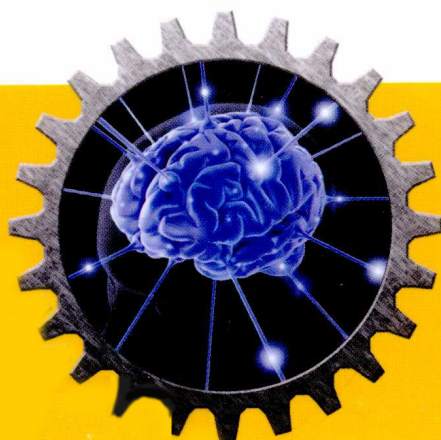


柔性外骨骼 人机智能系统

张佳帆 陈 鹰 杨灿军 编著



科学出版社

柔性外骨骼人机智能系统

张佳帆 陈 鹰 杨灿军 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

柔性外骨骼人机智能技术以人机一体化技术为核心,充分发挥人和智能机器各自的优势,通过在感知、决策以及执行层面上有机的人机耦合,增强系统的性能。本书系统地阐述了柔性外骨骼人机智能系统理论及其应用;在人机一体化概念的基础上,对柔性外骨骼人机智能系统的发展、拟人化结构设计、人机耦合控制技术、上肢遥操作外骨骼以及下肢医疗康复外骨骼进行了详细介绍。

本书主要面向从事机器智能化理论与技术研究的科研技术人员,为他们进行人机智能系统设计、集成与实现等工作提供有价值的参考素材。同时面向机械工程、控制工程等相关学科领域的研究生,可作为智能化系统与技术方面的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

柔性外骨骼人机智能系统/张佳帆,陈鹰,杨灿军编著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-029656-6

I. 柔… II. ①张…②陈…③杨… III. 人机系统-研究 IV. TB18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 232336 号

责任编辑:顾英利 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

张主印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年1月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011年1月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 1—2 000 字数: 255 000

定价: 46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

机器系统的发展历史,就是一部人与机器系统相互关系的发展史。人机系统是把人与机器系统放在同一个框架中考虑,根据人与机器系统的不同特点,构成能够完成指定功能的,高效、低成本的系统。人机系统的智能化,是人机系统的发展方向。人机智能系统研究,是工程科学中的一个重要研究领域,是机器智能化以及人工智能研究人员重点关注的对象之一。

20世纪90年代初期,路甬祥教授领导的浙江大学“人机一体化系统”研究小组即在《机械工程学报》上以发表系列论文的形式,提出了人机智能系统的一种解决方法——“人机一体化”思想。系列论文就“人机一体化系统”,从其定义、内涵、理论框架、建模、关键技术构成、实现方式及其设计特点,进行了全面的阐述。系列论文发表之后,引起许多同行的重视。人机一体化系统思想认为,对于人机智能系统,应采取人与智能机器为一体的技术路线,人与机器处在平等合作的地位上,共同认为对方是一独立的智能个体,组成一个系统。双方各自执行自己最擅长的工作,取长补短,共同感知、共同认识、共同思考、互相理解、一起讨论与协商、共同决策、共同工作、互相制约并相互监护。这样的系统,突破了传统的“智能系统”的概念,形成达到甚至超过人的能力乃至智力的系统,完成人与智能机器系统都不能单独完成任务。其中,强调人机系统在智能与决策层面上的充分结合,强调“人”与智能的“机器系统”之间的关系。人机一体化系统思想是立足于当代人工智能技术、现代控制理论、计算机科学、认知科学和机械科学的现有研究成果,提出的一种新型智能系统的设计方法。

随后的十余年来,在多项国家自然科学基金、浙江省自然科学基金等项目的资助下,浙江大学研究小组对人机一体化智能系统理论,开展了长期的、系统的理论研究与应用研究,同时发表了一系列论文,获得了中国机械工程学会和浙江省颁发的多项优秀论文奖,并培养了多名博士、硕士研究生。同时,研究成果也为许多学术论文所引用。2000年前后,研究小组在以往工作的基础上,对人机一体化系统理论与方法的研究成果进行了全面的整理,完成了“机器智能化方法”研究生讲义,并在浙江大学的研究生教学中进行讲授。与此同时,结合最新的相关研究成果,不断对书稿进行修改和完善。2006年,研究小组中的陈鹰、杨灿军撰写出版了《人机智能系统理论与方法》一书,旨在面向从事机器智能化理论与技术研究的科研技术人员,为他们进行人机智能系统设计集成,提供一份参考文献。该书在对人与机器的关系进行研究分析的基础上,系统地阐述了人机一体化理论与方法。同时,初步

开展了人机一体化思想的工程实践方法研究。

近年来,浙江大学的研究小组重点开展了人机智能系统的应用研究,在人机辅助决策、康复机器、机械手遥操纵、外骨骼技术等领域,进行人机智能系统的应用研究。张佳帆博士等人在国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划和有关企业的支持下,在柔性外骨骼人机智能系统技术方面,开展了较为系统的研究,形成了一些理论成果。为此,我们在这些工作的基础上,进行了人机智能系统的一种形式——柔性外骨骼人机智能系统的理论与应用研究成果的整理,形成了这部专著,以期丰富和充实人机智能系统乃至人机一体化思想理论体系。

本书共分9章。第1章、第2章主要讨论了柔性外骨骼人机智能系统的基本概念,并对该类人机智能系统的分类、研究进展和相关关键技术进行了阐述。第3章主要讨论了人体关节运动机理,为柔性外骨骼技术的研究奠定基础。第4章进行了柔性外骨骼人机智能系统运动学及动力学建模的研究。第5章开展了柔性外骨骼人机智能系统结构设计研究。第6章针对人体,在信息感知、决策与运动控制三个层面进行建模研究。第7章讨论了柔性外骨骼人机智能系统控制系统的实现;第8章、第9章分别针对感知型上肢遥操作柔性外骨骼人机智能系统和增力型下肢运动康复柔性外骨骼人机智能系统两个不同应用系统,进行了系统集成研究。

一直以来,研究小组在人机智能系统方面开展的研究工作,得到了路甬祥教授的长期指导。事实上,研究小组开展人机智能系统的应用研究与工程实践研究,正是路甬祥教授长期大力推动的结果,在此表示由衷的感谢。同时,感谢国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划、国家科技支撑计划和浙江省自然科学基金项目对本研究工作的资助。感谢德国FESTO公司、ABB(中国)有限公司对研究小组开展工作的资金支持。

感谢我们的同事及我们的博士、硕士研究生对人机一体化思想研究的贡献。特别要感谢浙江大学医学院附属邵逸夫医院耿昱副主任医师在下肢康复医学领域中的合作研究,感谢李晓明博士、牛彬硕士、蔡春风硕士、董亦鸣硕士、张煜硕士、陈杰博士生、林贇博士生等人对本书的贡献。感谢参与下肢康复柔性外骨骼人机智能系统试验的所有参与者。感谢所有为本书的出版做出贡献的人们。

人机智能系统的研究,人与机器系统关系的研究,是一个不断发展中的重要研究方向,涉及学科广泛,时代性强。囿于作者的学识水平,本书一定存在不少缺点和错漏,恳请读者不吝指教。

陈 鹰

2010年9月于求是园

目 录

序

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 柔性外骨骼人机智能系统的概念	2
1.3 本书的主要内容	5
第 2 章 柔性外骨骼人机智能系统的发展	7
2.1 柔性外骨骼人机智能系统的分类	7
2.2 感知型柔性外骨骼系统研究进展.....	11
2.3 增力型柔性外骨骼系统研究进展.....	15
2.4 柔性外骨骼人机智能系统发展所面临的关键技术.....	20
第 3 章 人体关节运动机理	23
3.1 人体运动解剖学概述.....	23
3.2 人体关节运动机理研究.....	27
3.3 人体运动关节力学性能.....	34
3.4 仿生运动关节执行器.....	39
第 4 章 柔性外骨骼人机智能系统运动学及动力学	45
4.1 机器人机构运动学及动力学基础.....	45
4.2 柔性外骨骼人机智能系统运动学.....	54
4.3 柔性外骨骼人机智能系统动力学.....	59
第 5 章 柔性外骨骼人机智能系统结构设计	63
5.1 柔性外骨骼结构设计原则.....	63
5.2 上肢力反馈感知型柔性外骨骼结构设计.....	71
5.3 下肢步行辅助增力型柔性外骨骼结构设计.....	76
5.4 卒中患者踝足关节运动康复柔性外骨骼结构设计.....	83
第 6 章 人体信息感知、决策与运动控制系统模型	89
6.1 人体信息感知系统模型.....	89
6.2 人体信息融合识别及决策系统模型.....	91
6.3 人体运动控制系统模型.....	92
6.4 人体生物电信号.....	95
6.5 多感知器信号融合技术.....	98

第7章 柔性外骨骼人机智能系统控制系统	101
7.1 柔性外骨骼人机智能控制结构框架	101
7.2 感知层信息感知、交互与融合.....	103
7.3 决策层人机一体化协调控制决策	106
7.4 执行层人机交互控制技术	110
7.5 柔性外骨骼人机任务智能分配	111
7.6 人机交互控制稳定性研究	113
7.7 外骨骼控制组网技术	114
第8章 感知型上肢遥操作柔性外骨骼系统集成	117
8.1 系统概述	117
8.2 上肢柔性外骨骼系统结构优化	118
8.3 主从异构机械手运动匹配研究	124
8.4 上肢柔性外骨骼气动力反馈控制	134
8.5 基于多事件的主从机械手力反馈双向遥操作协调控制	145
第9章 增力型下肢运动康复柔性外骨骼系统集成	155
9.1 下肢运动康复外骨骼系统结构实现	155
9.2 下肢运动康复训练外骨骼控制系统实现	161
9.3 下肢运动康复柔性外骨骼系统实验研究	172
参考文献	179
索引	191
后记	195

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着 18 世纪工业革命的兴起以及 20 世纪中叶控制理论的繁荣,智能系统的出现,如人工智能系统(artificial intelligent system, AI)、人机智能系统(man-machine intelligent system)、计算智能系统(computer intelligent system)等,极大地推动了科学技术的进步并衍生出形式多样的智能控制技术。但在美国斯坦福大学的 Lenat 教授和 Feigenbaum 教授,以及麻省理工大学的 Sheridan 教授^[1]分别于 1991 年和 1992 年提出了人机智能系统,研究人与智能计算机之间的关系以及两者构成的人机系统理论之后,学者对于自动化系统中人的因素的关注变得越来越机敏。中国科学院自动化研究所的戴汝为教授^[2]于 1994 年提出了人机综合集成思想。同年,浙江大学路甬祥教授、陈鹰教授等^[3~5]提出了人机一体化理论,即采用以人-机器系统为一体的技术路线,人与机器处于平等合作的地位,各自执行自己最擅长的工作,人与机器共同认知、共同感知、共同决策、共同工作,从而突破传统的“人工智能系统”的概念,形成达到甚至超过人的能力乃至智力的“超智能”系统^[6,7]。这些人机智能系统理论的出现使人机系统中的两个不同的智能个体——人与机器的功能发生了根本的变化。

人机系统工程中智能的发展大致可以归结为图 1-1 所示的三个阶段。阶段 A

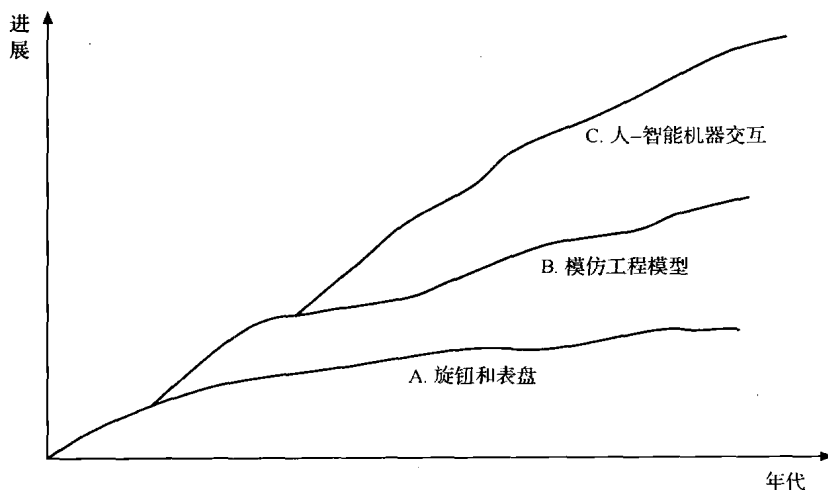


图 1-1 人机系统中智能的发展历史^[8]

指的是传统的机械人体工程学;阶段 B 指的是第二次世界大战后出现的信息处理、信号检测和受控的定量性能模型的使用;阶段 C 指的是如今正在发生的各种各样的人与智能机器的交互作用。由图可见,阶段 A 和阶段 B 起初急剧增长,然后逐渐减缓但仍在继续发展。计算机技术的发展提供了丰富多彩的人机之间的接口形式,人与智能机器之间的交互也随之变为人与计算机的交互,阶段 C 开始迅速地发展。机器人是人们所熟知的最高层次的人机智能交互系统之一。起初,机器人的发展只是为了能够在工业环境中替代人从事一些单一的、重复的且具有高精度要求的工作,但在今日的发展中,人与机器人的交互已经不再是简单的信息交换,而是希望能够建立物理、感知、辨识等层面上的人机双向交互。

柔性外骨骼技术的出现,为人机智能系统突破人机耦合这个瓶颈提供了契机。柔性外骨骼可以穿戴在人身上,可以跟随穿戴者的运动实现某些动作,或者增强穿戴者相应肢体的机能,辅助完成某些功能。它和穿戴者之间信息的耦合交流是双向的、多媒介的,同时能够有效地和其他耦合方式集成,扩展柔性外骨骼的信息耦合渠道。

1.2 柔性外骨骼人机智能系统的概念

柔性外骨骼(flexible exoskeleton)技术来源于生物学中的外骨骼概念,外骨骼可释义为:为生物提供保护和支持的坚硬的外部结构,例如软体动物的介壳,虾、蟹、昆虫等的甲壳等(如图 1-2)。对于这些动物,外骨骼往往具有至关重要的作用^[1,9]:



图 1-2 生物界的典型外骨骼

(1) 支撑身体,使动物具有各种各样的形态。坚硬的外壳具有一定的机械承载能力,能够支持动物的躯体,并承受各种活动——捕食、躲避敌人等——中遭受的冲击和负载。

(2) 保护身体的重要器官。由于外骨骼坚硬外壳的保护,具有外骨骼的生物能够有效地降低外界环境变化对自身的影响,并在遭受意外攻击时提供相当于盔甲的保护作用。

(3) 运动辅助功能。大多数的节肢动物拥有的外骨骼系统都十分复杂,能够提供敏捷的运动能力,典型的例子包括蟹、蜘蛛等。

(4) 感知环境的媒介。由于外骨骼紧紧包裹着生物的躯体,外骨骼成为生物体感知环境的重要媒介,许多重要的感觉器官都是附着在外骨骼上的,例如昆虫的呼吸器官、视觉器官、触觉器官等。

基于生物外骨骼的这些特点,柔性外骨骼人机智能系统逐渐得到了学者的关注。表 1-1 对比了生物界外骨骼与柔性外骨骼技术的特点。柔性外骨骼实质上可以理解为是一种模仿生物界的外骨骼而开发的新型机电一体化装置,可穿戴在身体外部,为穿戴者提供诸如保护、身体支撑、运动辅助、信息融合等功能。

表 1-1 柔性外骨骼人机智能系统与动物外骨骼的比较

功 能	动物外骨骼	人机智能柔性外骨骼系统	应用领域
身体支撑	支撑无脊椎动物 柔软的身体	支撑肢体残疾患者; 提高人体的负重能力	辅助医疗、助力步行器、 负重机器人等
运动辅助	能够使动物具有快 速敏捷的运动能力	能够扩展穿戴者的运动 能力和运动范围	军事装备、助力步行器、 辅助医疗等
保 护	保护外骨骼内 柔软的身体	保护穿戴者,以免受伤	军事装备、核废料收集、 救援装备等
信息融合	通过外骨骼上的感 知器获取外界信息	通过安装在柔性外骨骼上的各 种传感器获取外界或者穿戴者 自身的众多信息,并加以融合	机器人主从控制,实验装备、 军事装备等

从图 1-3 所示的柔性外骨骼人机智能系统的基本控制结构图可以知道,在结合了传感、控制、信息融合、移动计算等机器人技术之后,柔性外骨骼人机智能系统并非简单地给系统添加人工智能或者决策能力,而是借鉴人机智能系统理论^[6],有效地将人和机器在感知、决策以及执行等多个层次上进行有机地结合,充分考虑穿戴者的智能在整个任务操作过程中的作用,同时也充分发挥了机器的执行能力,通过人机之间的物理交互(physical human-robot interface, pHRI)和感知交互(cognitive human-robot interface, cHRI),起到相辅相成的作用,使得柔性外骨骼能够在穿戴者参与的控制模式下完成仅靠穿戴者或者外骨骼自身能力无法单独完成的任务^[9]。

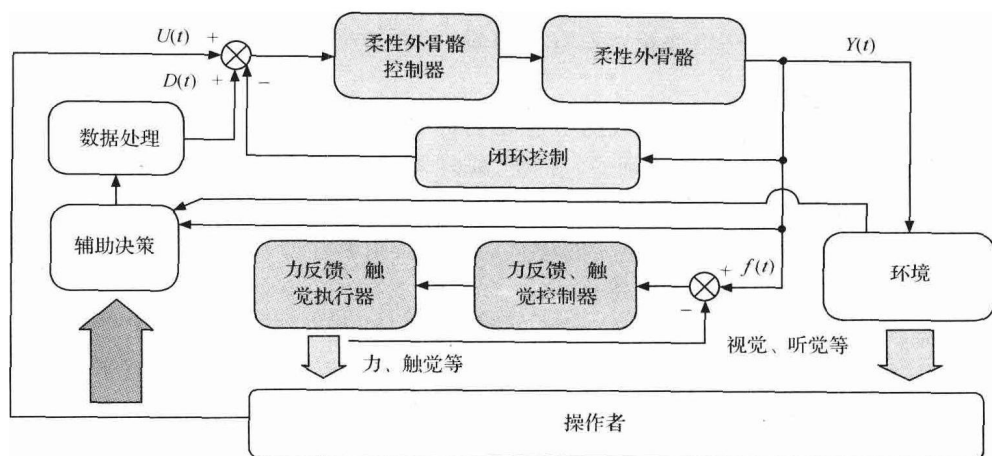


图 1-3 柔性外骨骼人机智能系统的基本控制结构

与传统的人工智能机器系统相比,穿戴者不仅仅是智能机器控制命令的发布者或监督者,而是成为控制回路中的一个积极因子。外骨骼的控制系统中,穿戴者,也就是人,也成为控制系统中的一个组成部分,即“人在回路中(man in loop)”。一方面,穿戴者为外骨骼系统提供系统所需的目标参数相关的信息;另一方面,穿戴者充当了控制系统的一个重要的反馈角色,接收环境对其的反馈信息,并做出修改控制目标的决策。由于柔性外骨骼和穿戴者机械耦合的紧密性,这种基于刺激—反应模式的操作方法更适合人本身对外界信息处理的规律,穿戴者在控制外骨骼的时候更加自然、快速,控制过程更加流畅。

穿戴者与外骨骼之间的信息相互反馈包括了感知和物理双重的交互。在人机物理交互层面上,主要通过外骨骼执行能力来增强人的机能;而在感知交互层面上,利用人的智能实现高层次的控制,提高系统的智能程度。这两个层面彼此之间是相互关联的,人与外骨骼之间的物理交互往往影响着感知交互信息,而人与外骨骼之间的感知交互又决定着彼此间的物理交互方式。

因此,人的参与提高了系统的智能程度,提升了智能系统对复杂环境的适应能力,而外骨骼又拓展了人的执行能力,人机之间的优势得到了充分的互补。例如:美国多个研究机构正在研制的外骨骼单兵作战系统^[10,11],士兵在柔性外骨骼的帮助下可以携带更多更重的武器和补给设备,作战和防护能力以及运动机能得到很大程度的提升,而士兵本身的战场判断能力和运动灵活性却丝毫不受影响。

柔性外骨骼人机智能系统可以界定为一种典型的人机一体化智能系统。通过对柔性外骨骼人机智能系统的研究,为开展人机一体化理论及应用提供了一个非常好的平台,可以从基础理论和应用实践技术上丰富人机一体化智能系统这一新

的科学技术。

1.3 本书的主要内容

柔性外骨骼是一种可穿戴式的机电智能系统,可跟随穿戴者的动作获取运动信息,或者通过柔性外骨骼自身的动力装置起到增强穿戴者身体机能的作用。柔性外骨骼系统与穿戴者之间在感知、决策和执行层面信息的自然交互,保证了系统与人之间相互协调、相互合作,提升了系统的整体性能。

本书将对柔性外骨骼系统在仿生结构、运动学及动力学模型、人机感知与决策融合、人机系统控制等方面的关键技术,逐步展开介绍。

在第2章中主要根据柔性外骨骼系统的两大类型——感知型柔性外骨骼系统和增力型柔性外骨骼系统,介绍柔性外骨骼技术的发展历史。

第3章“人体关节运动机理”主要对人体运动关节的运动机理、力学性能进行研究,并对现有的仿生关节结构及执行器技术进行分析,为柔性外骨骼拟人化设计提供支撑。

第4章“柔性外骨骼人机智能系统运动学及动力学”介绍了如何利用多刚体运动学及动力学方程对柔性外骨骼系统的运动学及动力学进行建模的方法。

第5章对柔性外骨骼系统拟人化设计、安全性设计等主要的设计原则进行阐述,并列举了6自由度上肢遥操作外骨骼、4自由度下肢增力型外骨骼以及3自由度踝足关节柔性外骨骼等3个结构设计实例。

在第6章“人体信息感知、决策与运动控制系统模型”中将分别对人体的信息感知、信息融合、信息决策以及运动控制机理进行研究,并对人与柔性外骨骼在感知、决策及执行层面的交互在技术基础层面上所需的人体生物信号测量分析技术、多感知器信息融合技术等进行介绍。

第7章“柔性外骨骼人机智能系统控制系统”将对柔性外骨骼研究中的智能控制技术(包括:人机合作的任务分配、人机交互控制等相关技术)的成果和发展进行归纳,着重对本书系统实现中所详细介绍的感知型上肢遥操作柔性外骨骼和增力型下肢柔性外骨骼系统的控制策略进行介绍。

在第8章和第9章中,分别通过感知型上肢柔性外骨骼在机械手力反馈双向遥操作控制和增力型下肢运动康复柔性外骨骼两个具体实例,对包括机械系统实现、系统软硬件搭建、控制策略研究等几个方面的内容进行具体介绍。

第2章 柔性外骨骼人机智能系统的发展

在与自然界的长期斗争中,人类个体由于受自身条件的限制显然处于极为不利的地位,人类迫切地希望能够通过某种方式提高人类个体的能力。古代士兵所穿着的盔甲可以认为是人类历史上最早的外骨骼,尽管粗糙,却能有效地提升个人的防御能力。进入20世纪后,随着工业技术的快速发展,结合了机电、控制、生物、传感、信息融合、材料等技术的柔性外骨骼理论及应用技术已经成为人机一体化思想理论中的重要组成部分,越来越受到学术界和工业界的关注。

20世纪60年代,来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的一份报告以“大规模”探索宇宙空间为目标详细介绍了“人机之间亲密的伙伴关系”的发展背景,并把遥操作机器人系统定义为四个部分:驱动器、传感器、控制器和通信子系统。并指出如果有一种机电装置能够突破人类的灵巧身手与呆板的机器人驱动器之间的障碍,那么通过人机之间的双向控制就能增强普通人的能力^[12]。该报告还介绍了NASA的“负重机器人(Human Amplifier)”计划,该计划试图通过结合士兵矫健的身手和机器人能够承受大负载的能力来提高普通士兵的作战能力。由于当时技术条件的限制,该研究项目没有取得预期的成功。

总的来说,人机智能柔性外骨骼系统的发展大致可以分为如下三个阶段:在20世纪90年代以前,柔性外骨骼系统主要用于机械手遥操作^[13~15]、人体上肢及手指姿态测量^[16~18]以及肢体残障人士的简单康复训练^[19,20]。进入20世纪90年代后,力反馈和触觉反馈逐步引入机械手的遥操作中,给了穿戴者一种临场操作的感觉,增加了操作的直观性,这也标志着柔性外骨骼技术的发展进入了一个新的阶段。在这个阶段中,柔性外骨骼得到了前所未有的快速发展,开始广泛地应用于肌体增强、虚拟现实、运动康复等方面。目前人机智能柔性外骨骼系统正朝着专用化、功能化、实用化和集成化的方向发展。

2.1 柔性外骨骼人机智能系统的分类

柔性外骨骼人机智能系统根据不同的划分标准可以进行不同的分类。根据柔性外骨骼所对应的人体穿戴部位,可分为上肢柔性外骨骼^[22~25]、下肢柔性外骨骼^[26]、腰部柔性外骨骼^[27,28]以及形式多样的运动关节柔性外骨骼系统^[29~31]等,如图2-1所示。柔性外骨骼的设计通常依据能够适应所穿戴关节的运动及功能为准

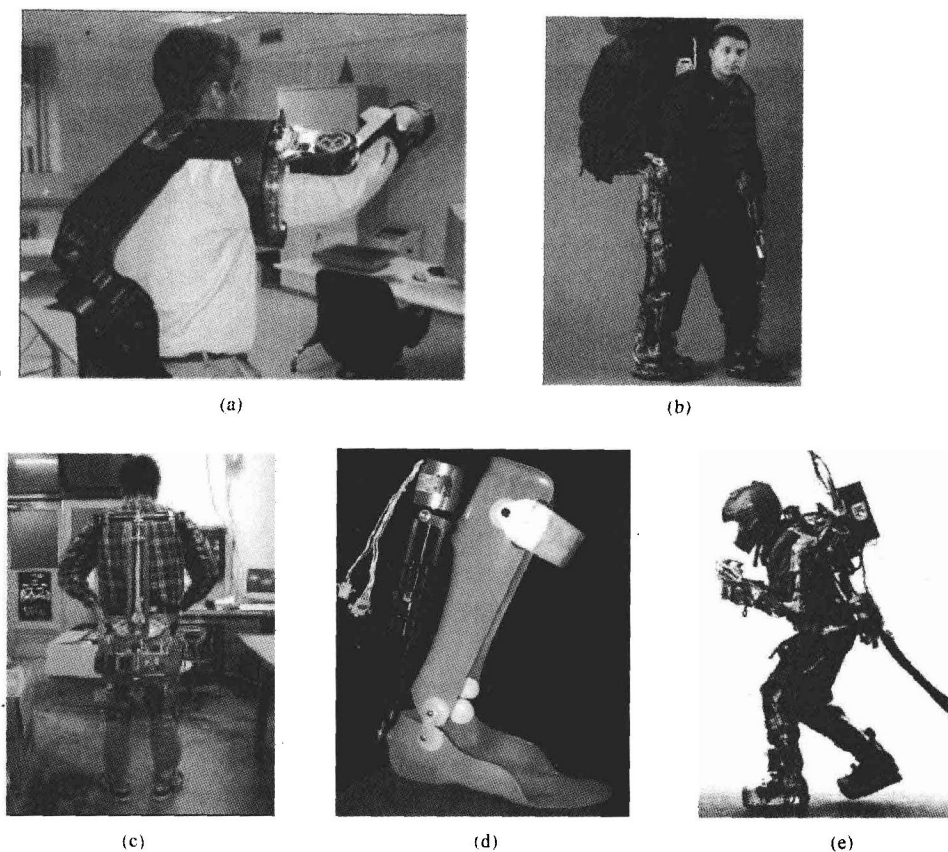


图 2-1 人体不同穿戴部位的柔性外骨骼系统

(a) 上肢柔性外骨骼^[21]; (b) 下肢柔性外骨骼^[26]; (c) 腰部柔性外骨骼^[27];
(d) 踝足关节柔性外骨骼^[32]; (e) 全身型柔性外骨骼^[33]

则,例如:人体上肢的主要功能是操作,因此,柔性外骨骼设计中需要完整地包含肩、肘、腕关节以及上臂、前臂和手掌等运动学元素,以兼容人体上肢多自由度柔性操作的特性;而人体下肢主要承担站立、保持平衡、行走等功能,结构运动比人体上肢相对要简单一些,但由于下肢需要承受人体的重量,因此所设计的双下肢柔性外骨骼需要有较大的关节输出力矩。

根据所选用的驱动器的不同,柔性外骨骼可分为伺服电机柔性外骨骼^[25,34,35]、液压柔性外骨骼^[26,36]、气动柔性外骨骼^[24,29,37,38]以及新型驱动器柔性外骨骼等。参见图 2-2。伺服电机因其易安装、易控制、易与机电系统集成、安全可靠等优点,成为柔性外骨骼驱动器的首选。但电机驱动器的缺点也十分明显,首先,由于电机自身只能产生较小的力矩,需要齿轮减速器来进行力矩放大,由此引入的回差和摩

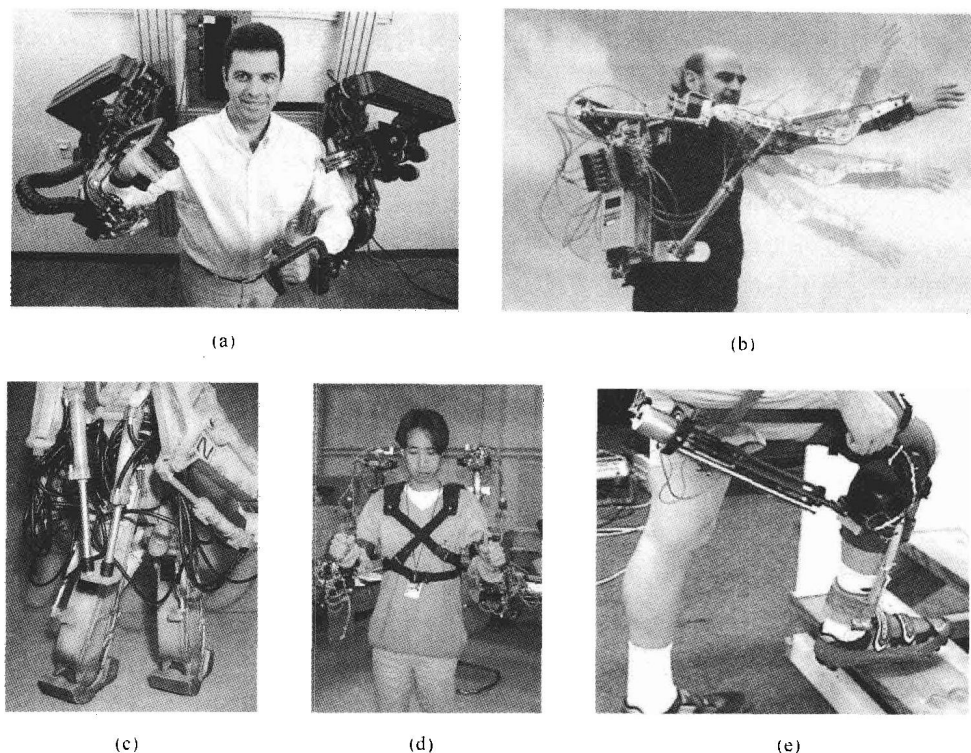


图 2-2 不同驱动器的柔性外骨骼系统

(a) 伺服电机柔性外骨骼^[21]; (b) 气动柔性外骨骼^[39]; (c) 液压柔性外骨骼^[36];
(d) 电磁刹车柔性外骨骼^[23]; (e) 弹性驱动器柔性外骨骼^[44]

擦损失,会对系统的控制性能造成影响;其次,由于电机在一定程度上属于输出功率重量比较小的驱动器,往往需要采用重力补偿方法来消除因电机重量对穿戴者舒适性的影响;另外,需要充分地考虑电机在恒力矩输出模式下的散热问题。液压柔性外骨骼利用 15~25 MPa 的液压系统作为柔性外骨骼的驱动器,具有高频响、大功率重量输出比、较好的位置刚度等优点,但是液压驱动器结构复杂、易泄漏、成本高,而且需要额外的高压安全保护装置。包括气缸、气动肌肉在内的气动驱动器相对于伺服电机和液压驱动器具有轻便、干净、结构简单、价格便宜、高输出功率重量比等优点,但由于气体的可压缩性,气动驱动器位置控制精度较低,系统响应也较差。目前,随着新型驱动器技术的发展,柔性外骨骼系统上的驱动器已不再局限于上述的传统驱动器,许多具有较高输出功率重量比的新型驱动器逐步应用于柔性外骨骼系统,如:电滞、磁滞驱动器^[40,41],聚合凝胶驱动器^[42],弹性驱动器^[43,44]以及电磁刹车驱动器^[23,45]等。其中,电磁刹车驱动器与一般的主动驱动器不同,它

并不依靠外界供给能量转换为柔性外骨骼系统的关节动力,而是通过吸收穿戴者带动外骨骼关节运动所产生的能量产生柔性外骨骼关节的运动阻力,作为力反馈执行器。

最后,根据柔性外骨骼系统不同的用途和实现的不同功能,又可以分为遥操作柔性外骨骼系统^[46,48,49]、增力型柔性外骨骼系统^[48,50,51]、运动康复型柔性外骨骼系统^[52,53]、医学柔性外骨骼系统^[54~56]以及娱乐型柔性外骨骼系统等。参见图 2-3。在遥操作柔性外骨骼系统中,柔性外骨骼主要起着感知的作用,获取穿戴者肢体的运动信息。为了提高遥操作时的真实感,在遥操作柔性外骨骼系统中还增加了力反馈或者触觉反馈等信息。增力型柔性外骨骼系统主要起着增力的作用,通过柔性外骨骼上的驱动器给穿戴者提供额外的动力,增强穿戴者的机能,辅助穿戴者完成其力所不能及的任务。这类柔性外骨骼系统常常需要对穿戴者的运动进行预测控制。在运动康复型柔性外骨骼系统中,根据所采用的主动、被动等不同的控制策略,柔性外骨骼也起着增力或感知的作用。例如:运动康复型柔性外骨骼系统可以

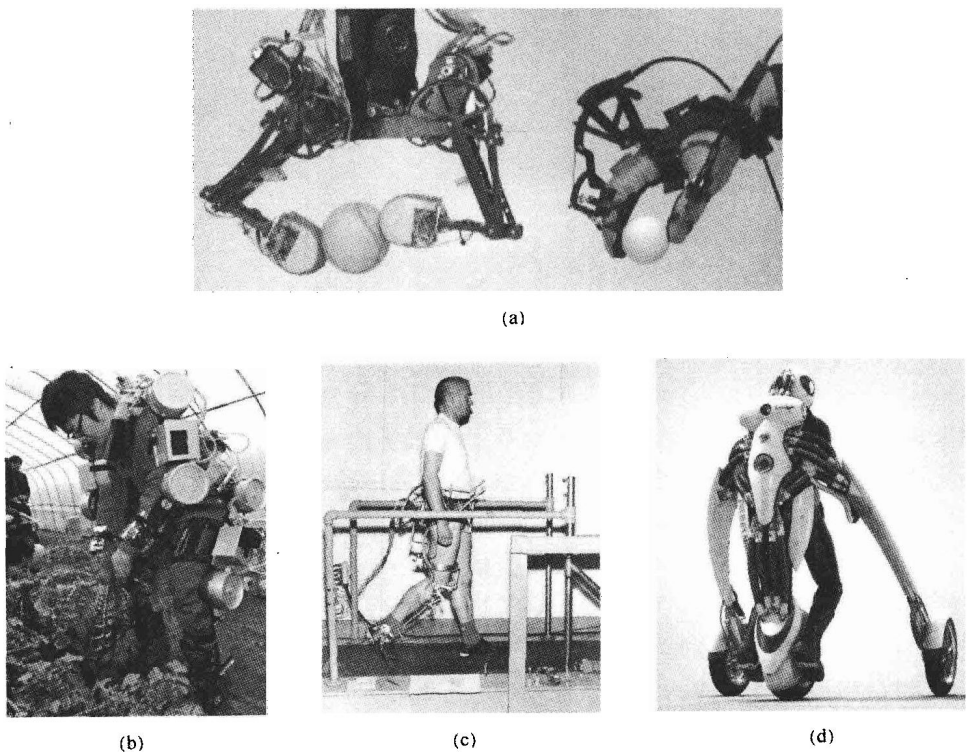


图 2-3 不同用途的柔性外骨骼系统

- (a) 遥操作柔性外骨骼^[47]; (b) 增力型柔性外骨骼^[60];
(c) 运动康复型柔性外骨骼^[59]; (d) 娱乐型柔性外骨骼^[58]