月

于上海大学宝山校区



主要符号表

(按字母排序)

θ	绕 Z 轴的旋转角度
ω	操作空间的旋转角速度矢量
a	加速度矢量
$C(q, \dot{q})$	Coriolis 项
e_{ij}	在坐标系 i 中表达的单位矢量
f_d	期望的环境作用力矢量
f_e	机器人对环境的作用力矢量
f_x	X 方向的人机力
f_y	Y 方向的人机力
f	人机交互作用力
F	运动摩擦系数矩阵
$G(q)$	重力项矩阵
G_a	骨骼服的动力学模型
GCP	地面接触点
G_h	人机之间的交互模型
GRF	广义地面反作用力
$H(q)$	惯性矩阵
HFM	最大人力因数矩阵
HF	人力因数矩阵
I	转动惯量
J	雅可比矩阵

K_{Df}	阻尼系数矩阵
K_{DP}	期望的阻尼系数矩阵
K_D	阻尼系数矩阵
K_I	积分系数矩阵
K_{Mf}	惯性系数矩阵
K_{MP}	期望的惯性系数矩阵
K_{Pf}	弹簧系数矩阵(刚性系数矩阵)
K_{Pp}	期望的网性系数矩阵
K_p	比例系数矩阵
m	质量
p_x	X 方向位置
p_y	Y 方向位置
\dot{p}	操作空间的平移速度矢量
p	操作空间的位置矢量
q_i	关节角度
\ddot{q}	关节角加速度矢量
\dot{q}	关节角速度矢量
q	关节角度矢量
RBF	径向基函数
R	旋转矩阵
SAC	灵敏度放大控制
T_a	驱动器施加的力矩矢量
T_{hm}	人机交互力矩矢量
T_z	绕 Z 轴的人机力矩
T	合外力矩矢量
V	Lyapunov 函数
v	操作空间的速度矢量
x_c	参考轨迹的方位矢量
x_d	期望的位置矢量

x_e	环境的位置矢量
x_h	人的位置矢量
\dot{x}_c	参考轨迹的速度矢量
\ddot{x}_c	参考轨迹的加速度矢量
\ddot{x}	广义加速度矢量
\dot{x}	广义速度矢量
x	广义坐标位置矢量
ZMP	零力矩点



目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	下肢外骨骼国内外研究概况	1
1.1.1	国外研究概况	1
1.1.2	国内研究概况	6
1.2	下肢外骨骼人机协同运动的关键问题	9
1.2.1	人体下肢行走机理分析	9
1.2.2	下肢外骨骼仿生学构型设计	9
1.2.3	下肢外骨骼系统建模与人机协同	10
1.2.4	人体下肢步态预测	11
第 2 章	下肢外骨骼系统建模与仿真	12
2.1	OpenSim 建模仿真	12
2.1.1	人体下肢模型逆向动力学仿真	12
2.1.2	下肢肌肉骨骼的动力学建模与求解	15
2.1.3	人体下肢模型动力学正解仿真	28
2.2	外骨骼机器人三维造型与仿真分析	30
2.2.1	外骨骼机器人的造型方案	30
2.2.2	外骨骼机器人的各部件参数	31
2.2.3	外骨骼机器人运动学仿真验证	33
2.2.4	人体下肢与外骨骼机器人耦合方式	34
2.2.5	人机耦合模型仿真结果	39
2.3	本章小结	41

第3章 人体数据采集的外骨骼传感系统 43

- 3.1 Kinect 的骨骼识别与动作识别 43
 - 3.1.1 Kinect 骨骼跟踪原理 44
 - 3.1.2 骨骼数据获取 45
 - 3.1.3 骨骼数据的处理 45
 - 3.1.4 Unity 3D 与 Kinect 的配合 46
 - 3.1.5 根据关节对动作进行提取 49
 - 3.1.6 动作识别的方式 50
 - 3.1.7 动作规划中的算法 53
- 3.2 脑电信号下的人体数据采集 55
 - 3.2.1 大脑的结构及功能分区 55
 - 3.2.2 脑电信号的产生 57
 - 3.2.3 脑电信号的采集 60
 - 3.2.4 信号采集注意事项 63
- 3.3 脑电信号下的人体下肢运动实验 64
 - 3.3.1 运动性疲劳概述 64
 - 3.3.2 脑疲劳电信号的采集方法 65
 - 3.3.3 脑电信号的频率(谱)特征提取 70
 - 3.3.4 实验测试数据处理 71
 - 3.3.5 实验 1: 走路实验 73
 - 3.3.6 实验 2: 蹲起实验 76
- 3.4 本章小结 79

第4章 遗传算法的下肢外骨骼步态轨迹规划 80

- 4.1 下肢外骨骼虚拟原型设计及其数学模型 80
 - 4.1.1 6 个自由度人体单腿生物学模型 80
 - 4.1.2 下肢外骨骼模型 81
 - 4.1.3 运动学模型及六点步态轨迹描述法 82
- 4.2 遗传基因优化算法 83
 - 4.2.1 关节轨迹优化 84
 - 4.2.2 优化评估方程 84
 - 4.2.3 遗传基因算法设计 85

4.3	仿真实验及结果分析	86
4.4	本章小结	88

第5章 混联下肢外骨骼人机运动匹配 89

5.1	人体下肢行走机理分析	89
5.1.1	人体基本切面和基本轴	89
5.1.2	人体下肢关节结构及运动特性	90
5.1.3	人体下肢肌肉-骨骼模型	92
5.2	基于混联机构的仿人型下肢外骨骼构型	93
5.2.1	混联下肢外骨骼构型	93
5.2.2	混联外骨骼髋关节运动学模型	95
5.2.3	髋关节人机运动匹配分析	96
5.3	本章小结	100

第6章 下肢外骨骼人机交互系统 101

6.1	物理型下肢外骨骼单腿建模	101
6.1.1	矢状面步态分析	101
6.1.2	摆动相动力学建模	102
6.1.3	支撑相动力学建模	107
6.1.4	物理型人机交互建模	109
6.2	自适应迭代学习的外骨骼单腿协同	110
6.2.1	迭代学习控制算法	110
6.2.2	自适应迭代学习控制器设计	112
6.2.3	步态跟踪仿真	113
6.3	本章小结	118

第7章 模型分块逼近的 RBF 神经网络步态预测 120

7.1	基于时间序列的步态预测	121
7.1.1	基于卡尔曼滤波的步态预测	121
7.1.2	基于牛顿预测器的步态预测	123
7.2	RBF 神经网络步态预测	124

7.2.1	RBF 神经网络算法	124
7.2.2	下肢模型逼近	125
7.2.3	步态预测策略	126
7.2.4	矢状面步态预测结果	129
7.3	本章小结	131
第 8 章 人体下肢步态捕捉实验设计 132		
8.1	人体步态捕捉方案与实验	132
8.1.1	捕捉方案简介	132
8.1.2	步态捕捉光学系统	132
8.1.3	实验设计	134
8.1.4	步态捕捉	136
8.2	步态捕捉结果及数据分析	137
8.3	本章小结	140
第 9 章 下肢外骨骼的样机设计及实物展示 142		
9.1	总体设计方案	142
9.2	样机结构设计	143
9.2.1	腰部	143
9.2.2	髋关节和膝关节	143
9.2.3	踝关节及足部	144
9.3	样机系统设计	146
9.3.1	外骨骼机器人驱动系统	146
9.3.2	外骨骼机器人控制系统	146
9.3.3	关节执行器方案选择	148
9.4	样机实物	150
9.5	展望	153
参考文献		154

下肢外骨骼是一种可穿戴的人机一体化机械装置, 将其人的智力和机器人的“体力”完美地结合在一起, 在医疗康复和助力等方面具有广泛的应用前景。随着社会的不断发展, 我国面临着日益严重的人口老龄化问题和数量庞大的残疾人群问题。国家统计局统计, 截至 2018 年年底, 我国 60 岁以上的老龄人口已接近 2.5 亿。至 2030 年, 我国将有超过 3 000 万脑卒中患者, 各类残疾人总数超过 8 000 万, 其中肢体残疾人口逾 2 400 万^[1]。大量的患者、失能者和老年人需要康复和辅助器具。下肢外骨骼可以为下肢伤残和脑卒中患者提供比医护人员更高精度、更高重复性的康复训练, 还可以依据恢复水平, 定量调整训练的强度, 因而在医疗领域得到越来越多的研究与应用。

另外, 下肢外骨骼能够充分发挥人脑强大的信息处理能力, 同时可以为肌体提供动力, 增强肌体的行走能力, 缓解大负重和长时间工作带来的肌体疲劳^[2-4]。因此, 下肢外骨骼也可作为单兵武器装备的子系统, 帮助士兵携带更多的通信设备、武器弹药及急救物资, 并以更快的速度行进, 避免由于单兵负载过大而引起的伤病、过劳等情况。在制造业、农业、建筑业及抢险救灾等任务繁重且灵活性较强的领域, 下肢外骨骼可以大大提高穿戴者的工作效率并防止肌肉骨骼损伤。

综上, 下肢外骨骼可以作为一个子系统被应用到多个领域, 以增强或重建穿戴者的下肢运动能力。下肢外骨骼本体通过一系列辅助装置与人体连接, 为了不对穿戴者造成干扰, 必须与穿戴者下肢保持同步运动。因此, 实现下肢外骨骼人机协同运动是下肢外骨骼助力的关键。

1.1 下肢外骨骼国内外研究概况

1.1.1 国外研究概况

外骨骼人体运动增强的思想最早可以追溯到俄国 Nicholas Yagn 于 1890

年申请的发明专利^[5]。该发明由并联在人体腿部外侧的 2 片弓形片弹簧组成,通过弹簧机构将人的体重传递至地面以减少支撑腿承受的负载,如图 1-1 所示。从 20 世纪 60 年代开始,外骨骼的研究在欧美等发达国家陆续开展,最初的目的是增强人体负载的能力。1965 年美国通用电气公司与康奈尔大学研制的“哈迪曼 1”(Hardiman 1)是最早的具有代表性的全身外骨骼样机^[6],如图 1-2 所示。该外骨骼采用液压驱动,重约 680 kg,采用主从控制模式,能够将四肢的力量放大 25 倍。

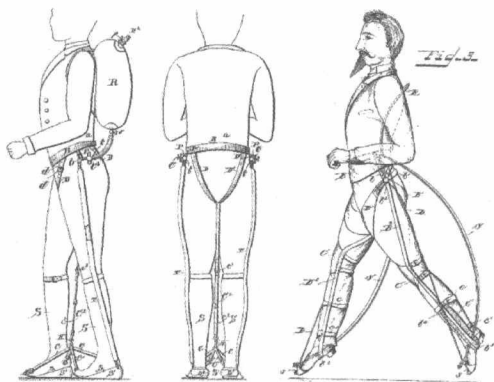


图 1-1 Nicholas Yagn 的外骨骼概念设计



图 1-2 哈迪曼 1 外骨骼

到 20 世纪 90 年代末,随着机器人、传感、驱动及能源技术的进步,外骨骼的相关研究也开始快速发展。美国国防高级研究计划局(DARPA)于 2000 年开始进行“增强人体机能的外骨骼”(EHPA)项目的研究^[7],目标是“增强地面士兵的作战能力”。美国麻省理工学院(MIT)、美国 Sarcos 公司、加利福尼亚大学伯克利分校参与了 EHPA 项目。

美国麻省理工学院设计的准被动式外骨骼机器人(quasi-passive exoskeleton)^[8],能够在负重 36 kg 的情况下以 1 m/s 的速度行走,并将 80% 的负重传递到地面。如图 1-3 所示,准被动式外骨骼机器人髋关节配置了 3 个自由度,膝关节和踝关节各配置 1 个自由度,利用储能弹簧和变阻尼器驱动关节^[9]。

美国雷神(Raytheon)公司旗下的 Sarcos 公司先后研制了全身式外骨骼 XOS-1 和 XOS-2,均采用液压驱动^[10]。最新的 XOS-2 共有 23 个主动助力关节,其中单腿 6 个、腰部 1 个、单臂 5 个,如图 1-4 所示。士兵穿上 XOS-2

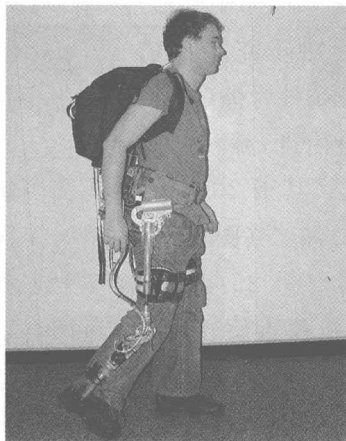


图 1-3 MIT 研制的下肢外骨骼



图 1-4 雷神公司的 XOS-2

之后可举起 90.7 kg 的重物(人体的承重仅 9 kg),可以单手劈开 3 in(1 in=2.54 cm)厚的木板,以及单手平举 23 kg 的重物。

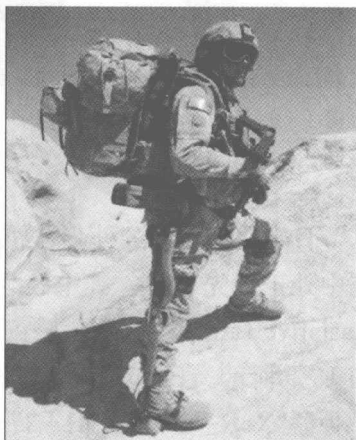
加利福尼亚大学伯克利分校在 2004 年推出了第一代单兵外骨骼样机“BLEEX”(Berkeley Lower Extremity Exoskeleton,图 1-5a)^[11-12],其采用液压驱动,髋关节、膝关节和踝关节分别设计有 3 个、1 个和 3 个自由度。伯克利仿生公司在 BLEEX 的基础上开发了第二代外骨骼“ExoHiker”和“ExoClimber”(图 1-5b),于 2008 年推出了 HULC(Human Universal Load Carrier,图 1-5c)。



(a) BLEEX



(b) ExoClimber



(c) HULC

图 1-5 加利福尼亚大学伯克利分校及伯克利仿生公司研制的下肢外骨骼系列

2009年,美国佛罗里达州人与机器认知研究院(Florida Institute for Human and Machine Cognition)推出了 IHMC 外骨骼(图 1-6),用于帮助下肢残障患者行走^[13]。其中,髋关节有 3 个自由度,膝、踝关节各 1 个自由度,采用串联弹性驱动器驱动髋关节和膝关节。其于 2012 年和美国国家航空航天局(NASA)合作研发的 X1 宇航员外骨骼^[14](图 1-7),能够视需要选择辅助或抑制宇航员的腿部活动。该外骨骼重 25 kg,具有 4 个主动关节和 6 个被动关节,可进行侧步、转向、臀部和膝盖旋转等动作,具有较高的灵活性。

哈佛大学开发了软性外骨骼机械服“Soft Exosuit”(图 1-8),以增强士兵的肌肉力量和灵活性。该外骨骼采用伺服电机和钢丝绳传动的方式,为外骨骼髋关节和踝关节提供驱动^[15]。

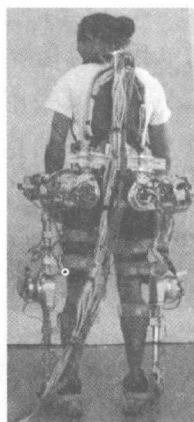


图 1-6 IHMC 外骨骼

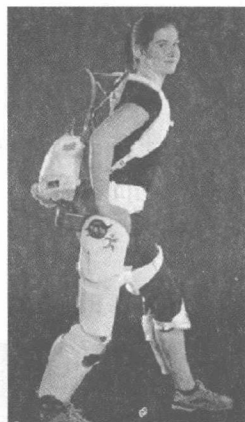


图 1-7 X1 宇航员外骨骼



图 1-8 Soft Exosuit 外骨骼

日本在民用型的外骨骼机器人领域研究成果突出,在助老助残外骨骼研究中处于领先地位。其中较为成熟的是日本筑波大学研发的 HAL(Hybrid Assistive Limb)系列外骨骼机器人,从最初的下肢助力扩展到上肢助力^[16],如图 1-9 所示。日本立命馆大学分别于 2011 年和 2013 年研发了气电混合动力外骨骼“XoR-1”和“XoR-2”^[17](图 1-10)。2015 年,日本松下公司推出了采用轻型碳纤维发动机进行驱动的轻便版下肢外骨骼“Panasonic suit”(图 1-11),可提供 33 磅(1 磅 \approx 0.45 kg)的有效负载。