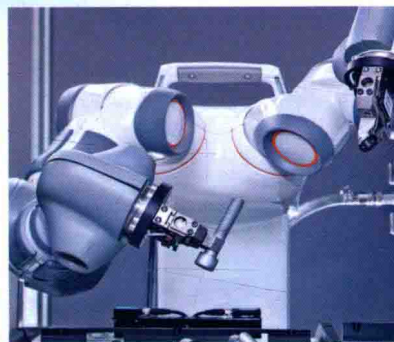
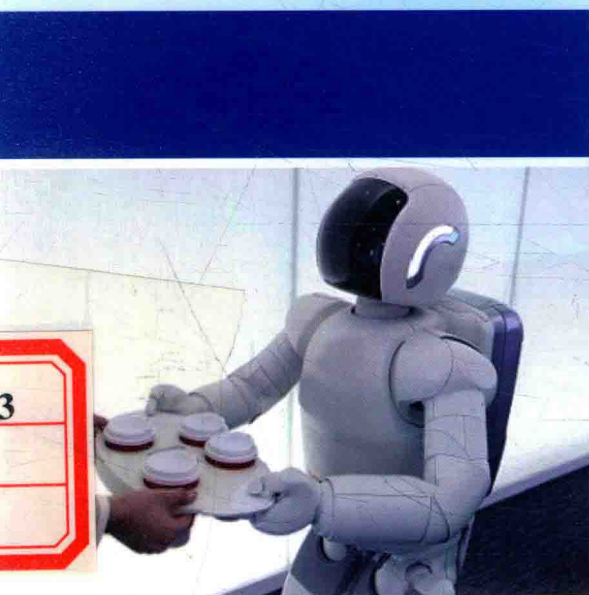


服务机器人 模块化双臂的协调操作

FUWU JIQIREN
MOKUAIHUA SHUANGBI DE XIETIAO CAOZUO

李宪华 谈士力 张军 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

服务机器人模块化双臂的 协调操作

李宪华 谈士力 张 军 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

服务机器人模块化双臂的协调操作/李宪华,谈士力,张军著.
—北京:国防工业出版社,2016.3

ISBN 978-7-118-10700-5

I. ①服… II. ①李… ②谈… ③张… III. ①服务用机器人—机器人控制—研究 IV. ①TP242.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第048750号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 4 1/8 字数 135 千字

2016年3月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 48.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

服务机器人是在非结构环境下为人类提供必要服务的多种高技术的集成体。人形化的服务机器人拥有着与人体手臂一样的双臂系统,而双臂协调操作是提高机器人系统操作能力、负载能力、可靠性及扩展操作空间的有效途径,一直是机器人研究领域的热点。本书以实现服务机器人的模块化双臂协调操作为出发点,从双臂运动学算法及标定、双臂协调运动、手臂拟人动作规划及双臂协调操作控制 4 个方面对机器人进行了研究。从工程角度出发,编制了 Windows 平台下基于 VC++ 的开放式双臂协调操作的控制软件系统,研制的服务机器人成功地在上海国际工业博览会上展出。

2007 年 9 月作者在上海大学机电工程与自动化学院攻读博士学位,师从谈士力教授,并于 2011 年 3 月毕业,就职于安徽理工大学。本书主要汇集了作者在攻读博士学位期间与毕业后工作期间所做的研究成果。本书第 1 章主要介绍了研究背景及意义,简述了国内外的研究进展及存在的问题;第 2 章阐述了服务机器人整体框架,重点分析了双臂构成特点,完成了机器人模块化双臂硬件平台的搭建及控制系统方案设计;第 3 章建立了机器人双臂的正运动学方程,运用空间几何法与代数法相结合的方法,解决了双臂的逆运动学问题,推导了相对误差标定的数学模型,利用激光跟踪仪对双臂进行了标定;第 4 章对机器人手臂在关节空间与笛卡儿空间下的轨迹进行了规划,分析了机器人双臂 4 种协调运动的约束关系,推导出了主从式跟随模式下的双臂协调运动数学模型;第 5 章分析了人体手臂的结构与运动机理,给出了机器人手臂的运动学约束模型和人体手臂的感知运动转换模型,对双臂进行了姿态类人安装优化,得到了服务机器人双臂拟人姿态产生的数学模型;第 6 章基于手臂任务的分类特点建立了单臂和

双臂任务操作的 Petri 网模型,分析了双臂 Petri 网络的基本性能,构建了双臂协调操作的分层递阶控制结构;第 7 章通过完成家庭服务工作及表演任务,验证了服务机器人模块化双臂数学模型、规划方法及控制方法的正确性;第 8 章总结本书所做的工作及取得的成果,提出需要进一步完善与研究的工作。

本书研究工作得到国家 863 计划资助项目(2007AA041604)、上海市科委项目(07DZ05805)、上海市科委重点科技攻关专项(09111101100)、上海大学研究生创新基金项目(SHUCX091037)、安徽省博士后基金项目和安徽理工大学引进人才(博士)基金的资助,在此作者对上述单位表示衷心的感谢。

本书第 1 到第 7 章由李宪华撰写,第 8 章由谈士力和张军撰写。本书的研究与出版工作得到了许多人的帮助与支持,特别感谢上海大学机电工程与自动化学院方明伦教授、何永义教授、郭帅副教授和张海洪副教授对作者研究工作给予的支持,感谢研究生张雷刚和疏杨对本书的编辑。本书的出版得到了安徽理工大学机械工程学院领导的大力支持,在此表示真诚谢意。

由于本书中涉及的开放式系统下服务机器人模块化双臂的协调操作的应用研究还不是很成熟,机器人双臂协调操作对于完成家庭服务仍存在着一定的局限性。本书的出版希望能为读者们起到一个抛砖引玉的作用。

限于作者水平,书中难免存在不妥和疏漏,敬请读者批评指正。

作者
2015. 11

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 双臂服务机器人研究现状及分析	2
1.2.1 日本双臂服务机器人	3
1.2.2 韩国双臂服务机器人	6
1.2.3 德国双臂服务机器人	8
1.2.4 美国双臂服务机器人	10
1.2.5 国内研究状况	11
1.2.6 研究现状分析	13
1.3 服务机器人双臂协调操作的研究	14
1.3.1 双臂协调运动及控制	14
1.3.2 双臂拟人运动规划	16
1.3.3 机器人系统 Petri 网建模	18
1.4 存在的问题	19
1.5 本书研究内容与创新点	20
1.5.1 研究内容	20
1.5.2 创新点	23
第 2 章 服务机器人双臂系统	24
2.1 引言	24
2.2 机器人整体结构	25
2.3 双臂软、硬件系统	27
2.3.1 双臂系统设计要求	27
2.3.2 双臂系统硬件组成	28
2.3.3 双臂系统软件架构	33

2.4	机器人视觉系统	34
2.5	本章小结	36
第3章	双臂运动学算法及标定	37
3.1	引言	37
3.2	双臂结构参数建模	39
3.2.1	三维空间位姿描述	39
3.2.2	连杆坐标系与齐次变换	40
3.2.3	旋转矩阵的欧拉角表示	42
3.3	双臂正运动学	44
3.4	双臂逆运动学	47
3.5	运动学算法实现	56
3.6	双臂运动学标定	58
3.6.1	手臂误差分析模型	58
3.6.2	手臂相对位置误差模型	61
3.6.3	双臂标定过程	64
3.7	本章小结	69
第4章	双臂协调运动规划	70
4.1	引言	70
4.2	单臂运动轨迹规划	71
4.2.1	关节空间轨迹规划	71
4.2.2	任务空间位姿规划	73
4.3	双臂协调运动学模型	82
4.3.1	雅可比矩阵及广义速度	82
4.3.2	双臂搬运刚体	82
4.3.3	双臂持钳运动	85
4.3.4	双臂操纵球铰物体	87
4.3.5	双臂螺栓装配运动	89
4.4	控制算法实现	90
4.4.1	单臂轨迹规划实现	90
4.4.2	双臂协调运动实现	93

4.5	本章小结	94
第5章	双臂拟人动作规划	95
5.1	引言	95
5.2	人体手臂运动机理	96
5.2.1	手臂解剖结构及自由度	96
5.2.2	人体手臂运动分析	99
5.3	机器人手臂拟人运动规划	102
5.3.1	手臂运动学约束	102
5.3.2	手臂拟人姿态生成	102
5.4	服务机器人双臂分析与拟人运动实现	103
5.4.1	机器人手臂结构特性分析	103
5.4.2	双臂姿态类人优化	105
5.4.3	双臂拟人运动实现	107
5.5	本章小结	109
第6章	双臂协调操作 Petri 网建模	111
6.1	引言	111
6.2	Petri 网理论基础	112
6.2.1	Petri 网基本概念	112
6.2.2	Petri 网图形标识	113
6.2.3	Petri 网基本性能	114
6.2.4	Petri 网分析方法	115
6.3	手臂操作 Petri 网模型	116
6.3.1	手臂操作任务分类	116
6.3.2	单臂操作 Petri 网建模	118
6.3.3	双臂协调操作 Petri 网建模	119
6.3.4	双臂 Petri 网模型分析	120
6.4	双臂协调操作控制结构设计	122
6.5	本章小结	123

第7章 双臂协调操作实验与分析	124
7.1 引言	124
7.2 实验总体方案介绍	124
7.3 双臂协调操作运动及控制实验	125
7.3.1 双臂运动学及协调操作实验	125
7.3.2 双臂拟人动作实验	129
7.3.3 Petri 网控制双臂操作实验	131
7.4 实验总结	132
7.5 本章小结	133
第8章 总结与展望	134
8.1 总结	134
8.2 展望	135
参考文献	137

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

机器人技术是集机构学、电子技术、计算机技术、传感技术、控制论、人工智能和仿生学等多学科于一体的高新技术,其用途越来越广泛,开始从传统的工业领域向军事、公安、医疗、服务等领域渗透。2007 年微软公司董事会主席比尔·盖茨在世界级高级科普杂志 *Scientific American* 上发表文章 *A Robot In Every Home* 预言:机器人即将重复个人计算机产业的崛起之路,成为人们日常生活中的一部分,实现“家家都有机器人”^[1]。

服务机器人作为机器人家族中的年轻一员,虽然到目前为止尚没有一个严格的定义,但是其发展受到许多国家的重视。国际机器人联合会对服务机器人的定义:服务机器人是一种半自主或全自主工作的机器人,它能完成有益于人类的服务工作,但不包括从事生产的设备^[2]。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》将在非结构环境下为人类提供必要服务的多种高技术集成的智能服务机器人作为未来 15 年前沿课题技术,并将服务机器人作为我国重点发展的对象^[3]。不同于一般工业机器人固定在特定位置,做着重复性高精度的运动,服务机器人具有灵活的运动机构,可以随时运动到需要的地方,包括一些对于普通人来说不易到达的地方和角落,完成人或智能系统预先指定的工作。

服务机器人行动的多样性、通用性和必要的“柔性”是智能实现的首要因素,是保证机器人可塑性和与人类交流的前提,其结构则决定

它能不能为人所接受,而且也是它像不像人类的关键。类人服务机器人必须拥有类似人类上肢的两条机械臂,这样不仅可以满足一般的机器人操作要求,而且可以实现双臂协调控制和手指控制以实现更为复杂的操作。类人服务机器人要具有完成复杂任务所需要的感知器官,还要在已经完成过的任务重复出现时要像条件反射一样自然地做出反应^[4]。在技术上,服务机器人正在从外部形状设计和实际性能改善方面,努力改变由工业机器人那种单一手臂给使用者的心理带来压抑的不良影响^[5,6]。现在日本等发达国家已经重点发展人形服务机器人,力图使其代替原本只有人才能完成的工作。让机器人走进普通家庭,除了对其功能性上提出高要求外,更希望机器人具有人的外形,并能够效仿人体的某些物理功能、感知功能及社交能力并能承袭人类的部分经验。服务机器人逐步走入人类的日常生活,与人类友好共存是未来社会生活发展的必然趋势,而实现人性化的服务便成为服务机器人实现真正智能化和走入人类日常生活的关键。

服务机器人的两只手臂是服务机器人为人类提供服务的主要工具和媒介,在手臂前方加装手掌甚至手指,可以为人类进行简单的服务,如夹持物体、搬运货物等。目前双臂服务机器人主要应用于商场和科技馆等服务场所,进行一些简单的娱乐和与人类互动,但是随着技术的发展,双臂机器人将延伸到危险恶劣的条件下以代替人类完成部分工作。随着人口老龄化现象越来越严重,服务机器人将在医院大展手脚,可作为医院的“护士助手”,也可作为家庭的服务员等。按照国际和国内市场的需求分析,此种机器人将具有巨大的市场潜力^[7-9]。双臂机器人并不是简单地把两个单臂机器人组合在一起,而是将其作为一个独立的机器人系统,双臂之间存在着高度的协调关系。

1.2 双臂服务机器人研究现状及分析

双臂服务机器人是类人机器人家庭的一份子。类人机器人按照移动方式可分为双足步行机器人、轮式移动机器人和固定基座型类人机器人。从类人机器人的研究历史及现状看,其研究主要存在模拟人类行走功能、基本操作功能和自主发育与学习进化3个方向。目前对

于类机器人的研究主要集中在行走、说话和动手能力这三大领域,研究人员正在综合这三大领域的研究成果,设计新一代类人服务机器人。对于类机器人而言,国际上许多国家都在研究,但每个国家都有自己的特色:日本偏向于模拟人的动作;欧洲主要应用在医疗服务方面;美国则主要作军事用途^[10,11]。下面重点介绍国内外影响较大的双臂服务机器人。

1.2.1 日本双臂服务机器人

1. ASIMO 机器人^[12-15]

ASIMO 是由日本本田(Honda)公司研制的类人机器人,可以说是目前最先进的仿人行走机器人。身高 130cm,体重 54kg,每只手臂最大负载为 0.5kg,最高步行速度可达 2.7km/h,最高跑步速度达到 6km/h。全身共有 34 个自由度:头部 3 个、双臂各 7 个、双手各 2 个、腰部 1 个、腿部各 6 个。ASIMO 能够上下楼梯和推运物体,由于增加了语音识别功能,具有听、说、看的能力,并且可与互联网无线互联,是第一个真正具有世界影响力的机器人,如图 1-1 和图 1-2 所示。

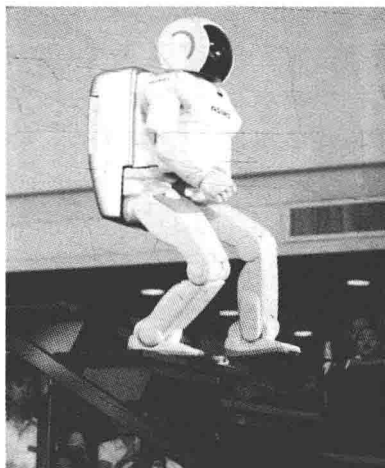


图 1-1 ASIMO 下楼梯

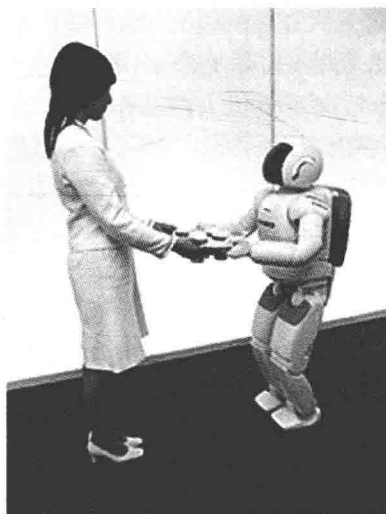


图 1-2 ASIMO 双手递咖啡

2. HRP-2 机器人^[16,17]

HRP 研究项目是日本通产省工业技术研究院在 1998 年启动的为期 5 年的“与人协调共存的类人机器人系统”国家研究项目。该项目打算将远程机器人、网络技术及虚拟现实技术进行集成,以实现实时远程遥控机器人。HRP-2 机器人是由川田工业株式会社设计制作的,高 154cm,体重 58kg,具有 $2(\text{头部}) + 6 \times 2(\text{手臂}) + 6 \times 2(\text{腿部}) + 2(\text{腰部}) + 2 \times 2(\text{手指}) = 32$ 个自由度。相对于本田 ASIMO,HRP-2 由于增加了 2 个腰部自由度,上身动作更加灵活,每个手臂具有 6 自由度,已经实现了机器人与协作抬桌子、开铲车和进行工作间隔板的装配等工作,如图 1-3 和图 1-4 所示。HRP-2 还可以模仿人的部分动作,研究人员首先请民间艺术家跳舞,然后用摄像机对画面进行捕捉,通过计算机分析人体手、脚、腰等关键自由度,再将解析后的数据与 HRP-2 本身自由度进行匹配,最后将各关节的数据映射到机器人各部位,从而使 HRP-2 可以模拟人的动作进行跳舞;并且全身协调动作可以搬运比较大的物体,如纸箱等。

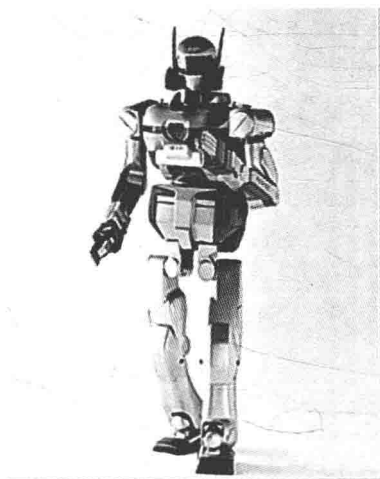


图 1-3 HRP-2 机器人



图 1-4 HRP-2 模仿人类表演

3. QRIO 机器人^[18-20]

QRIO (Quest for curiosity) 是日本索尼公司于 2003 年 12 月 18 日发布的一款机器人,源自于索尼公司推出的人形娱乐机器人 SDR-4X II (Sony Dream Robot), 身高 58cm, 体重 7.3kg, 跑动速度达 15m/min。

全身主要部分有 28 个自由度,包括每条腿各 6 个,躯干 2 个,每个手臂各 5 个,头部 4 个(图 1-5)。此外,每只手都有 5 个独立驱动的手指。头部的两个 CCD 摄像机组成了机器人立体视觉系统,7 个微型麦克风组成了其语音处理系统。QRIO 拥有 3 个 CPU,分别用作语音识别与合成、视觉识别、短时间与长时间记忆以及行为控制和行走控制。由于采用了索尼最新开发的智能驱动器(ISA-4),机器人运动的适应性和驱动能力进一步得到提高。

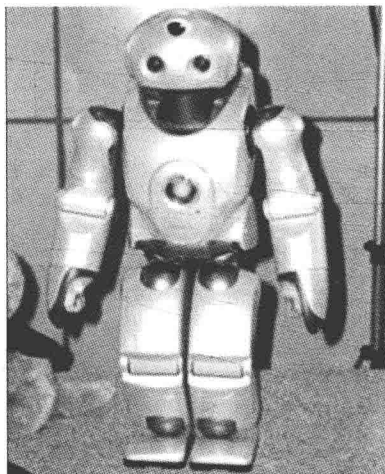


图 1-5 QRIO 机器人

4. MOTOMAN-SDA10 机器人^[21]

MOTOMAN-SDA10 是由日本安川电机开发的,其只有上身部分,固定在基座上,上身可以绕位于腰部的回转轴做旋转运动,具有两个 7 自由度的手臂,手臂末端装有手爪。整个机器人身高 134cm,重达 220kg,每只手臂可抓取 10kg 重的物体,手臂水平长度为 197cm,垂直长度为 144cm。SDA10 采用 NX1000 机器人控制器,会打鼓、玩魔方、烤面包,还会制作什锦煎饼,烹饪完毕将食物放入盘内,如图 1-6 所示。

1.2.2 韩国双臂服务机器人

为了缩小与日本在机器人领域的差距,近几年韩国加大了对机器人的投入与开发。HUBO 机器人^[22,23]是韩国 KAIST(Korea Advance

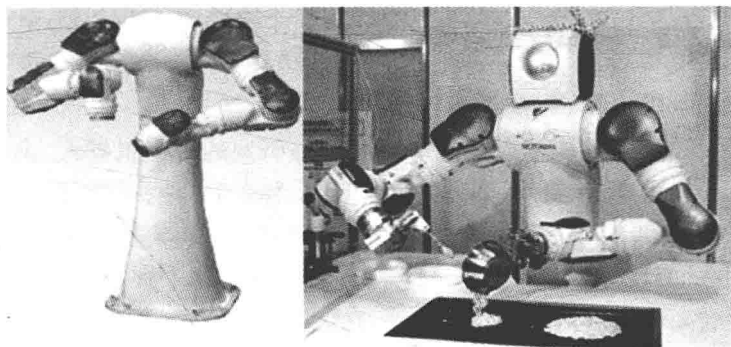


图 1-6 MOTOMAN-SDA10 机器人

Institute of Science and Technology) 开发的一款双足机器人,其中于 2005 年公布的 Albert HUBO 机器人是 KAIST 联合 Hanson 机器人团队为了纪念爱因斯坦相对论发布 100 周年而共同开发的一款类人机器人,身高 137cm,体重 57kg,有 66 个自由度,其中头部有 31 个自由度,身体有 35 个自由度。头部 31 个自由度中有 28 个伺服电机用来控制机器人表情,3 个用来控制颈部运动。机器人可以表达大笑、悲伤、生气、吃惊等表情,如图 1-7 所示。HUBO 机器人进行了多次改进,每次改进使机器人质量和身高都在增加,步行速度也在加快。

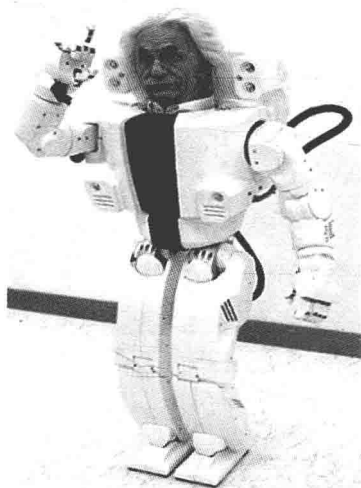


图 1-7 Albert HUBO 机器人

1.2.3 德国双臂服务机器人

1. Rollin' Justin 机器人^[24-26]

Rollin' Justin 机器人是德国宇航中心研发的一款机器人,全身共有 51 个自由度,上身 43 个自由度,包括头部 2 个、两手臂各 7 个、两手掌各 12、腰部 3 个(图 1-8)。采用锂电池供电,身体重达 150kg,地面到肩膀的高度为 160cm。两只臂采用 DLR 轻量化手臂 DLR-LWR-III,手臂每个关节内有力矩传感器。机器人底盘为可伸缩式的轮式移动机构,长度伸缩范围为 68.5~98.5cm,宽度伸缩范围为 51.5~81.5cm,底盘高度为 70cm。为了可以在不平整的地面上移动,上身可以直立站立以越过小的障碍,底盘轮子的支撑机构都配有阻尼弹簧,具有自锁装置的阻尼器可以为底盘带来很大的刚度。头部装有的视觉传感器可以进行物体的识别。双臂协调操作可以做出调制咖啡、表演跳舞等动作。

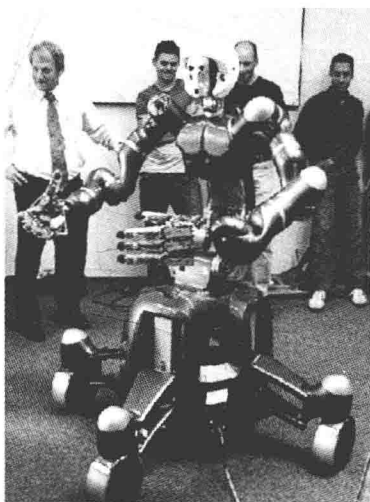


图 1-8 Rollin' Justin 机器人

2. Armar 机器人^[27,28]

Armar 机器人是德国 Karlsruhe 大学类人机器人与智能系统研究室开发的一款面向工作车间与家庭助理的机器人。它全身共有 23 个