



智能机电技术丛书

仿生外骨骼的

运动协同与自适应

控制理论

任彬 陈嘉宇 著

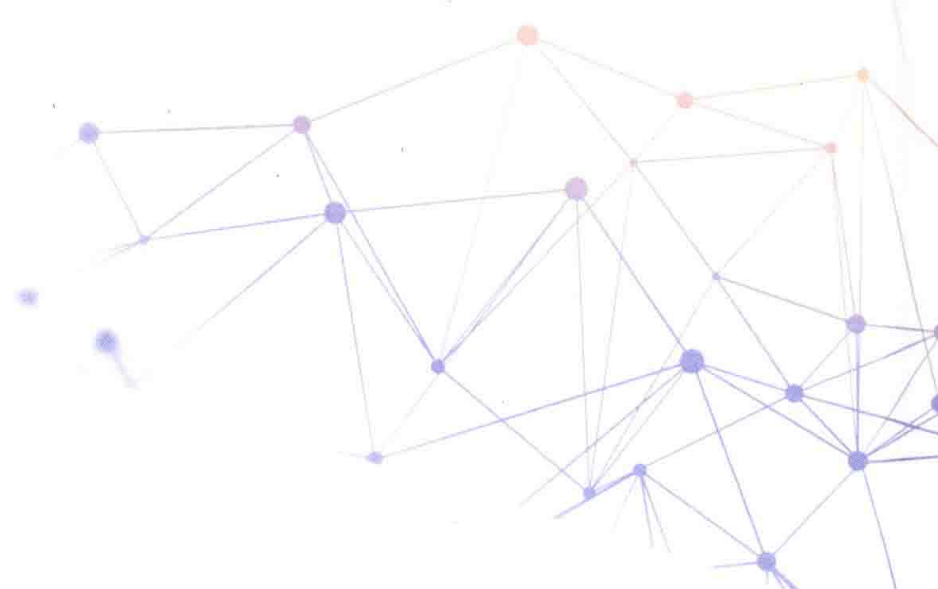


上海科学技术出版社

仿生外骨骼



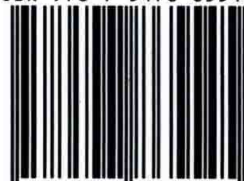
- ◎ 责任编辑 高军晓
- ◎ 文字编辑 孙婧
- ◎ 美术编辑 赵军



www.sstp.cn

上架建议：机械、仪表工业

ISBN 978-7-5478-6554-5



9 787547 865545 >

定价：108.00元

易文网：www.ewen.co



智能机电技术丛书

仿生外骨骼的运动协同与 自适应控制理论

任 彬 陈嘉宇 著

上海科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

仿生外骨骼的运动协同与自适应控制理论 / 任彬,
陈嘉宇著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2024. 4
(智能机电技术丛书)
ISBN 978-7-5478-6554-5

I. ①仿… II. ①任… ②陈… III. ①仿生机器人—
运动控制—自适应控制—研究 IV. ①P242

中国国家版本馆CIP数据核字(2024)第050560号

仿生外骨骼的运动协同与自适应控制理论
任彬 陈嘉宇 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

(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)

邮政编码 201101 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 13.75 插页 8

字数: 260千字

2024年4月第1版 2024年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-6554-5/TH·107

定价: 108.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

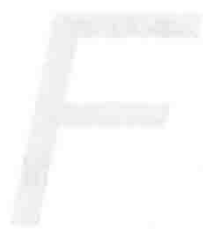


Synopsis

内容提要

本书重点讨论仿生外骨骼的运动协同与自适应控制理论。可穿戴外骨骼的设计应该符合人体工程学,人体与外骨骼耦合为一个整体,人是系统的核心,处于控制回路当中。因此,人机协同控制算法需要将人的因素考虑在内。全书内容分为 12 章,主要包括基于遗传算法的人机耦合步态轨迹优化、基于光电传感的足底压力传感系统、多运动模式步态相位识别、仿生外骨骼关节角度协同运动。在外骨骼仿生设计的基础上,本书讨论了轨迹跟踪自适应控制算法、模糊自适应控制算法、不确定逼近的 RBF 神经网络自适应控制算法等。

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机械设计、机器人、控制科学等专业方向的教材。



序

“十四五”期间(2021—2025年),中国“人口大国”优势逐渐减弱,人口老龄化、员工成本增加等问题使得企业用工趋于艰难。企业面临亟待解决的问题是劳动力市场短缺。制造业、建筑业又是依赖大量劳动力的行业,因此,应对劳动力资源紧缺已经成为保障经济持续良好运行的一项常态化课题和任务。

在制造业领域,工人所完成的工作很大比例为重复性劳动,不同的工种有各自固定的工序。劳动力的短缺则可能导致工人在某个工序的重复劳动强度增加。这种状况下,制造车间中的外骨骼需要面对焊接、装配、拆卸等各种复杂上肢工作,以及平地行走、上下阶梯、跳跃等各种类型的步态。这些复杂、多变的工作和步态,对全身外骨骼系统的模型建立提出了极高的要求。

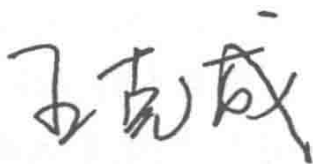
近年来,中国城镇化迅猛发展,但从事建筑业的劳动力老龄化、逐年减少、高素质建筑工人短缺的问题越来越突出,建筑业发展的“硬约束”加剧。行业人士都在积极探索外骨骼在建筑业中的应用,以提高工人工作的安全性和生产力。外骨骼的使用可有效减少工人重复和长时间工作中的累积压力,比如手持重型设备在墙上打磨修整,长时间的外墙作业、抹灰作业、砌筑作业、贴砖作业等。建筑工作涉及很多可能导致危险事故和职业伤害的任务,事实上很多建筑场景的日常活动如搬运重物是造成施工中拉伤的主要原因,建筑外骨骼也可以直接解决这些问题。

美国疾病控制与预防中心报告提出,使用外骨骼可以降低脊柱的压力,减少疲劳等。具体优势在于:第一,减少损伤和肌肉紧张:外骨骼更均匀地分配重量,减少身体不同部位的紧张,这可以降低建筑工人长期受伤的风险。第二,提高工作效率:使用建筑外骨骼的工人更不容易疲劳,而且由于

减少了压力,他们可以完成更多的工作。第三,开放就业机会:承包商可承接更多需要剧烈身体劳作的合同,从而增加更多就业岗位。

本书作者采用“拟人化”的设想,将外骨骼设计成与人体骨骼基本相同的拓扑结构,以保证与穿戴者相似的运动空间及自由度,从而提供满足人机协同运动的构型。为了实现穿戴者与下肢外骨骼之间的人机协同运动,可以借助仿生学的知识对外骨骼进行构型设计。目前研究的难点之一是人体下肢的多关节、多杆件及其带来的冗余自由度,使得下肢外骨骼的结构设计和人机协同控制的难度大大增加。因此,在外骨骼构型设计中,须在完全拟人化及准拟人化的问题上达到平衡。在实现人机运动协同的同时,降低下肢外骨骼设计与控制的复杂性。

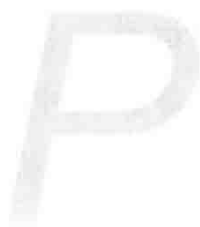
本书可作为制造行业、建筑行业、医疗行业技术人员的专业参考用书,也可为外骨骼研发领域跨学科的研究生、工程师提供控制理论的学习借鉴。



湃特纳(佛山)机器人科技有限责任公司 CEO

于广东顺德

2024年3月13日



前 言

到 2030 年前后,中国老龄化率预计将达到 20%,进入超级老龄化社会。随着人口老龄化和老年人口高龄化不断上升,中国失能和半失能老人规模将由 2020 年的 4564 万人预计上升到 2030 年的 6953 万人、2050 年的 12606 万人。未来,老年人照护需要的成本在急剧增加。仿生外骨骼则可以为下肢瘫痪、截肢、脊髓损伤等患者提供有效的康复治疗。它可以通过智能控制系统,对患者下肢进行力量支持和运动控制,帮助患者恢复行走和运动功能。这对于患者来说,是一种重要的康复手段,可以提高其生活质量和自理能力。

仿生外骨骼的研究涉及多个学科领域,如机械工程、控制科学、生物医学工程等。通过对仿生外骨骼的研究和应用,可以推动这些学科领域的交叉和融合,促进医学研究和技术发展。同时,仿生外骨骼也为机器人技术在医疗领域的应用提供了新的思路和方向。控制器则可以为仿生外骨骼提供高精度、高实时性、可靠稳定的控制信号。目前,仿生外骨骼智能控制系统的研究主要集中在以下几个方面:

1) 传感器技术

传感器技术是仿生外骨骼控制器的关键技术之一。传感器可以实时采集机器人关节角度、力矩、加速度等数据,为机器人运动控制提供必要的信息。目前,常用的仿生外骨骼传感器包括惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、压力传感器、位移传感器等。其中,IMU 可以实现对机器人姿态的测量和跟踪,压力传感器可以实现对足底压力的测量和分析,位移传感器可以实现对关节位置的测量和控制。传感器技术的发展,将进一步提高仿生外骨骼的运动控制精度和稳定性。

2) 电机驱动技术

电机驱动技术是仿生外骨骼控制器的另一个重要技术。电机驱动系统

可以实现对机器人关节的精确控制和调节,从而实现机器人的运动。目前,常用的仿生外骨骼电机驱动技术包括直流无刷电机、步进电机等。其中,直流无刷电机具有高效、低噪声、低能耗等优点,逐渐成为仿生外骨骼电机驱动系统的主流技术。

3) 控制算法

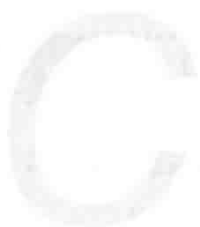
控制算法是仿生外骨骼控制器的核心技术之一。控制算法可以实现对机器人运动轨迹、速度、力矩等参数的精确控制和调节,从而实现机器人的运动。目前,常用的仿生外骨骼控制算法包括比例积分微分(PID)控制、模糊控制、神经网络控制等。其中,PID控制具有简单易实现、响应速度快等优点,适用于简单的运动控制场景;模糊控制可以处理非线性系统和模糊信息,适用于复杂的运动控制场景;神经网络控制可以自适应地调整参数和结构,适用于高精度、高稳定性的运动控制场景。

本书重点将从以下方面开展仿生外骨骼的控制算法研究,包括:建立仿生外骨骼的动力学模型;选取卡内基梅隆大学(Carnegie Mellon University, CMU)动作捕捉数据库中的一组步态数据,采用插值拟合的方式对步态数据进行处理,将离散的步态数据连续化;在此基础上,采用位置控制模式,以插值拟合后的函数曲线作为期望轨迹并搭建控制算法;最后,根据仿生外骨骼在不同控制算法下的综合表现,对其进行模型评价,验证控制策略的有效性。

本书的出版得到了上海大学和清华大学的支持,获得了国家自然科学基金(51775325)、香港优配研究金(11209620;21204816)、清华大学人才引进项目(53331400223)、宁波市重点研发计划(2023Z218)资助。最后,感谢 Fighting Lab(实验室)参与相关研究的刘建伟、张志强、管万里、王琳、汪小雨、潘韞杰、王梓林、史迪威等同学。希望本书内容能为广大读者带来新的见解和启示。



2024年1月
于上海大学



目 录

第 1 章 绪论 1

- 1.1 仿生外骨骼研究的目的和意义 1
- 1.2 仿生外骨骼国内外研究现状 2
- 1.3 仿生外骨骼关键技术与问题分析 12

第 2 章 基于遗传算法的人机耦合仿真模型 18

- 2.1 人体下肢生理结构分析 18
 - 2.1.1 人体解剖学 18
 - 2.1.2 下肢各关节自由度分析 20
 - 2.1.3 关节驱动的自由度选择 21
- 2.2 人机耦合的仿生外骨骼构型设计 22
 - 2.2.1 人体下肢运动链 22
 - 2.2.2 仿生外骨骼链 24
 - 2.2.3 人机耦合模型 25
- 2.3 遗传算法的步态轨迹优化 26
 - 2.3.1 耦合系统步态轨迹 27
 - 2.3.2 适应度评估方程 29
 - 2.3.3 仿真实验及结果分析 31
- 2.4 本章小结 37

第 3 章 基于光电感应的足底压力传感系统 38

- 3.1 仿生外骨骼的足底压力传感系统设计 38

3.2	光电式压力传感单元	39
3.2.1	光电-压力传感原理	39
3.2.2	模块化传感单元设计与制造	40
3.2.3	足底压力传感鞋垫方案	43
3.2.4	足底压力中心步态参数	45
3.3	足底压力数据采集实验	46
3.3.1	传感器特性分析	46
3.3.2	双足压力信号采集	48
3.4	本章小结	51

第4章 基于神经网络的步态相位识别 52

4.1	仿生外骨骼的步态相位识别	52
4.2	步态数据采集设备	53
4.3	步态相位划分方法	56
4.4	步态相位识别	59
4.4.1	多层感知机神经网络算法	59
4.4.2	人体步态数据集	60
4.4.3	多运动模式步态相位识别	62
4.5	本章小结	67

第5章 基于长短时记忆网络的运动协同方法 68

5.1	仿生外骨骼的运动协同	68
5.2	关节传感系统设计	69
5.3	动力外骨骼硬件系统	70
5.4	关节角度协同运动实验	72
5.5	长短时记忆网络的预测分析	76
5.5.1	长短时记忆网络	76
5.5.2	运动协同预测结果	78
5.6	本章小结	83

第 6 章 仿生外骨骼本体构型设计 85

- 6.1 仿生外骨骼结构与仿真分析 85
 - 6.1.1 结构设计 85
 - 6.1.2 仿真分析 89
- 6.2 踝关节执行器的创新设计 92
- 6.3 动力外骨骼样机 98
 - 6.3.1 关节执行器方案 98
 - 6.3.2 动力外骨骼机构 99
 - 6.3.3 样机实物 102
- 6.4 本章小结 103

第 7 章 仿生外骨骼运动学与动力学分析 104

- 7.1 人体步态分析 104
- 7.2 仿生外骨骼运动学分析 107
- 7.3 仿生外骨骼动力学分析 111
- 7.4 本章小结 113

第 8 章 基于轨迹跟踪的仿生外骨骼自适应控制 114

- 8.1 基于轨迹跟踪的自适应控制算法综述 114
- 8.2 单腿四自由度动力学模型 115
- 8.3 鲁棒自适应控制器设计 116
 - 8.3.1 扰动信号上确界未知的控制器设计 116
 - 8.3.2 轨迹跟踪自适应控制方法实现 118
 - 8.3.3 动态方程线性化 119
- 8.4 控制仿真实验及分析 120
- 8.5 本章小结 124

第 9 章 基于 MIMO 的仿生外骨骼模糊自适应控制 126

- 9.1 基于 MIMO 的模糊自适应控制综述 126

9.2	摩擦、外加干扰和负载变化情况的模糊补偿控制	127
9.3	数值模拟与比较	130
9.4	基于 MIMO 的仿生外骨骼仿真分析	132
9.5	本章小结	136

第 10 章 基于 Backstepping 的仿生外骨骼模糊自适应控制

137

10.1	基于 Backstepping 的模糊自适应控制综述	137
10.2	基于 Backstepping 的自适应模糊控制系统搭建	138
10.2.1	系统描述	138
10.2.2	Backstepping 控制器的设计及稳定性分析	139
10.3	基于 Backstepping 的仿生外骨骼仿真分析	144
10.4	实验验证	147
10.4.1	可穿戴关节角度测量装置	148
10.4.2	平地实验	148
10.4.3	上楼梯实验	152
10.5	本章小结	157

第 11 章 基于 RBF 神经网络的仿生外骨骼自适应控制

159

11.1	基于 RBF 神经网络的自适应控制综述	159
11.2	仿生外骨骼的动力学模型	160
11.3	RBF 神经网络描述	161
11.4	仿生外骨骼的 RBF 神经网络自适应控制	162
11.4.1	系统描述	162
11.4.2	模型不确定部分的 RBF 神经网络逼近	163
11.4.3	控制器的设计与分析	164
11.5	基于 RBF 神经网络的仿生外骨骼仿真分析	167
11.6	实验验证	170
11.6.1	平地实验描述	170
11.6.2	数据采集与分析	171
11.7	本章小结	174

第 12 章	仿生外骨骼控制系统设计	175
12.1	控制系统	175
12.1.1	硬件控制系统	175
12.1.2	软件控制系统	176
12.2	仿生外骨骼轻量化设计与要求	180
12.2.1	设计原则与要求	180
12.2.2	仿生外骨骼轻量化设计	181
12.3	仿生外骨骼控制策略	184
12.4	本章小结	186
缩略词及中英文对照		188
参考文献		190
后记		205

1.1 仿生外骨骼研究的目的和意义

下肢动力外骨骼由于其巨大的潜力,被广泛应用于各大领域,尤其是在军事领域中。单兵系统作战能力的高低,直接决定着整个战场战斗力的强弱。步兵(在军事战场上依靠步行作战的军事人员)需要携带与作战任务有关的所有物资,这些物资一般都背在背上或附在背心上,其负荷范围从最小的 44 kg 战斗负载(基本衣物与装备)到最大的 68 kg 的紧急行军负荷(战斗负荷加上额外的补给和装备)。过重的负荷会降低士兵的机动能力,使他们更容易受到敌人的攻击。研究表明,增加负载会增加步兵完成一般战斗动作所需的时间,例如 30 m 冲刺、爬行、拖拉伤员、携带弹药,其他影响还包括姿态感知和射击技巧性能下降。《中国人民解放军单兵负荷量标准》(GJB 113—1986)中指出,在常温条件、高温条件、作战条件下的适宜负荷量分别不超过 20 kg、15 kg、16 kg。在美国军队看来,在高温和寒冷条件下的标准作战负荷量不应该高于 18 kg,行军条件下应不超过 25 kg。军事背景下的动力外骨骼辅助装备在世界范围内引发了一股研究热潮,世界各国都在致力开展助力装备的研究,旨在提高单兵的载重能力,从而提升士兵的携带物资能力及机动能力,进而提高士兵的作战能力。

随着这些外骨骼技术的不断研发与突破,在工农业、建筑业、医疗业等更多专业领域中也逐渐衍生出了民用型、工业型、医疗型外骨骼机器人,这些外骨骼作为子系统被用于增强或重建穿戴者的下肢运动能力。近年来,中国的自然灾害时常发生,尤其是在许多偏远山区等。山区发生自然灾害时,容易造成交通阻碍,消防救援官兵受限于体力,无法携带更多的救援物资以及提供更持久的救援工作,给救援任务带来诸多挑战,而佩戴动力外骨骼就能够在保护救援官兵的同时拯救更多的受灾群众。在工农业领域中,使用外骨骼的主要目的是防止对劳动工作者的身体伤害以及经济损失。在医疗领

域,随着人们生活水平的提高,社会更趋于老龄化,肢体运动障碍的人数逐渐有所增加。肢体运动障碍会导致步态异常并影响正常的步行,下肢康复外骨骼机器人在减轻陪护人员的负担和提升康复训练效果方面具有重要意义。

当前外骨骼技术概念层出不穷,智能人机一体化系统设计方案的优良将直接影响其应用的可行性。在研发动力外骨骼时,首先,需要创造一种在任何情况下都可靠和可行的运动智能;其次,创建认知智能,使得基于高级运动智能的机器人变得更易理解;最后,将运动智能与认知智能有机结合,感知实时环境信息,决策运动计划和策略。因此,下肢动力外骨骼的设计方案和感知方案的应用,可以实现人与机器之间的运动协调,降低两者之间的干涉与干扰,完成协作人体运动的功能。为此,本书从结构设计、人机交互的信息传感、协同运动规划策略等方面,综合运用仿真分析、设计制造和实验验证等方法,进行下肢动力外骨骼的研究。

1.2 仿生外骨骼国内外研究现状

下肢动力外骨骼将人的智能与机械外骨骼的力量结合起来,形成了以人的智能作为核心控制的动力增强装置,从而实现了人体感官系统延伸和身体机能提升的效果。到目前为止,世界各国先后开展外骨骼机器人技术的研究,致力提升外骨骼与人体的兼容性,并在各类技术的加持下提升外骨骼的运动协同效果。

1) 军事领域

1960年,美国通用电气公司研制成了哈迪曼(Hardiman)(图1-1),这是一种大型的全身式外骨骼机器人,旨在增强使用者的力量,使用户能够举起更重的物体。在当时完成一只机械手能够达到力量增强25倍后,项目就告一段落了,因为其体积和人体相比实在过于庞大,重达680 kg,而0.76 m/s的行走速度又进一步限制了实际运动,而且运行期间的可靠性和安全性都没有办法保证。而后在美国军方和麻省理工学院的联合开发下,于1978年开始了改进工作,最后的样机(图1-2)相比Hardiman虽然在体型上有所改进、变得轻巧许多,但最终因为受限于动力能源以及驱动方面的问题而没取得成功。

由于在经验和知识上的匮乏,无论是在能源动力方面还是控制算法方面,动力外骨骼的研究发展在当时都受到了很大的技术限制,研发动力外骨骼的进展一直处于不温不火的状态。虽然前期的这些研究都没有成功的产品面



图 1-1 Hardiman 样机



图 1-2 麻省理工学院仿生外骨骼

世,但是这一时期的技术积累为现代高性能动力外骨骼提供了许多知识和经验。伴随着军事科学技术的发展,以及机器人、传感、驱动、能源技术的进步,动力外骨骼装置在 21 世纪初迎来了蓬勃发展的热潮。

最具代表性的军事外骨骼军备计划事件是美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出助力型外骨骼装置的研发计划书(Exoskeleton for Human Performance Augmentation, EHPA),其目标是“增强陆地士兵的作战能力”,面向各大顶级科研单位和科技公司巨头发起项目承办邀请。

伯克利大学率先在 2004 年推出了第一代助力型外骨骼样机——伯克利下肢外骨骼(Berkeley Lower Extremity Exoskeleton, BLEEX)。基于仿生人体关节自由度,BLEEX 仿生外骨骼共有 15 个自由度,该外骨骼采用液压驱动,由两动力驱动的仿生腿、动力单元和提供负重的背包架组成,在自重 50 kg 的基础上能够额外负载 34 kg 并抵消 90%以上作用在人体的负载重量。随后,在 Kazerooni 教授的带领下,研究团队在 BLEEX 的基础上,相继又开发出了二代单兵外骨骼 ExoHiker 以及 ExoClimber。针对 BLEEX 的一些缺点,2009 年由美国军火巨头洛克希德·马丁(Lockheed Martin)公司牵头改进其能源供应问题,研制出第三代动力外骨骼 HULC。HULC 凭借出色的助力效果,能够在负重 40 kg 的情况下续航长达 40 km,并且支持搬运炮弹等重型军备物资。BLEEX、ExoHiker、ExoClimber、HULC 如图 1-3 所示。