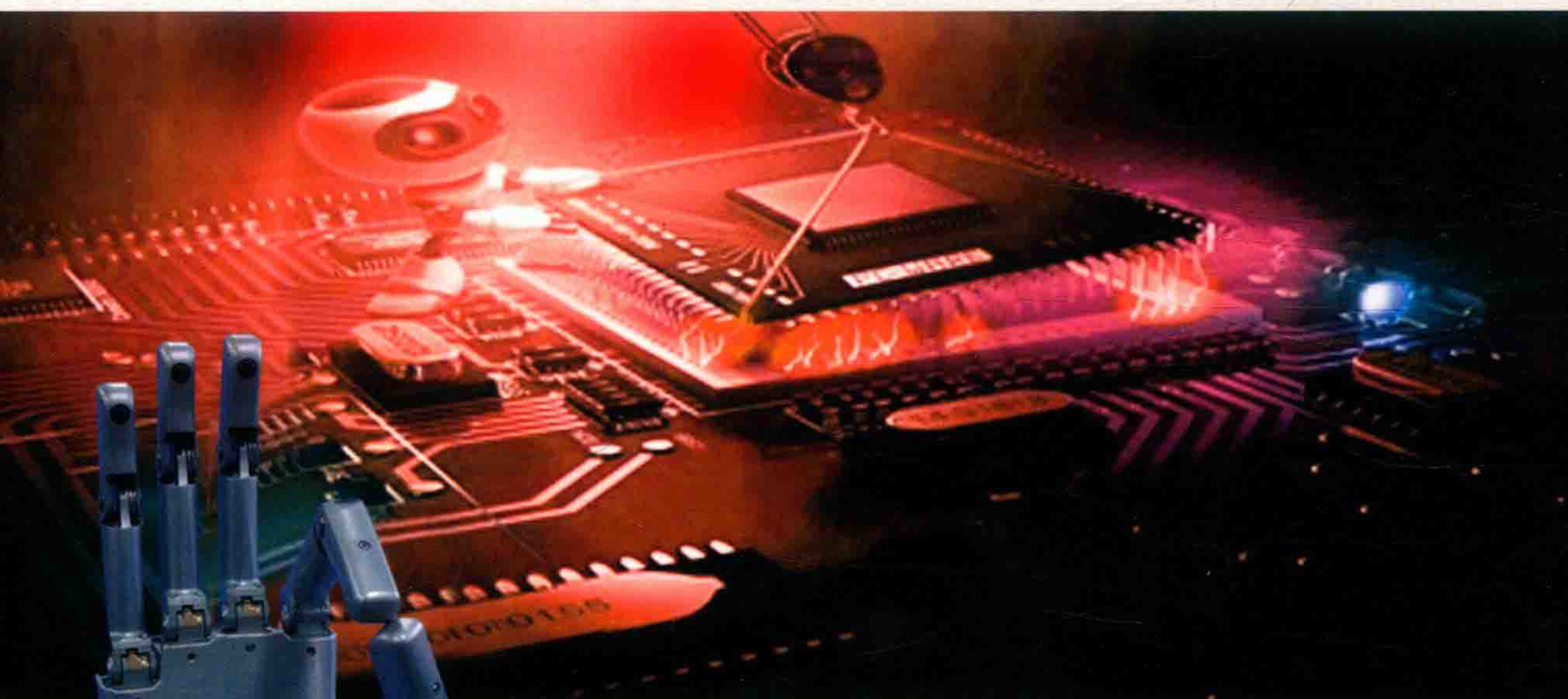




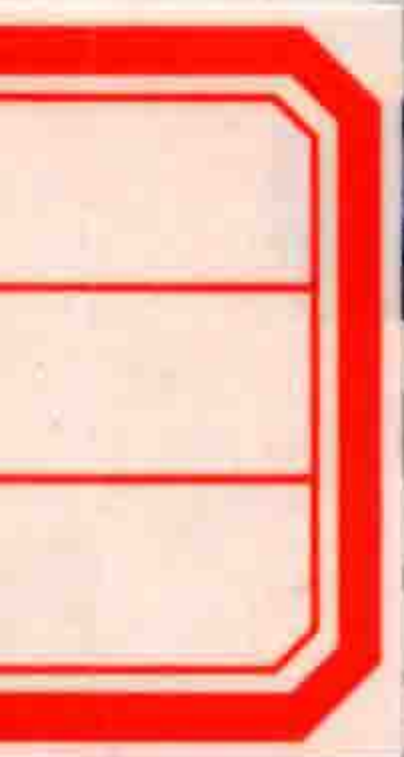
工业和信息化部“十二五”规划专著
“十二五”国家重点图书出版规划项目
机器人先进技术与研究应用系列

仿人型假手及其生机交互控制

Anthropomorphic Hand Prosthesis and Bio-machine Interactive Control



◎ 刘 宏 杨大鹏 姜 力 赵京东 著



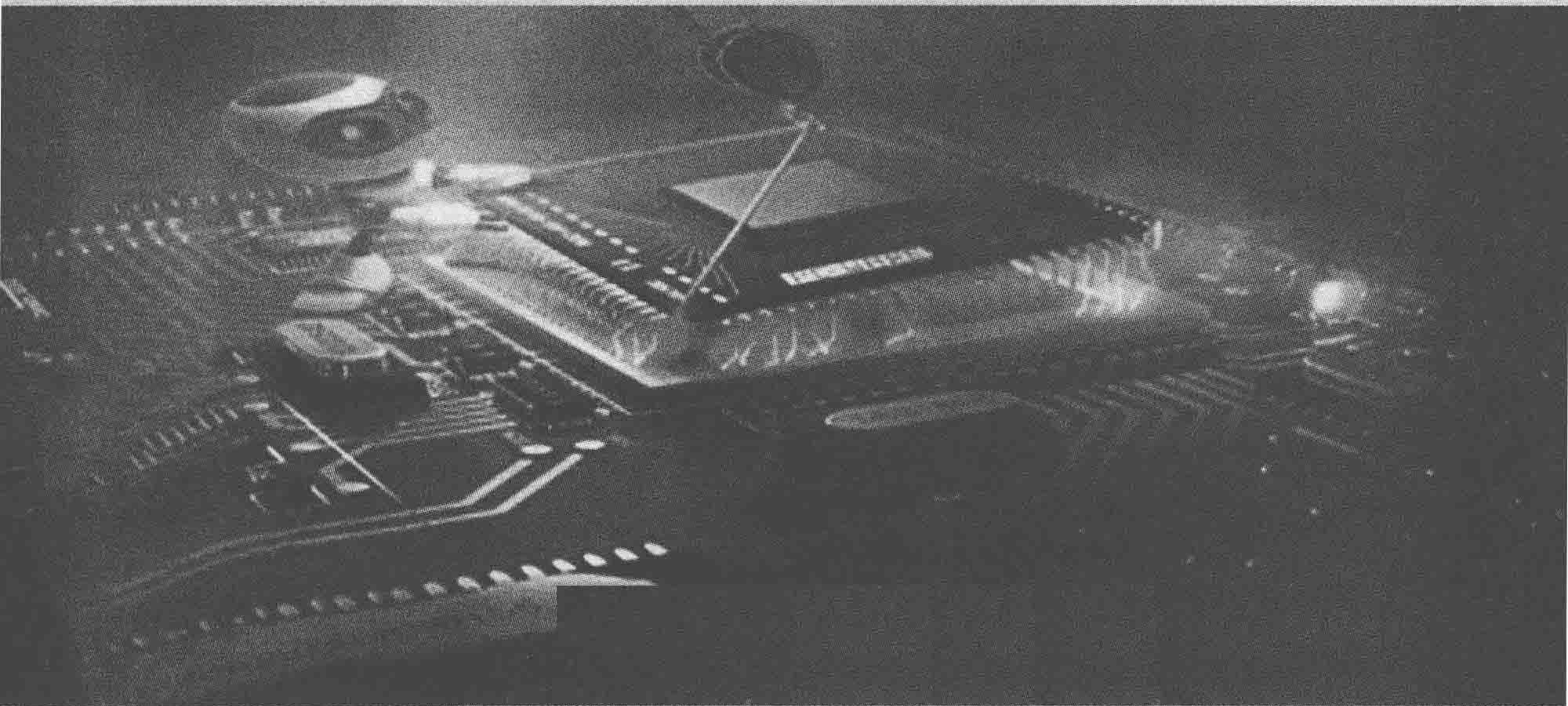
哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划专著
“十二五”国家重点图书出版规划项目
机器人先进技术与研究应用系列

仿人型假手及其生机交互控制

Anthropomorphic Hand Prosthesis and Bio-machine Interactive Control



© 刘 宏 杨大鹏 姜 力 / 赵京东 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

仿人型假手是一种主要面向残疾人康复的机电一体化装置,融合了生物医学、机器人学、计算机学及控制学等多个学科的相关技术。本书在综述国内外典型灵巧型假手案例的基础上,以自行研制的仿人型假手为例,详细介绍了仿人型假手的机械创成方法、传感系统设计、控制系统设计、肌电控制方法、电刺激反馈策略及具体的生机交互控制实验等内容。

本书对智能假肢及其控制方法的研究具有一定的借鉴意义,可供从事机械工程、生物、人工智能等交叉学科研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

仿人型假手及其生机交互控制/刘宏等著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.3
ISBN 978-7-5603-5709-6

I. ①仿… II. ①刘… III. ①机械手-人-
机系统-研究 IV. ①TP241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 278595 号

策划编辑 王桂芝 张 荣
责任编辑 刘 瑶 王桂芝
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15.5 字数 374 千字
版 次 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-5709-6
定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

机器人先进技术与研究应用系列

编 审 委 员 会

名誉主任 蔡鹤皋

主 任 邓宗全

副 主 任 刘 宏 赵 杰 孙立宁

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 亮	王乐锋	王立可	王 扬	付宜利	朴松昊
朱延河	纪军红	刘云辉	刘伊威	刘 宇	刘延杰
刘英想	刘荣强	刘彦武	杜志江	李立毅	李满天
李瑞峰	杨大鹏	杨立军	杨利芳	吴伟国	陈维山
张立宪	张永安	邹继斌	尚 静	岳洪浩	金弘哲
金明河	郑 萍	孟庆虎	赵立军	赵京东	荣伟彬
胡平安	段广仁	姜 力	徐文福	高会军	高海波
郭 伟	陶建国	韩俊伟	董 为	谢宗武	谢 晖
樊绍巍					

序

机器人技术是涉及机械电子、驱动、传感、控制、通信和计算机等学科的综合性高新技术,是光、机、电、软一体化研发制造的典型代表。随着科学技术的发展,机器人的智能水平越来越高,由此推动了机器人产业的快速发展。目前,机器人已经广泛应用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、医疗卫生行业、橡胶及塑料行业、食品行业、物流和制造业等诸多领域,同时也越来越多地应用于航天、军事、公共服务、极端及特种环境下。机器人的研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志,是推进传统产业改造升级和结构调整的重要支撑。

习近平总书记在2014年6月9日两院院士大会上,对机器人发展前景进行了预测和肯定,他指出:我国将成为全球最大的机器人市场,我们不仅要把我国机器人水平提高上去,而且要尽可能多地占领市场。习总书记的讲话极大地激励了广大工程技术人员研发机器人的热情,预示着我国将掀起机器人技术创新发展的新一轮浪潮。

随着中国人口红利的消失,以及用工成本的提高,企业对自动化升级的需求越来越迫切,“机器换人”的计划正在大面积推广,2014年中国已经成为世界年采购机器人数量最多的国家,更是成为全球最大的机器人市场。为了反映和总结我国机器人研究的成果,满足机器人技术开发科研人员的需求,我们撰写了《机器人先进技术与研究应用系列》著作。

本系列图书总结、分析了国内外机器人技术的最新研究成果和发展趋势,主要基于哈尔滨工业大学在机器人技术领域的研究成果撰写而成。系列图书的许多作者为国内机器人研究领域的知名专家和学者,本着“立足基础,注重实践应用;科学统筹,突出创新特色”的原则,不仅注重机器人相关基础理论的系统阐述,而且更加突出机器人前沿技术的研究和总结。本系列图书重点涉及空间机器人技术、工业机器人技术、智能服务机器人技术、医疗机器人技术、特种机器人技术、机器人自动化装备、智能机器人人机交互技术、微纳机器人技术等方向,既可作为机器人技术研发人员的技术参考书,也可作为机器人相关专业学生的教材和教学参考书。

相信本系列图书的出版,必将对我国机器人技术领域研发人才的培养和机器人技术的快速提高起到积极的推动作用。

中国工程院院士

2016年5月

前言

仿人型假手是一种主要面向残疾人康复的生机电一体化装置,融合了生物医学、机器人学、计算机学及控制学等多个学科的相关技术。

我国具有庞大数量的残疾人人口,如何解决残疾患者的运动功能康复,切实提高其生活质量,已成为不可回避的社会问题。传统单自由度商业假肢很难满足残疾人实际生活的需要,尤其难以应对较为复杂、灵巧的操作。研究表明,低灵巧性、非直观的控制及匮乏的感知能力是目前商业假手市场接受度较低的主要原因。因此,对于新型仿人型假手设计,不仅要求具有灵巧的自由度和多方位的感知能力(如位置、力觉、触觉等),同时,还需要直观的生物电控制通道及高效的感知反馈通道。本书在综述了国内外典型灵巧型假手设计的基础上,以自行研制的仿人型假手为例,介绍了仿人型假手的机械创成方法、传感系统设计、控制系统设计、肌电控制方法、电刺激反馈策略及具体的生机交互控制实验。

全书共分8章:第1章绪论,主要介绍仿人型假手的发展历程、代表性成果及多种驱动、感知、生机交互方法;第2章人手解剖学知识及其功能,主要介绍人手的运动功能、肌肉分布、神经控制及感知反馈回路;第3章仿人型假手的驱动和机构,主要介绍欠驱动、耦合驱动原理及拟人性设计;第4章仿人型假手的电气系统,主要介绍假手的驱动单元模块化设计、感知系统集成化设计及控制系统的层次化;第5章仿人型假手的运动控制,主要介绍假手关节位置控制、阻抗力矩控制、自适应阻抗力跟踪控制等方法;第6~8章则围绕仿人型假手的生机交互系统,分别探讨肌电假手的姿态控制、抓取控制及电刺激感知反馈策略。

本书主要由刘宏、杨大鹏、姜力和赵京东撰写并统稿。其中,刘宏、杨大鹏、姜力撰写第1章,杨大鹏、刘源撰写第2章,刘宏、赵京东、王新庆、樊绍巍、黄海撰写第3章,刘宏、姜力、李楠、张庭撰写第4章,姜力、王新庆、赵大威撰写第5章,杨大鹏、赵京东、顾义坤撰写第6章,杨大鹏、王新庆撰写第7章,杨大鹏、姜力、黄琦撰写第8章。

本书相关工作得到以下项目支持:国家“973计划”项目“操作感知一体化灵巧假肢设计制造与性能评估”(项目编号:2011CB013306),国家“863计划”项目“高性能仿人型假手”(项目编号:2009AA043803),国家自然科学基金项目“融合增强学习机制的智能假肢肌电控制方法”(项目编号:51205080)。樊绍巍、顾义坤、黄琦、刘源、王新庆、李楠、黄海、赵大威、张庭等参与了本书相关内容的研究工作,刘源、黄琦、张华杰参与了本书的编辑校对工作,蔡鹤皋院士审阅了本书的全部文稿。

作为国内生机电一体化假手的第一本专著,本书密切结合作者在仿人型假手研究方面

取得的成果,注重理论联系实际,力求对假手设计及生机交互方法进行全面、系统的介绍,具有鲜明的多学科交叉特色,有助于推动我国高性能假肢装备的产业化进程,促进机械工程学科与生物学科、人工智能学科的交叉融合,发展新兴人机控制界面和生机交互方法。

通过本书,读者将获取国际及国内多自由度假手设计的全面资料,对其开展的智能假肢及其控制方法的研究具有一定的借鉴意义。

限于作者水平,书中难免存在疏漏及不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2017 年 1 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 仿人型假手的发展历程	1
1.2 仿人型假手的代表性成果	3
1.3 仿人型假手的驱动	8
1.4 仿人型假手的感知	10
1.5 仿人型假手的生机交互	13
1.5.1 神经控制	14
1.5.2 感知反馈	22
1.5.3 小结	25
知识拓展	26
本章小结	27
参考文献	28
第2章 人手解剖学及其功能	40
2.1 人手的运动功能	40
2.1.1 人手骨骼的结构	40
2.1.2 人手运动的特点	40
2.1.3 人手的自由度	42
2.1.4 人手骨关节功能解剖学	43
2.2 人手功能性肌肉分布	45
2.2.1 拇指功能性肌肉	46
2.2.2 其余4指功能性肌肉	47
2.2.3 前臂功能性肌肉	49
2.3 人手的感知功能	50
2.4 人手的神经控制及感知反馈回路	51
2.4.1 肌肉的神经支配	51
2.4.2 人手皮肤感觉神经分布	51
2.4.3 人手感知反馈回路	52
2.5 人手的基本抓取及运动模式	53
知识拓展	57
本章小结	58
参考文献	58
第3章 仿人型假手的驱动和机构	62
3.1 欠驱动和耦合驱动	62
3.2 HITAPH III的欠驱动机构	63

3.2.1	假手的总体结构	63
3.2.2	假手4指机构设计	64
3.2.3	拇指机构设计	66
3.2.4	欠驱动假手的运动学分析	70
3.3	HITAPH IV的耦合驱动机构	77
3.3.1	假手的总体结构	77
3.3.2	假手4指机构设计	79
3.3.3	拇指机构设计	79
3.3.4	耦合假手的静力学及动力学分析	82
3.4	拟人性及外观设计	89
	知识拓展	91
	本章小结	92
	参考文献	92
第4章	仿人型假手的电气系统	94
4.1	驱动单元的模块化	94
4.2	感知系统的集成化	95
4.2.1	位置感知器	96
4.2.2	力矩感知器	97
4.2.3	触觉感知器	98
4.3	控制系统的层次化	105
4.3.1	运动控制单元	106
4.3.2	人机交互控制单元	110
	知识拓展	111
	本章小结	112
	参考文献	113
第5章	仿人型假手的运动控制	114
5.1	手指关节位置控制	114
5.1.1	非线性跟踪微分器	115
5.1.2	扩张状态观测器	117
5.1.3	非线性PID控制器	120
5.1.4	自抗扰控制器	121
5.2	手指阻抗控制	123
5.2.1	阻抗控制结构	124
5.2.2	基于位置的阻抗控制	124
5.2.3	基于力的阻抗控制	125
5.2.4	基于自抗扰位置控制器的阻抗控制	126
5.3	自适应阻抗力跟踪控制	127
5.3.1	环境接触模型	128
5.3.2	阻抗力跟踪	129

5.3.3 广义动量扰动观测器	130
5.3.4 动力学参数的等效转化	131
5.3.5 间接自适应参数估计	132
5.3.6 模糊 PD 位置控制器	133
5.4 假手控制实验	135
5.4.1 轨迹跟踪实验	135
5.4.2 阻抗控制实验	136
5.4.3 自适应阻抗力跟踪控制实验	137
知识拓展	139
本章小结	141
参考文献	141
第 6 章 假手生机交互——姿态控制	144
6.1 手部姿态的规划	144
6.1.1 正常人手的自由度	144
6.1.2 人手自由度简化及模式规划	144
6.2 基于稳态肌电的人手姿态识别	146
6.2.1 稳态肌电信号的采集	147
6.2.2 肌电特征提取及分类	149
6.3.3 姿态模式识别	151
6.3 基于复合决策的人手动作识别	152
6.3.1 复合决策规则	152
6.3.2 阈值控制	154
6.4 EMG 动态训练范式	154
6.4.1 复合决策的实验验证	155
6.4.2 波动式动态训练方法	157
6.5 假手姿态肌电控制实验	159
6.5.1 虚拟假手控制实验	159
6.5.2 嵌入式假手控制实验	160
6.5.3 截肢患者实验	162
知识拓展	165
本章小结	167
参考文献	167
第 7 章 假手生机交互——抓取控制	173
7.1 基于肌电的分层控制策略	173
7.2 信号采集及预处理	175
7.2.1 力信号的采集及预处理	175
7.2.2 肌电信号的采集	175
7.2.3 肌电信号的融合	177
7.2.4 特征提取及选择	178

7.2.5 实验设置	179
7.3 基于肌电的抓取模式识别	180
7.4 基于肌电的抓取力预测	181
7.4.1 抓取力预测模型的建立	181
7.4.2 多变量参数优化	182
7.4.3 算法的在线实现	184
7.4.4 抓取力预测结果	184
7.5 抓取力预测方法的适应性及实用性分析	188
7.6 基于肌电的多指抓取实验	189
7.6.1 抓取力分配	189
7.6.2 骨骼算法计算抓取点	191
7.6.3 3 指抓取实验及结果	192
知识拓展	193
本章小结	197
参考文献	197
第 8 章 假手生机交互——电刺激反馈	200
8.1 电刺激感知反馈原理	200
8.2 电刺激感知反馈通道	202
8.2.1 电刺激器	202
8.2.2 电刺激电极	205
8.2.3 电刺激反馈参数	206
8.3 肌电控制与电刺激反馈	210
8.3.1 电刺激反馈干扰的抑制	210
8.3.2 假手控制双向信息交互	213
8.4 基于电刺激的假手握力感知反馈实验	216
8.5 仿生假手交互控制抓取实验	217
8.5.1 无视觉反馈下的物体抓取实验	217
8.5.2 易碎物体抓取实验	220
知识扩展	221
本章小结	225
参考文献	225
名词索引	229

第1章 绪论

本章要点:假手是应用于截肢患者手部运动功能重建的一种康复机器人,涉及生物学、机械学、电子学、仿生学及计算机科学等多门学科。本章从仿人型假手的发展历程展开论述,主要讨论全球范围内先进假手的机构形式及感知方法,详细综述人体对假手的操控方式和获取假手信息的反馈方法,最后介绍仿人型假手的一些代表性成果。通过本章的学习,读者能够对目前仿人型假手系统的发展现状有清晰的认识。

1.1 仿人型假手的发展历程

人手经常被比作是人类大脑的延伸,心灵的镜子^[1]。人手具有 27 块骨头、21 个自由度、29 块肌肉以及 17 000 个触觉传感器^[2]。从机械学角度出发,人手可看作一种复杂的生物机电(Bio-Mechatronics)系统,具有丰富的传感器及高度的灵活性。然而,控制如此精密的机械系统,人们却几乎不需要投入额外的心理关注。这是人手以及人体运动神经系统(人脑)经过长期的进化,相互影响、相互促进的结果。

战争、事故或者先天性疾病造成手部缺失的患者,在日常生活中遭受着生理及心理的双重压力。仿人型假手是应用于截肢患者进行手部运动弥补的仿生机器人系统,其研究涉及生物学、机械学、电子学、仿生学及计算机科学等多门学科,是目前机器人领域的一大研究热点。由于人手不仅是灵巧的执行器,还是优秀的感知器,因此作为人手的替代品,仿人型假手需要同时具有操作物体和感知环境两大功能。

最早的假手称为被动式假手或者装饰型假手,其历史可以追溯到公元前 218 ~ 公元前 201 年的迦太基战争时代。这种假手质量轻(木质)、外形逼真,但只能用于静态装饰^[3]。可驱动型假手出现于 1509 年,当时人们为在战争中失去一只手的年轻战士 Berlichingen 制作了通过弹簧驱动的假手。这只假手在战斗中发挥了很大的作用,但是在生活中却很不方便。

1812 年, Peter Baliff 发明了采用肢体驱动的假手,该假手通过捆绑到肩膀上的绳索带动实现单自由度开合运动,虽然实现简单,但是可以利用人体自身的视觉及皮肤触觉获得一定的位置及力的反馈。目前,这种绳索驱动的假肢仍旧占据较大的市场份额。

1972 年, Childress 将假手划分为装饰型、被动型、身体驱动型和外部动力型 4 种类型。其中,外部动力型假手是指采用肢体以外驱动形式^①的假手。相比于身体驱动型假手,动力型假手配置较灵活,出力较大。按此分类,动力型假手开始流行于 20 世纪 20 年代,并于 30 年代开始得到了广泛的应用^[4]。由 Tomovic 和 Boni 于 1962 年研制的 Belgrade 手最初就是为南斯拉夫的一位伤寒病患者设计的,当时它被认为是世界上最早的灵巧手^[5]。

① 当时是电机驱动,后来还可以采用液压、气动等驱动形式。

1948 年出现了肌电型假手^[6],通过处理人体残肢肌电信号来实现对假手的控制。通过分析人体肌肉收缩时产生的肌电(Electromyography, EMG)信号,可进行人手运动模式及强度等多种估计,从而实现假手不同运动姿态及速度的控制,是目前广泛研究及应用的假手类型。然而,商业化的肌电假手(德国 Otto Bock、美国 Motion Control, Liberating Technologies 公司以及国内丹阳假肢等)普遍只具有一个张合自由度,在抓取功能及灵活性方面表现较差。

20 世纪 70 ~ 80 年代,在航天技术迅猛发展的推动下,机器人灵巧手技术有了突破性进展,代表性成果有 Stanford/JPL 手^[7]、Utah/MIT 手^[8]等。在面向未知环境的交互时,研究者希望能够模拟人手高度灵巧的抓取及操作特性,提高机器人的操作水平^[9]。此时,作为机器人灵巧手的一项潜在应用,仿人型假手的发展得到了巨大的推动^[10]。20 世纪末,随着生物机电一体化技术的崛起以及康复医学工程需求的日益增长,发达国家开始投入大量的人力、物力从事灵巧假肢的研发,如英国南安普顿大学的 Southampton 假手^[11]、牛津大学的 Oxford Intelligent 假手^[12]、斯坦福大学的 Stanford 假手^[13]、台湾大学的 NTU 假手^[14]等。上述假手均具有 5 个手指,通过电机独立驱动,注重对手抓取功能的模仿。但是,受当时驱动技术和传感水平的制约,假手尺寸及质量均较大,基本不具备感知能力。一项对假手使用情况的调查表明^[15],残疾患者群体对假手的期望,包括外观、舒适性、功能性以及可控性等方面,在一定程度上修正了假手研究的方向。

进入 21 世纪之后,假手的发展呈现出多样化的趋势,其设计指导思想不再是单一地对灵巧手进行简化或是对人手进行简单模仿,而是机械、电气、生物及控制等相互交叉的范围日益扩大。理想的假手通常要便于控制、佩戴舒适且外形逼真,更为重要的是还要有高的灵活性。2005 年,美国国防高级研究计划署(DARPA)先后投入 7 100 万美元资助“Revolutionizing Prosthetics”项目,包括多所著名大学和实验室在内的 30 多个研究机构参与了该项目的研究,是假肢领域有史以来最大的研究计划项目之一。历经 5 年的研究,该项目在灵巧机构设计、生机交互方法及神经功能移植方面取得了突破性的进展,DARPA 也在 2010 年发布了该项目的第二期资助计划。与此同时,以意大利为代表的欧洲国家启动了 Cyber hand, Smart hand 和 Neurobotics 等研究计划,以生机电一体化假肢为对象开展了持续多年的研究。在人工感知方面,欧盟第六和第七框架计划先后启动了 Nanobiotact, Biotact, Nanobiotouch 等多个研究项目,从仿生学、机器人学以及生机接口等角度研究皮肤感知机理,为假肢触觉感知奠定了坚实的基础。

目前,仿人型假手的发展逐渐向灵巧化、高集成化、小型化、智能化转变,研究者们已经尝试了多种驱动源形式(如电机驱动、液压驱动、人工肌肉及记忆合金等)以及传动形式(如齿轮齿条、蜗轮蜗杆、连杆、腱等)。在驱动源个数少于可动关节数时,多采用欠驱动^[16]来进行多指仿人型假手的驱动。各国科研机构,如意大利的博洛尼亚大学、韩国的东义大学、日本的庆应义塾大学、美国的范德比尔特大学和耶鲁大学、加拿大的新不伦瑞克大学等陆续推出了各具特色的研究型假手。与此同时,多自由度假手(i-limb hand, Bebionic hand, Vincent hand, Michelangelo hand 等)也逐渐实现了商业化。在机构上,越来越多的假手考虑到了拇指的对掌运动,将其作为独立自由度进行驱动,以实现更好的抓握性能。在感知方面,多自由度仿人型假手也逐渐具备了触觉、力觉、位置等感知能力,能够实现一定的局部自主,智能性也逐渐提高。

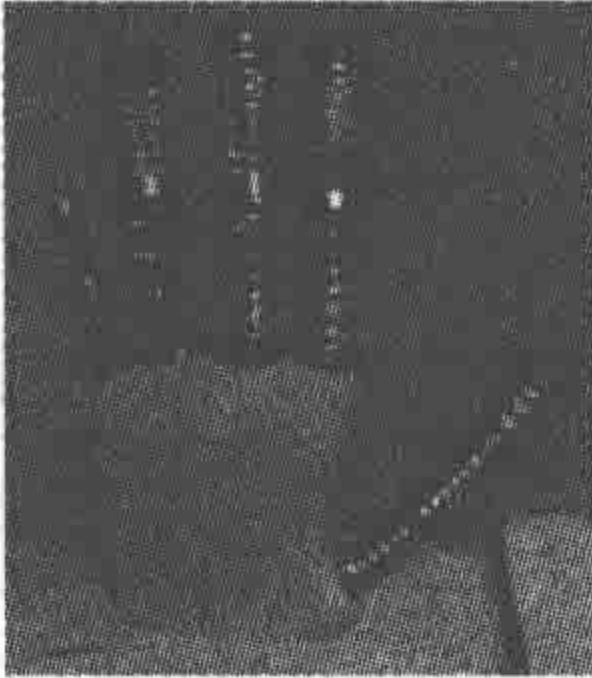
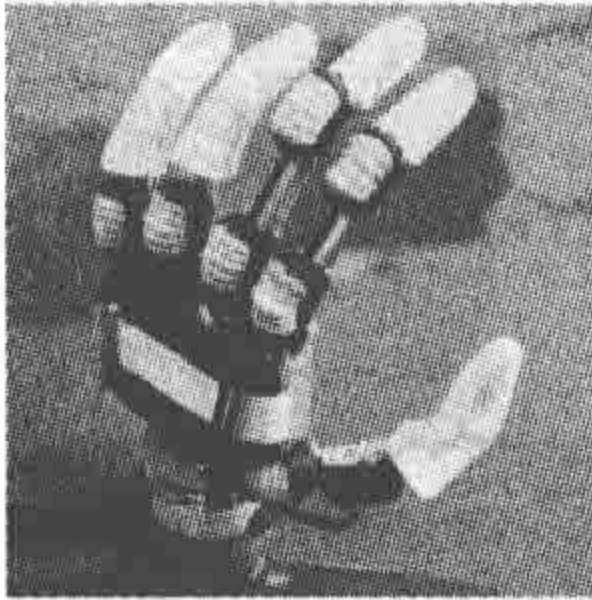
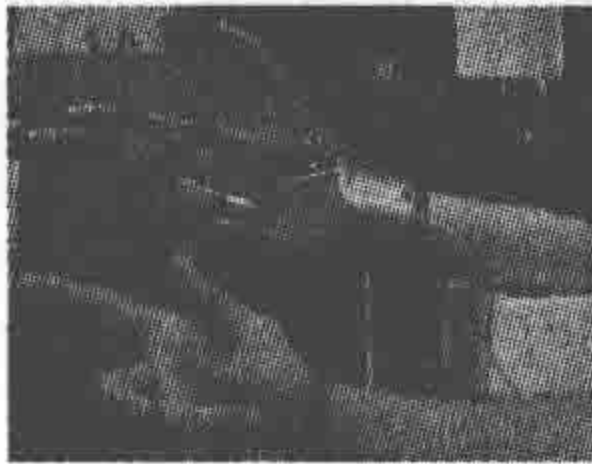
然而,如何能够基于人体信号实现对多自由度假手的控制,充分发挥其灵巧性,是假肢

应用面临的一大挑战。美国 DARPA“革命性假肢”采用神经移植手术,将残疾人患者手臂处的神经移植到患者胸部,然后通过采集嫁接后肌肉的肌电信号实现了多自由度假肢控制。另外,科研人员还尝试使用植入式神经信号、脑皮层电位等进行假肢的控制,并通过神经反馈的引入,使人体能够获得对假手的本体感知。目前,在脑科学、认知科学等的发展带动下,神经控制及感知反馈的研究逐渐成为仿人型假手研究的重点。2010 年,智能假肢作为典型的生物机电一体化系统,被 Live Science 列为引领未来的十大创新技术之一。

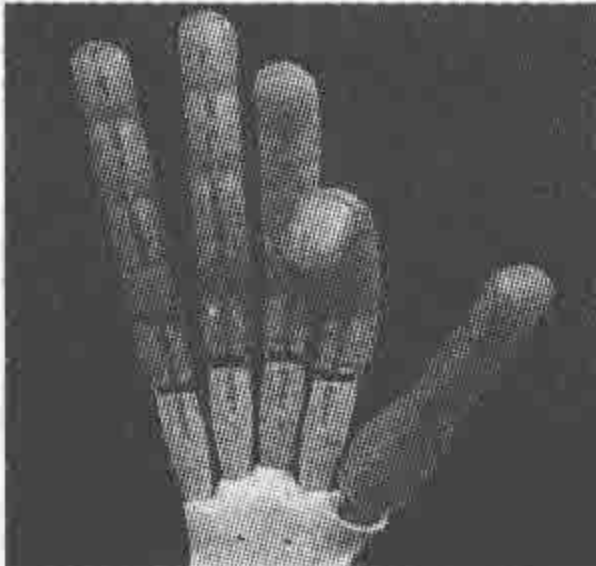
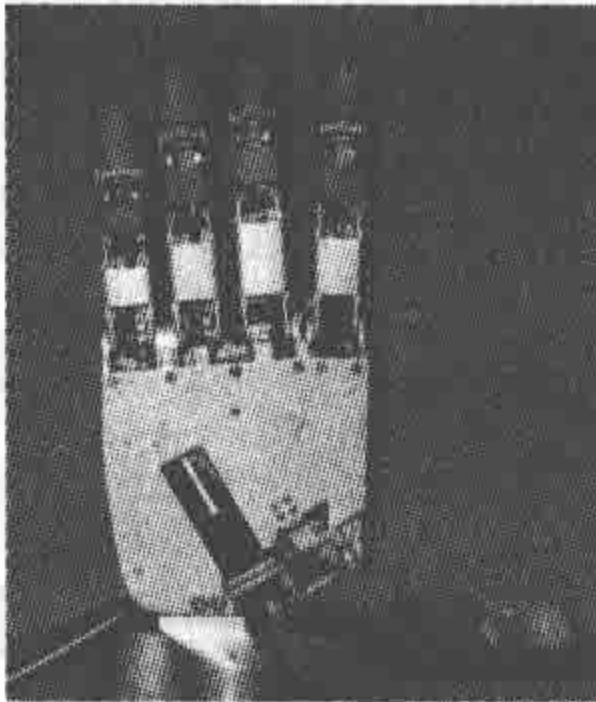
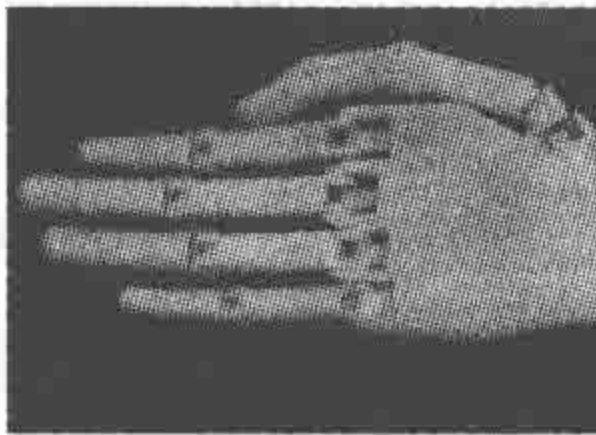
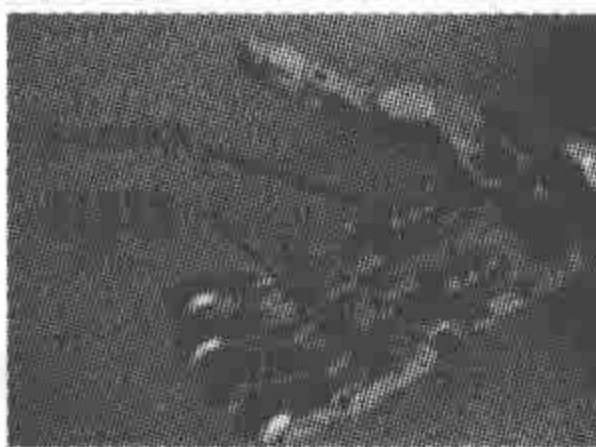
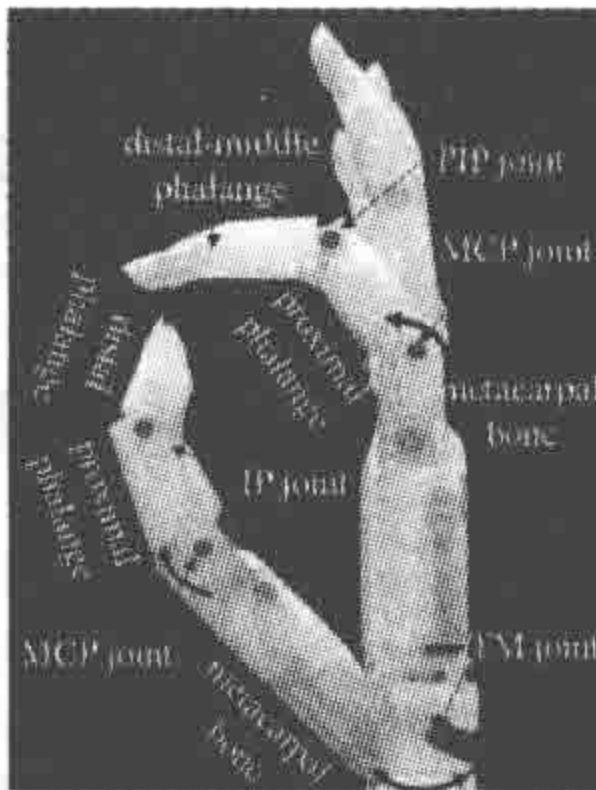
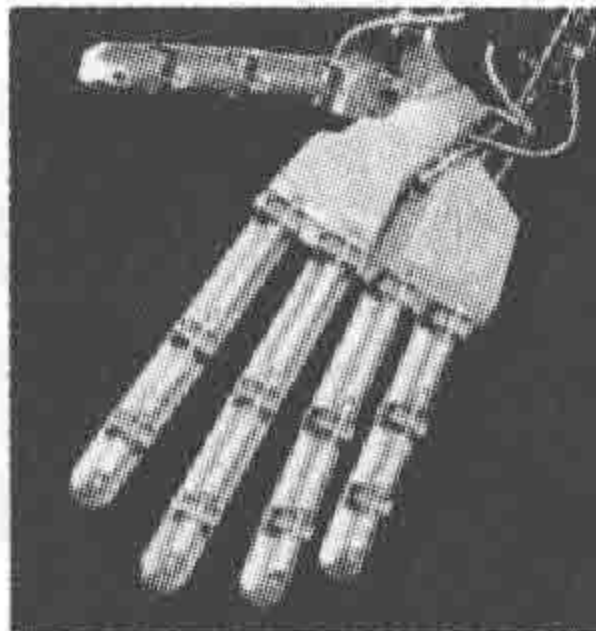
1.2 仿人型假手的代表性成果

据不完全统计,目前各种仿人型假手的数量(包括研究型和商业型)已经具有数百种。表 1.1 列出了 2003 ~ 2014 年实验用仿人型假手的主要参数。

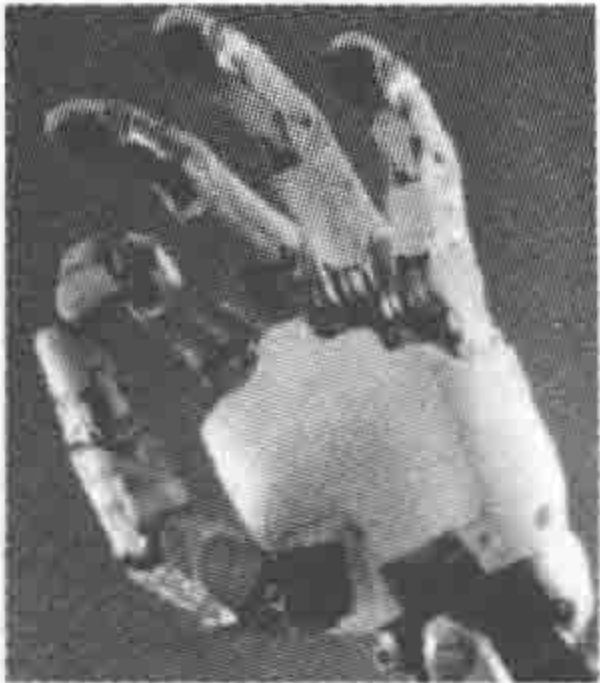
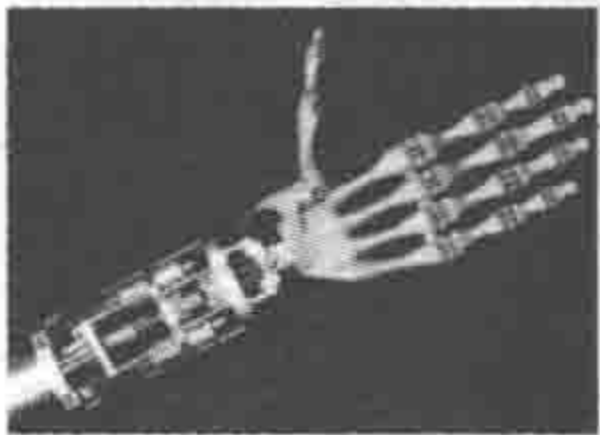
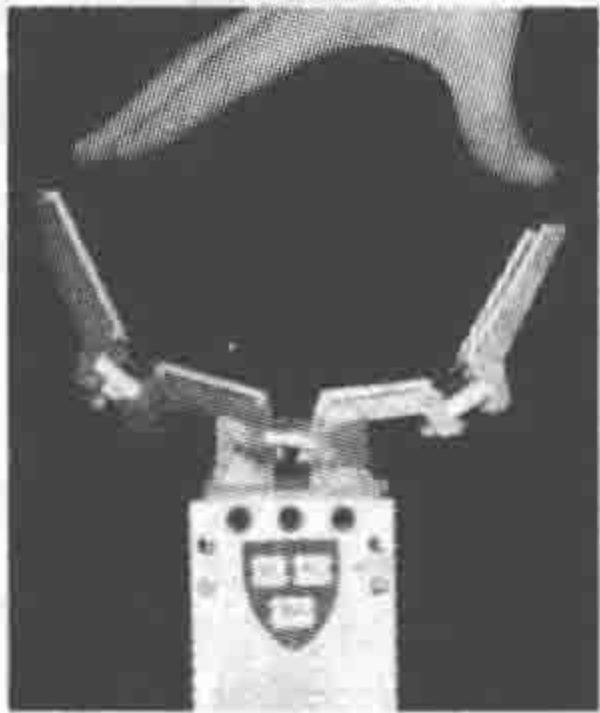
表 1.1 实验用仿人型假手的主要参数

图片	名称	年份	手指数/个 关节数/个 自由度/个	出力及 速度	驱动器 个数及 位置	传动 原理	大小及 质量	主要 文献
	Cyber hand	2003	5/15/16	70 N 45(°)/s	6/DC External	Tendon	95% 360 g	[17] [18]
	Manus hand	2004	5/10/4	60 N 90(°)/s	3/BLDC Internal	Tendon	120% 300 g	[19]
	IOWA hand	2004	5/15/5	—	5/DC Internal	Tendon	100% 90 g	[20]
	Fluid hand	2004	5/8/8	110 N 57(°)/s	1/Gear Pump Internal	Fluid Actuator	100% 350 g	[21] [22]
	Tokyo hand	2005	5/15/12	0.4 N · m 200(°)/s	7/SM External	Tendon	— 584 g	[23] [24]

续表 1.1

图片	名称	年份	手指数/个 关节数/个 自由度/个	出力及 速度	驱动器 个数及 位置	传动 原理	大小及 质量	主要 文献
	UB III	2005	5/15/16	70 N 250(°)/s	16/DC External	Tendon	120% —	[25]
	AR III HITAPH III	2007	5/15/3	30 N 72(°)/s	3/DC Internal	Bar	120% 500 g	[25]
	SMA hand	2008	5/15/7	— 41(°)/s	7/SMA External	Tendon	50% 250 g	[27]
	SJT2 hand	2008	5/15/6	27 N —	4/DC Internal	Bar	—	[28]
	Dong-Eui hand	2008	5/15/6	14 N —	6/DC Internal	Tendon	— 400 g	[29]
	Vanderbilt hand	2009	5/16/17	—	5/Gas Actuate External	Tendon	— 580 g	[30]

续表 1.1

图片	名称	年份	手指数/个 关节数/个 自由度/个	出力及 速度	驱动器 个数及 位置	传动 原理	大小及 质量	主要 文献
	Intrinsic hand	2009	5/15/19	4.7 N · m 360(°)/s	15/BLDC Internal	Motor	75% —	[31]
	Extrinsic hand	2009	5/11/21	— 360(°)/s	1/Cobot External	Tendon	—	[32]
	EA hand	2009	5/16/5	80 N 225(°)/s	5/DC External	Tendon	100% 580 g	[33]
	SDM hand	2010	4/8/1	—	1/DC External	Tendon	—	[34]
	iCub hand	2010	5/20/9	—	9/DC Hybrid	Tendon	—	[35]
	DLR HASy hand	2011	5/15/19	2.73 N · m 600(°)/s	19/SM External	VSA Tendon	—	[36]

续表 1.1

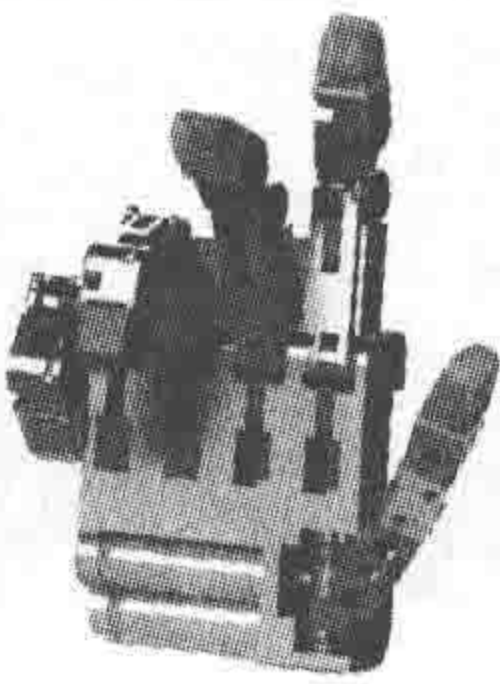
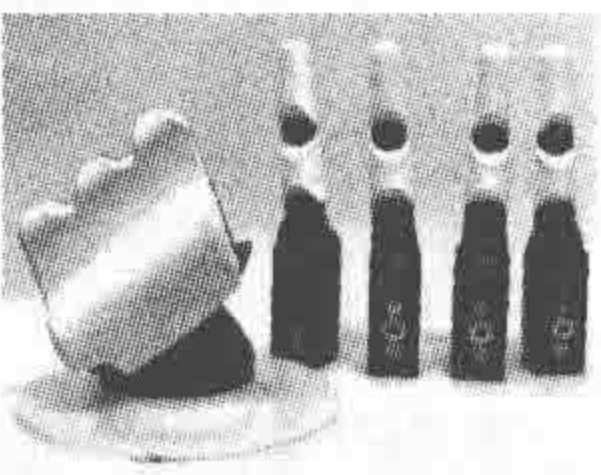
图片	名称	年份	手指数/个 关节数/个 自由度/个	出力及 速度	驱动器 个数及 位置	传动 原理	大小及 质量	主要 文献
	UT hand I	2014	5/15/15	5 ~ 10 N 90(°)/s	3/DC Internal	Tendon	—	[37]
	Pisa/IIT Soft hand	2014	5/15/19	3.5 N · m —	1/SM Internal	Tendon	—	[38]
	Sandia hand	2014	4/12/12	10 N 4.5 r/s	12/BLDC Internal	Planetary Gear + Tendon	—	[39]

表 1.1 中,自由度包括主动自由度及手腕的自由度;质量仅代表假手的质量,不包括手臂部分;出力以“N”为单位时代表整手抓取力,以“N · m”为单位时代表单手指出力;速度指的是基关节转速;DC 代表直流有刷电机;BLDC 代表直流无刷电机;SM 代表伺服电机;SMA 代表形状上的记忆合金;Internal 代表驱动器位于手掌内;External 代表驱动器位于手臂处;Tendon 代表腱驱动;Bar 代表连杆驱动;Gas Actuate 代表气动驱动;大小为与自然人手对比的结果,以百分比的方法表示。表中数据均根据最后一栏的参考文献获得,部分未知参数以“—”表示。

上述假手一般都具有 5 个手指,其质量在 500 g 左右。驱动外置式假手在外观、传动方式、灵巧性、出力等方面均优于内置式假手。外置式假手通常采用腱驱动,手掌内有充足的空间,可以实现更多的自由度以及更丰富的传感器配置。此外,手臂处的驱动元件也不受空间的限制,可以选择大功率的电机。与驱动外置式假手相比,内置式假手受到整手体积的限制,只能采用有限数量的小功率直流电机,在传动上更趋向于不需要预紧装置的方式。此外,由于其电控系统较简单,因而无法快速处理大量的传感器信息。但驱动内置式假手对不同程度的截肢患者具有更高的适应性,因此实际应用前景也更为广阔。

与上述试验用假手相比,商业假手具有不同的设计思路。假手的研究最终还要面向用户,根据患者的需求来制订设计指标。表 1.2 给出了有代表性的商业仿人型假手的主要参数。