



国家出版基金资助项目

INTELLIGENT ROBOT

# 智能机器人

● 朴松昊 钟秋波 刘亚奇 洪炳镕 著



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



国家出版基金资助项目

INTELLIGENT ROBOT

# 智能机器人

● 朴松昊 钟秋波 刘亚奇 洪炳镕 著

TP542.6/19



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

## 内 容 提 要

本书主要包括智能机器人发展状况、智能机器人视觉系统、仿人机器人运动规划、地图创建中的环境特征表示方法、智能机器人全局定位、智能机器人路径规划、智能机器人协调与协作等内容。

本书主要面向机器人爱好者或具有计算机、人工智能、自动化、机械电子、信息与通信等专业基础的致力于机器人研究的读者。本书既可以作为高等院校相关专业本科生及研究生教学参考书,也可供其他相关领域的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

智能机器人/朴松昊等著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011. 12

ISBN 978 - 7 - 5603 - 3247 - 5

I. ①智… II. ①朴… III. ①智能机器人 IV. ①TP242. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038392 号

责任编辑 田新华

封面设计 高永利

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 15.25 字数 371 千字

版 次 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 3247 - 5

定 价 58.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

各种智能机器人的创造一直是人类的梦想和追求,也是21世纪科技发展的热点之一,其发展具有创新性和战略性,对国民经济和国家安全具有重大影响。机器人是典型的机电一体化设备,同时又是人工智能理论的具体体现,随着机器人技术和理论的迅速发展,近年来很多高等学校的不同专业都增设了有关机器人的课程。

本书内容包括智能机器人发展现状、智能机器人视觉系统、仿人机器人运动规划、地图创建中的环境特征表示方法、智能机器人全局定位、智能机器人路径规划、智能机器人协调与协作等,适用于高校电气、电子、机械、计算机、人工智能、信息与通信、航天工程等各专业学生和相关领域工程技术人员学习与研究使用。

本书有以下特点:

1. 本书立足于实验研究,从科研实践的角度,阐述了人工智能领域中智能机器人的基本模型、基本理论和基本方法。考虑到各专业的需求和特点,本书注重简明扼要、通俗易懂。本书具有很强的基础性、先进性和实用性。

2. 本书中所有实验均立足于哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院多智能体机器人研究中心的科学研究成果,既具备扎实的硬软件基础以及理论基础,又紧盯国际前沿,形成了一套完整、扎实、先进的科学研究体系,内容翔实。

3. 本书中所涉及的仿真实验,均有研究方案方法。作者力图使智能机器人的教学和学习摆脱繁琐的手工计算,同时通过大量的仿真实验使学生对基本原理和方法有更为深刻的认识和更为深入的理解。

多智能体机器人研究中心十几年来一直承担着智能机器人的研发工作,同时是中国人工智能学会机器人足球专业委员会的所在地,自成立以来,完成了大量的科研项目,孕育出诸多科研成果,曾多次荣获相关领域的国际赛事冠军,同时一直在国内保持领先地位。本书就是在研究中心多年的科研成果基础上整理编写而成,包含着研究中心各位老师以及研究生们的实践经验和科研成果。

朴松昊全面负责本书撰写工作,钟秋波、刘亚奇、洪炳镕参加了部分章节撰写。参加本书撰写工作的还有厉冒海、石朝侠、陈凤东、刘海涛、杨晶东、王亮、阮玉峰、康俊峰等。在此特别感谢哈尔滨工业大学出版社田新华等编辑对本书的关心、支持和帮助。

本书在编写过程中参考了很多优秀教材和著作。在此,我们特别向被引用文献的各位作者表示真诚的感谢。

由于作者学识有限,加之本书编写时间仓促,虽然我们尽力校对审核,书中也不免会有疏漏和错误,恳请读者批评指正。

作 者

2011年10月

于哈尔滨工业大学

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第1章 绪论                        | 1   |
| 1.1 引言                        | 1   |
| 1.2 智能机器人发展概况                 | 2   |
| 1.3 智能机器人环境描述方法               | 13  |
| 1.4 智能机器人自主导航综述               | 22  |
| 1.5 基于多机器人协作的路径探索综述           | 37  |
| 第2章 智能机器人视觉系统                 | 41  |
| 2.1 引言                        | 41  |
| 2.2 视觉系统的设计分析                 | 41  |
| 2.3 颜色空间模型的研究                 | 42  |
| 2.4 仿人机器人全局视觉系统               | 44  |
| 2.5 仿人机器人嵌入式视觉系统              | 51  |
| 2.6 移动机器人单目摄像机对点的定位           | 60  |
| 2.7 仿真与实验结果                   | 61  |
| 2.8 小结                        | 63  |
| 第3章 仿人机器人运动规划                 | 64  |
| 3.1 引言                        | 64  |
| 3.2 仿人机器人运动学与动力学模型            | 66  |
| 3.3 仿人机器人稳定性分析                | 71  |
| 3.4 基于二阶锥规划方法的仿人机器人稳定控制       | 73  |
| 3.5 仿人机器人倒地过程分析               | 77  |
| 3.6 倒地参数化优化控制策略               | 79  |
| 3.7 使用极小值原理进行最优控制             | 80  |
| 3.8 基于参数化最优的控制                | 80  |
| 3.9 仿人机器人运动约束                 | 89  |
| 3.10 仿人机器人上下楼梯运动              | 90  |
| 3.11 仿人机器人上下斜坡运动              | 93  |
| 3.12 混合微粒群进化算法                | 94  |
| 3.13 基于混合微粒群进化算法的仿人机器人上楼梯运动控制 | 97  |
| 3.14 基于混合微粒群进化算法优化的神经网络系统设计   | 98  |
| 3.15 基于混合微粒群进化算法优化的模糊逻辑系统设计   | 101 |
| 3.16 仿真与实验结果                  | 103 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 3.17 小结                        | 117        |
| <b>第4章 智能机器人地图创建中的环境特征表示方法</b> | <b>118</b> |
| 4.1 引言                         | 118        |
| 4.2 基于 SIFT 算法的视觉环境特征          | 119        |
| 4.3 激光测距器模型                    | 123        |
| 4.4 基于激光扫描匹配算法的环境表示            | 124        |
| 4.5 智能机器人无偏快速同时定位与地图创建         | 132        |
| 4.6 仿真与实验结果                    | 141        |
| 4.7 小结                         | 144        |
| <b>第5章 智能机器人全局定位</b>           | <b>146</b> |
| 5.1 引言                         | 146        |
| 5.2 智能机器人 SIFT 特征提取与匹配算法       | 146        |
| 5.3 智能机器人全局定位算法                | 149        |
| 5.4 仿真与实验结果                    | 154        |
| 5.5 小结                         | 158        |
| <b>第6章 智能机器人路径规划</b>           | <b>159</b> |
| 6.1 引言                         | 159        |
| 6.2 拓扑地图的必要性                   | 160        |
| 6.3 基于 BCM 的实时拓扑地图创建方法         | 162        |
| 6.4 比例不变特征变换                   | 167        |
| 6.5 运动规划的数学表述                  | 170        |
| 6.6 智能机器人全局路径规划考虑的主要问题         | 170        |
| 6.7 环境建模                       | 171        |
| 6.8 基于遗传算法的智能机器人路径规划           | 174        |
| 6.9 基于混合代价的仿人机器人路径规划           | 178        |
| 6.10 基于多传感器融合模型的智能机器人在线实时调整    | 184        |
| 6.11 仿真与实验结果                   | 188        |
| 6.12 小结                        | 196        |
| <b>第7章 智能机器人协调与协作</b>          | <b>197</b> |
| 7.1 引言                         | 197        |
| 7.2 智能机器人系统结构                  | 199        |
| 7.3 智能机器人独立任务下的冲突消解            | 199        |
| 7.4 智能机器人合作任务下的冲突消解            | 202        |
| 7.5 基于隐马尔可夫模型的节点定位             | 206        |
| 7.6 智能机器人协作策略的选择               | 209        |
| 7.7 仿真与实验结果                    | 212        |
| 7.8 小结                         | 219        |
| <b>参考文献</b>                    | <b>220</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

智能移动机器人的研究始于 20 世纪 60 年代末期,斯坦福研究院的 Nils Nilssen 和 Charles Rosen 等人研制出了名为 Shakey 的自主移动机器人,标志着智能移动机器人研究的正式开始<sup>[1]</sup>,其主要目标是研究人工智能技术应用在复杂环境下机器人系统的实时控制问题,涉及任务规划、运动规划与导航、目标识别与定位、机器视觉、多传感器信息处理与融合以及系统集成等关键技术。虽然 Shakey 只能解决简单的感知、运动规划和控制问题,但是它是当时将人工智能应用于机器人的最为成熟的研究工作,为智能移动机器人的研究开创了一个典范,70 年代末,随着计算机的应用和传感技术的发展,移动机器人研究出现新的高潮。特别是在 80 年代中期,设计和制造机器人的浪潮席卷全世界,一大批世界著名的公司开始研制移动机器人平台,促进了移动机器人学多种研究方向的出现。90 年代出现的机器人足球比赛,被认为是计算机博弈后出现的人工智能发展的第二个里程碑。机器人足球比赛的蓬勃发展,极大地推动了移动机器人众多研究领域的技术进步,包括智能机器人系统、智能体系结构设计、传感器融合技术、多智能体系统、实时规划和推理等领域。90 年代以来,以研制高水平的环境信息传感器和信息处理技术、高适应性的移动机器人控制技术、实际环境中的规划技术为标志,开展了移动机器人更高层次的研究。正如宋健院士在国际自动控制联合会报告中指出的:“机器人学的进步和应用是本世纪自动控制最有说服力的成就,是当代最高意义上的自动化。”<sup>[2]</sup>

仿人机器人是一种外形像人的智能机器人。在当今机器人领域里,双足的仿人机器人也许是最具有吸引力和挑战性的研究之一。这不仅是因为人类想要创造一个和自身类似的机器人,它可以模拟人类进行思考、与人类交谈、进行各种仿人的运动,从而更容易被人类社会所接受,而且由于现代社会的环境是人类自身设计的,例如各种楼梯、人行道、门把的位置、使用工具的大小等诸多事物都得设计成符合人类使用的大小。因此,对仿人机器人的研究就可以省去为研究其他机器人而专门设计的环境空间。

与其他移动机器人(轮式、履带式、爬行式等)相比,仿人机器人具有高度的适应性与灵活性。具体表现在以下三个方面<sup>[3]</sup>。

### 1. 对环境要求低

仿人机器人与地面接触点是离散的,可以选择合适的落脚点来适应崎岖的路面,它既可以在平地行走,也可以在复杂的非结构化环境中行走,例如在凹凸不平的地面行走、在狭窄的空间里移动、上下台阶和斜坡、跨越障碍等。由于其外形和功能像人,适合在人类生活和工作的环境中与人类协同工作,不需要专门为其进行大规模的环境改造。

## 2. 动作灵活

除了普通多足机器人可以实现的变速前进、后退外,仿人机器人还可以实现不同角度和速度的转弯,并能够完成跑、跳、踢,甚至一些类似舞蹈与武术的高难度动作。

## 3. 能量消耗小

机器人力学计算表明,仿人机器人具有比轮式和履带式机器人更小的能效。已有的仿人机器人步行研究显示,被动式机器人可以在没有主动能量输入的情况下,完全采用重力作为驱动力完成下坡等动作。另外,改进能源装置和机械结构,也可以不同程度地减少能量的消耗,进一步提高能量的利用率。

# 1.2 智能机器人发展概况

## 1.2.1 国外智能机器人发展概况

### 1. 国外移动机器人发展概况

室内移动机器人是自主移动机器人在民用领域的一个重要应用方向。由于与工业机器人在应用领域的本质不同,室内移动机器人主要代替或协助人类完成为人类提供服务和安全保障的各种工作,如清洁、护理、娱乐和执勤等。因此,它具有广泛的应用前景和市场,近十几年来得到了迅速的发展和广泛的关注,一些机器人研究机构和电器公司对如何提高室内机器人的智能化程度,如何使移动机器人的功能多样化进行了大量的研究<sup>[4][5]</sup>。下面对国外移动机器人的发展现状进行概述。

推出室内机器人的初衷是将人们从繁杂的家务劳动中解脱出来,使他们能在紧张的工作之余有更多的休闲时间。因此,早期的室内机器人大多数属于服务型的机器人,其中,清洁机器人是典型的代表。清洁机器人的研究从 20 世纪 80 年代起得到人们的注意,随着机器人视觉软硬件的不断发展,美国、日本、欧洲等西方国家的许多公司都已经推出了产品。

美国 Probotics 公司 1999 年生产的 Cye 小型家用移动式服务机器人可以牵引一辆小型拖车在室内运送饮料、信件等生活用品,或牵引吸尘器进行室内清扫工作,如图 1.1 所示。2005 年,日本松下电器公司展示了一种夜间自主清扫的机器人 SuiPPi(图 1.2),SuiPPi 可根据事先生成的地图,以及对周围环境的感知,规划高效的移动路径,进行自主移动。在检测墙面和障碍物时,同时使用激光雷达、视觉传感器及超声波传感器三种传感器。在移动过程中,利用陀螺传感器推断自己的位置,并修正误差。而富士重工业的 Subaru Robo Haita RS1 机器人(图 1.3)可在没有地图信息的情况下进行自主移动。著名的家电厂商伊莱克斯在英国推出了“三叶虫”(Trilobite)机器人吸尘器(图 1.4),利用声纳探测障碍物,并且可以自行设计出在房间中行走的最佳路线。它通过超声波躲避桌椅腿和宠物等障碍,高度只有 13 cm,可以灵活地钻到桌子和床底下清理。日本的日立公司、加拿大的 Karcher 机器人公司和德国的西门子等许多公司都开发了保洁机器人,并且已经形成产品。

除了保洁机器人,许多研究机构开发了导游机器人。20世纪90年代德国的 Bonn 大学就开发了博物馆导游机器人 Rhino(图 1.5),在 Deutsches 博物馆的实验证明它可以非常安全和准确地实现导游。Bonn 大学又与美国卡耐基 - 梅隆大学开发了第二代导游机器人 Minerva(图 1.6),也取得了巨大的成功。2000 年,美国 ActiveMedia 机器人公司推出了一种新型导游机器人“PeopleBot”(图 1.7)。机器人上安装有多种传感器:声纳传感器、CCD 摄像头以及激光测距器。

随着世界性的社会老龄化趋势的日益严重,赡养老人和提高残疾人生活质量已成为现代社会的另一个重要问题。目前主要面向老年与残疾人的陪护机器人、助行机器人、康复机器人等智能移动服务机器人开始走入家庭,它们可以照顾、陪护老人和残疾人,为孤独的老人读报解闷,提醒病人定时吃药以及足不出户地接受治疗,为主人看家护院。由于移动服务机器人具有极其重要的社会服务功能,因而受到世界各发达国家的高度重视,成为世界范围内的研究热点。

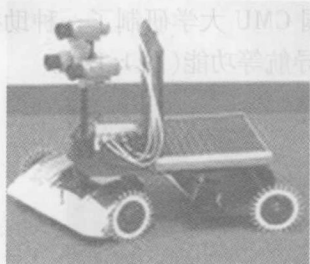


图 1.1 Cye 机器人



图 1.2 SuiPPi 机器人



图 1.3 RS1 机器人



图 1.4 Trilobite 机器人



图 1.5 Rhino 机器人

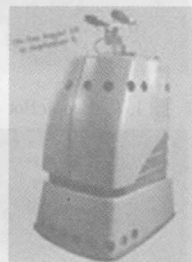


图 1.6 Minerva 机器人

日本高度重视移动服务机器人的研发与应用,各种类型的“陪聊”机器人和护理机器人开始得到应用。名古屋市商业设计研究院开发的“ifbot”机器人(图 1.8)能够理解人的感情并能与人沟通,它不仅能够识别交谈者的语言,还能判断对方的感情,并通过“眨眼睛”、“转动眼球”等方式表达自己的“感情”。与“ifbot”说话,老人大脑的思维能力得以激活,从而缓解忧郁、孤独的情绪并避免患健忘症。图 1.9 是卡耐基 - 梅隆大学的机器人研究所研究的一种为老年人提供服务的护理机器人“Flo”,它可以提醒病人定时吃药并且及时向医生报告病人的情况,保证病人足不出户地接受治疗。

智能移动服务机器人也可以在用户的控制下运动,协助拿取物品、料理家务,还可以帮助老人起床、引导行走等。德国的 Care - O - bot 机器人(图 1.10)是帮助残疾人和老年人独立生活的家庭看护系统。它可以摆放坐椅、拿饮料、控制空调和报警系统;可以从床上或椅子上支撑用户起身,智能辅助行走;还可以管理视频电话、电视等媒体,与医疗和

公共服务机构通信,检测危险信号并紧急呼救。爱尔兰的 VA - PAM - AID、日本的 RFID 和 Walking Helper 导航机器人可以帮助老年人和弱视者独立行走。这类机器人能够导航、避障,并可以根据用户的行走习惯设定工作参数,具有操作和信息反馈的人机接口。

为了改善老年人与残疾人的行走与出行的状况,许多国家的研究机构对智能轮椅机器人进行了广泛的研究,并且一些已经产品化,传统的轮椅、助行、代步工具正被智能轮椅(或称为智能轮椅式移动机器人)、智能助行器(或称为智能助行机器人)所代替。德国不来梅大学研制了用于辅助残疾人的半自主轮椅机器人 FRIEND(图 1.11),该系统是将一个 MANUS 机器人手臂安装在轮椅上,由语音识别系统控制,轮椅的正前方安装了电子托盘,左面装有一个平板显示器,系统以程序化运动和用户控制运动两种模式工作。韩国研制出了轮椅机器人 KOREAS。KOREAS 是在电动轮椅上安装了一个 6 个自由度手臂的智能康复系统,手臂末端装有彩色摄像机来感知环境,可以用按键手动控制机器臂,或用简单口令操作机器人,完成基本任务。智能助行器对依靠传统拐杖行走的老年和残疾人群体,提高他们的生活自理能力、生活质量,扩大他们的活动空间非常重要。美国 CMU 大学研制了一种助行机器人,能够实现站或坐动作的协助、步行形态的识别、定位与导航等功能(图 1.12)。



图 1.7 PeopleBot 机器人

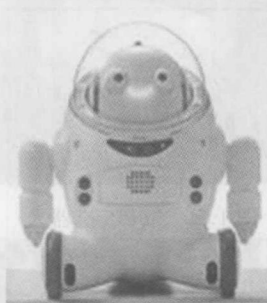


图 1.8 ifbot 机器人



图 1.9 Flo 机器人

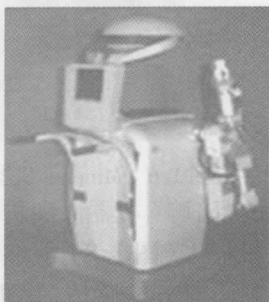


图 1.10 Care - O - bot 机器人



图 1.11 FRIEND 机器人



图 1.12 助行机器人

## 2. 国外仿人机器人发展概况

号称“机器人王国”的日本显然在研究仿人机器人领域走在了世界的前沿。日本早稻田大学的仿人机器人研究小组是世界上第一个研究仿人机器人的小组。该小组从 1968 年开始实施 WABOT 仿人机器人计划,直到 1973 年,号称仿人机器人之父的加藤一郎开发了世界上第一台仿人机器人 WABOT - 1(图 1.13)。虽然当时这台机器人只能简单地通过静态方式进行步行,但是它能够用日语和人进行简单的交流,并且可以通过视觉识别物体,还能用双手操作物体。之后,由于使用不同的驱动舵机,特别是各种不同

的人工肌肉和控制方法,该研究小组一直在推出各种型号的 WABOT 仿人机器人,并且把相关研究领域例如智能和生物技术进行有效的综合。Wabian - RV 仿人机器人(图1.14)则具有43个制动电机,8个被动关节,成为迄今为止最复杂的仿人机器人之一。它能够提前分析视觉和听觉来模拟人类的感官系统,并根据传感器信息,整个身体的运动都可以在线生成。它还可以通过高兴、悲伤和生气等表情来和人类进行情感上的交谈<sup>[6]</sup>。

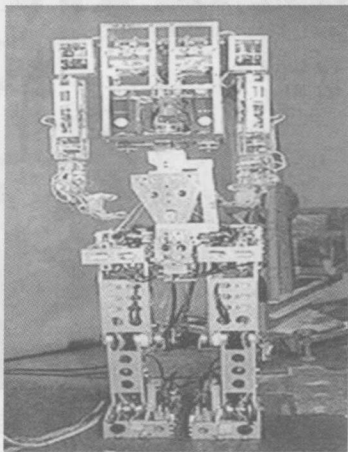


图 1.13 WABOT - 1 机器人

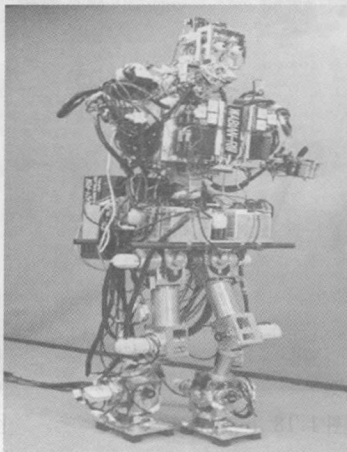


图 1.14 Wabian - RV 机器人

日本本田公司于1986年开始制订研制仿人机器人计划,经过长达10年的研究,于1996年成功研制出P2机器人(图1.15)<sup>[7]</sup>,P2身高180 cm,体重210 kg。P2的成功研制,使仿人机器人的研究步入了新的时代。

本田公司采用合金连杆,谐波减速驱动,消除了传动背隙,设计上采用计算机辅助设计,使用有限元的方法进行三维立体分析。这种开发方式成为研制仿人机器人的一种范本。本田公司在推出P2之后,于1997年又推出了身高和体重比P2稍小的P3(图1.16)<sup>[8]</sup>,在2000年推出了身高120 cm,体重43 kg的ASIMO(图1.17)<sup>[9]</sup>,ASIMO集成了当今世界上最先进的研究成果,在运动规划、视觉定位、语音识别等各个方面都有不俗的表现。其步态采用IWALK技术(Intelligent Real Time Flexible Walk),可以实时预测下一步的动作,从而提前改变自身重心来调整整体动作的连贯性。

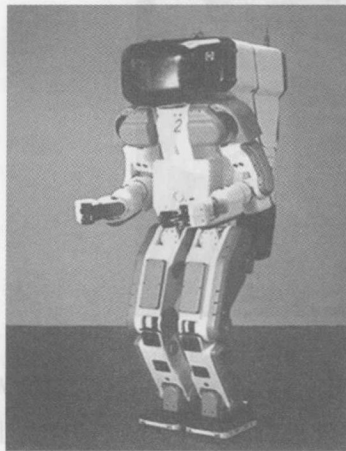


图 1.15 P2 机器人

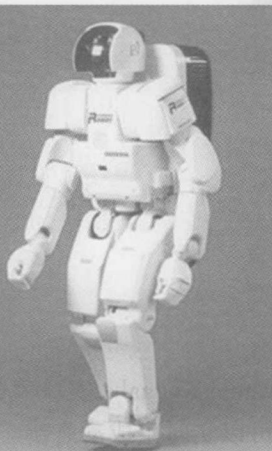


图 1.16 P3 机器人

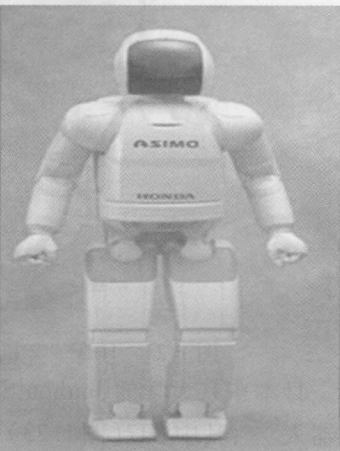


图 1.17 ASIMO 机器人

2004 年之后,新的技术应用在 ASIMO 身上,使其能够以每小时 6 km 的速度像人一样的平稳跑步,而且可以非常自然地做各种复杂的动作,例如上下楼梯、与人握手、端水、跳舞和踢球等(图 1.18 ~ 1.20)<sup>[10]</sup>。

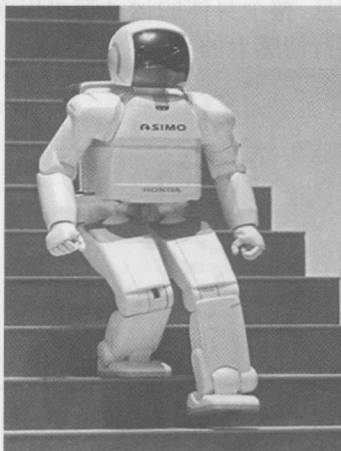


图 1.18 下楼梯

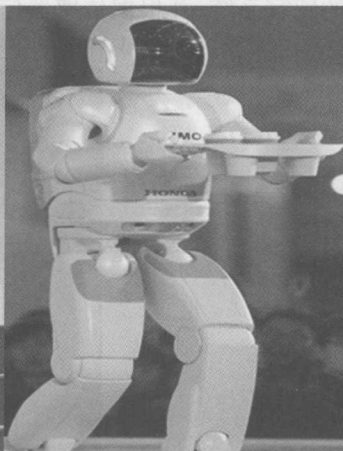


图 1.19 端水

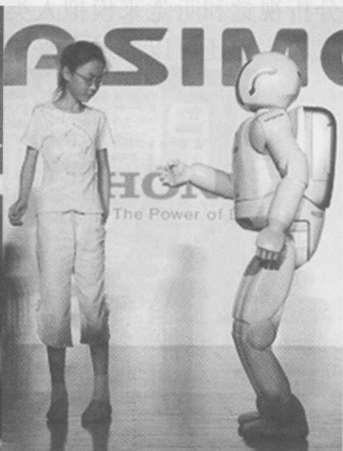


图 1.20 与人握手

日本经济产业省从 1998 年开始组织与人协调共处的机器人系统研究项目“Humanoid Robotics Project”,简称 HRP。该组织的宗旨就是开发与人共处同一空间并且能够和人一起协调工作的仿人机器人。为此,他们研制了一系列的仿人机器人,其中,比较著名的是 HRP-2(图 1.21)<sup>[11]</sup>。它身高 154 cm,体重 58 kg。具有 30 个关节,并且每个关节都是独立控制的,可以进行倒地并且起立动作<sup>[12][13]</sup>。最新推出的 HRP-4C 机器人(图 1.22),在语音和视觉上获得重大突破,采用了人造肌肉与皮肤,可以通过视觉和语音识别人唱歌时的表情和声音,从而进行模仿,效果惟妙惟肖,神情达到了与真人几乎难以区分的程度。



图 1.21 HRP-2 机器人



图 1.22 HRP-4C 机器人

日本东京大学的 Jouhou System Kougaka 实验室先后研制成功了 H5、H6、H7 型仿人机器人<sup>[14]</sup>,其中,H7(图 1.23)可以实时生成动态步态,在屋外进行行走。此外,还有富士通公司的 HOAP 系列机器人和丰田公司的乐队机器人等<sup>[15][16]</sup>。

除了日本之外,世界其他国家也在仿人机器人上进行了大量的研究。

韩国在仿人机器人研究方面加大投入,近几年大有赶超日本的趋势。2005年1月韩国的 KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) 研发成功具有41个自由度,身高125 cm,体重55 kg的 HUBO 仿人机器人(图1.24)。该机器人除了基本的行走之外,还具有和人类交谈的语音功能<sup>[17][18]</sup>。

法国的 de Mecanique des Soloders de Poitiers 实验室和 INRIA 机构于2000年开发了 BIP2000 仿人机器人(图1.25),该机器人腿部由15个自由度组成,可以实现行走、上下斜坡、上下楼梯等动作。采用全局规划层、步态规划层、控制实现层分层控制结构的策略,其目的是建立一个能适应各种外界环境的仿人机器人系统<sup>[6][19]</sup>。

德国的慕尼黑科技大学设计了 Johnnie 仿人机器人(图1.26),包括每条腿上的6个自由度在内,该款机器人具有17个自由度,身高180 cm,体重40 kg,采用有限元方式对机器人的体重进行优化,能够进行较快的行走<sup>[20~22]</sup>。

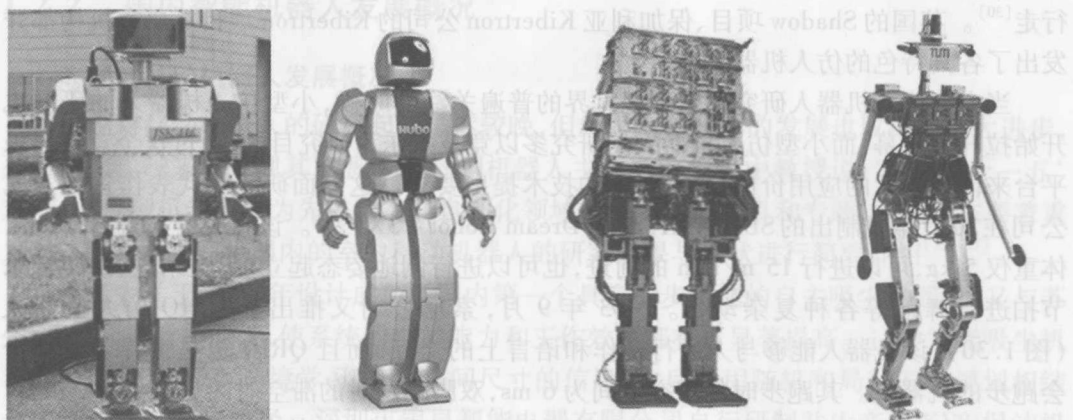


图1.23 H7 机器人 图1.24 HUBO 机器人 图1.25 BIP2000 机器人 图1.26 Johnnie 机器人

美籍华人郑元芳博士在1986年成功研制出美国第一台仿人机器人SD-2<sup>[23]</sup>,该机器人腿部具有8个自由度,能够进行静态行走。之后,他又提出把神经网络引入到步态控制中的想法,H. Benbrahim 和 W. T. Mi 等人通过在SD-2上增加两个膝关节,成功实现了用CMAC神经网络控制机器人的实时行走<sup>[24]</sup>。MIT的Pratt教授在Spring Flamingo和Spring Turkey仿人机器人的控制中提出了虚拟模型控制策略(Virtual Model Control, VMC)。通过弹簧振子、阻尼器等元件固连在机器人系统中产生虚拟驱动力和力矩,有效避免了机器人繁琐的逆运动学解算,能有效地利用机械势能使腿被动地完成摆动过程<sup>[25][26]</sup>。美国Cornell大学的Andy和Steve,荷兰Delft大学的Martijn和MIT的Russ分别开发了基于被动动力学的双足机器人(图1.27~1.29)。它们的部分关节有电机驱动,实现了平面步行,而且能量效率和人类步行效率相当。这是目前可以平面步行的两足机器人达到的最高效率。这三个双足机器人的共同特点是控制策略简单,机械设计巧妙<sup>[27][28]</sup>。

在跟踪及障碍物与目标点的检测,很好地完成导航任务。在国内外F1机器人Robocon全自主型足球机器人比赛中,多次获得冠军,而且作为黑龙江科技馆的一个



图 1.27 Delft 大学机器人

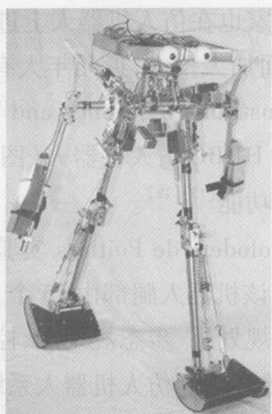


图 1.28 Cornell 大学机器人

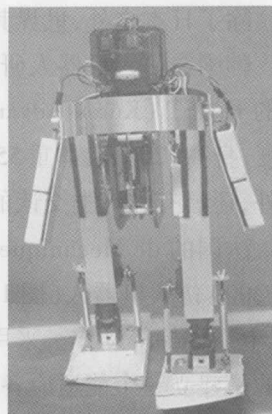


图 1.29 MIT 机器人

还有一些国家如比利时的布鲁塞尔大学的 Verrelst 教授研制的仿人机器人 Lucy<sup>[29]</sup>, 加拿大的 T. McGeer 研制的被动机器人具有二级倒立摆的特征,可以在斜坡上进行稳定行走<sup>[30]</sup>。英国的 Shadow 项目、保加利亚 Kibertron 公司的 Kibertron 项目等研究机构都开发出了各具特色的仿人机器人。

当大型仿人机器人研究正受到全世界的普遍关注的时候,小型仿人机器人的研制也开始拉开了序幕,而小型仿人机器人的研究多以竞技娱乐为研究目的,通过这个竞技娱乐平台来体现技术的应用价值,同时对新的技术提出要求。这方面研究的代表作首推索尼公司在 2000 年研制出的 SDR-3X (Sony Dream Robot-3X)<sup>[31]</sup>。该款机器人身高 50 cm, 体重仅 5 kg, 可以进行 15 m/min 的前进,也可以进行倒地姿态起立、单腿站立、按照音乐节拍进行舞蹈等各种复杂动作。2003 年 9 月,索尼公司又推出了 QRIO 仿人机器人(图 1.30),该机器人能够与人进行动作和语言上的交互,而且 QRIO 也是世界上第一个会跑步的机器人。其跑步时的滞空时间为 6 ms,双脚跳跃时的滞空时间为 10 ms。

法国机器人公司 Aldebaran Robotics 2005 年成功研制出一款名叫 Nao 的娱乐型仿人机器人(图 1.31)。该款机器人身高 58 cm, 体重 4.3 kg。全身 24 个自由度,其中,每条手臂和腿部各 5 个自由度。该机器人还配备了 2 个扬声器,4 个麦克风,2 个基于 CMOS 的数字摄像头,形成立体视觉,并且具有声纳、加速度、倾斜、压力等多种传感器,可以使用无线或有线的方式通过 Wi-Fi 网络进行连接。通过支持 C++ 的 Choregraphe 进行程序编写,该软件还可以与 Robotics Studio 和 Cyberbotics Webots 相兼容,并且支持 Linux, Windows 等多种平台。Nao 机器人在 2007 年已经取代 Sony 公司的 AIBO 四足狗机器人,成为 RoboCup 机器人足球的标准平台<sup>[32~34]</sup>。

韩国的 Mini 公司最近几年一直致力于研究小型竞技仿人机器人,先后研制出 ROBONOVA、MF-1 和 MF-2 型仿人机器人(图 1.32)。其中,ROBONOVA 型仿人机器人在教学和竞技方面取得了较好的成绩。另外,还有 JVC 公司于 2005 年 1 月推出的新型机器人“J4”,ZMP 公司开发的 NUVO 和日本 Kondo 公司推出的 DIY 人型机器人 KHR-1 等。这些机器人的特点就是身高都不超过 40 cm, 体重一般在 1.5 kg 以内,全身由可拆卸的直流电机组成,非常方便组装和更换,并且调试界面拟人化,对于初学者来说非常容易入门。

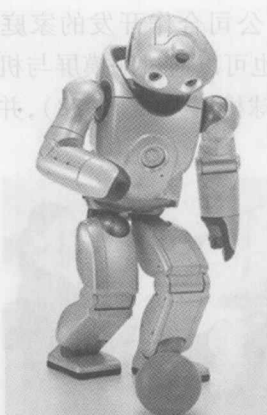


图 1.30 QRIO 机器人

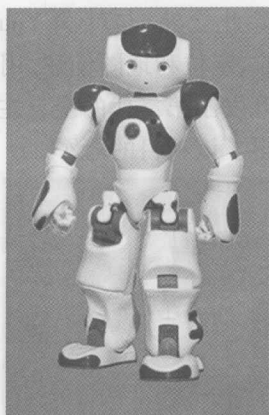


图 1.31 Nao 机器人

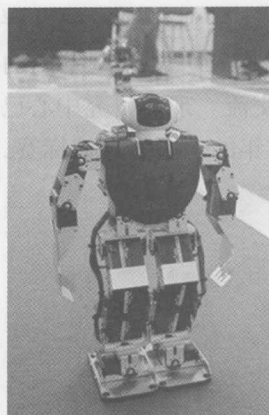


图 1.32 MF-2 机器人

## 1.2.2 国内智能机器人发展概况

### 1. 国内移动机器人发展概况

国内对移动机器人的研究起步虽然较晚,但经过近十几年的发展也取得了很大进步,并且国家也越来越重视其发展,863 计划机器人主题专家戴先中教授说:“按照‘十一五’规划,服务型机器人作为先进制造业自动化领域的一个重大项目和专题,国家立志要着重发展。”下面我们将国内的室内移动机器人的研究成果与现状进行简要介绍<sup>[35~37]</sup>。

浙江大学于 2001 年设计成功了国内第一个具有初步智能的自主吸尘机器人,又与苏州 TEK 公司合作研发,使系统的自主能力和工作效率都有了显著提高。这种智能吸尘机器人工作时,先进行环境学习,获得房间尺寸的信息,之后利用随机和局部遍历规划相结合的策略规划清扫路径。深圳市银星智能电器有限公司自行研制并生产的 KV8 保洁机器人是市场上比较受欢迎的一款低价产品,KV8 具有智能计算机系统、自动螺旋导航系统和 12 个感应头,可以对房间做出测量,同时圆碟式的外观设计,可以使它轻松地钻到桌子下面,家具底下,清扫到房间的每个角落,并且操作简单,使用方便,智能,安全,清洁效果显著。

海尔 - 哈尔滨工业大学机器人技术公司成功推出了 DY 型导游服务机器人(图 1.33)。该机器人由伺服驱动系统、多传感器信息避障及路径规划系统、语言识别及语言合成系统组成。导游机器人由蓄电池供电,可连续运行四小时,在一定的环境下可自主行走,并且能识别障碍物,游客通过语音识别系统可以和机器人进行简单的对话。此外,该公司又相继推出了保安型机器人和舞蹈机器人,分别如图 1.34 和图 1.35 所示。保安机器人可及时发现火光、烟雾、非法入侵等异常情况并报警,而智能型“跳舞机器人”可随着音乐节奏,与人一起“翩翩起舞”。

哈尔滨工业大学多智能体机器人研究中心开发了具有自主知识产权的 FIRA 全自主型足球机器人 HIT-I,如图 1.36 所示。该机器人拥有双目异构的视觉系统,能够进行全局定位、位置跟踪及障碍物与目标点的检测,很好地完成导航任务,在国内外 FIRA 的 Robotsot 全自主型足球机器人比赛中,多次获得冠军,而且作为黑龙江科技展览馆的一个

精彩亮点,受到参观者的好评。除此之外,与韩国 Youjin 公司合作开发的家庭机器人 Irobi(图 1.37),能实现室内的导航、定位和地图创建,用户也可以通过触摸屏与机器人进行信息交流。现在研究中心已经开发了第二代的全自主足球机器人(图 1.38),并且参加了 2010 年的全国足球锦标赛,取得了该项目的冠军。

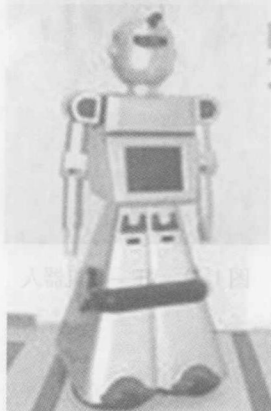


图 1.33 DY 导游机器人



图 1.34 保安机器人



图 1.35 跳舞机器人



图 1.36 HIT-I 机器人



图 1.37 Irobi 机器人

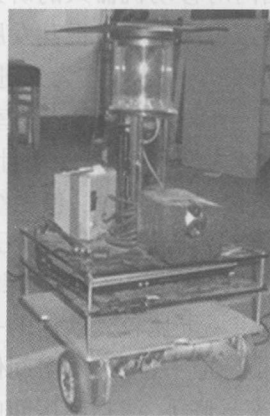


图 1.38 RHIT-II 机器人

中科院自动化所研制的自主移动机器人 CASIA-I(图 1.39),可广泛应用于医院、办公室、图书馆、展览馆等公共场所的服务、作业、展示与娱乐以及个人家庭服务等诸多方面。CASIA-I 机器人的基本结构包括传感器、控制器和运动机构,传感器由位于机器人底层的 16 个触觉红外传感器、位于机器人中间两层的 16 个超声传感器和 16 个红外传感器、位于机器人顶部的 CCD 摄像机等组成。它可根据周围环境实时做出躲避障碍物、寻找最优路径等运动控制决策,从而实现自主移动、定点运动、轨迹跟踪、漫游等功能。

上海交通大学机器人研究组研制成功了 FRONTIER 自主移动机器人(图 1.40 和图 1.41)。FRONTIER 机器人具有良好的稳定性、开放性和可扩展功能。该机器人机载控制器为笔记本电脑,视觉系统由全方位彩色视觉和前向彩色视觉组成。此外机器人还可配备声纳传感器和激光测距器以及用于 RoboCup 中型机器人比赛的全景摄像机。以 FRONTIER 机器人组成的机器人足球队多次获得国内机器人比赛的冠军,并作为中国大

学的参赛队首次参加了 RoboCup 中型组比赛。

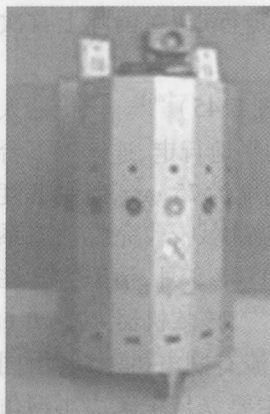


图 1.39 CASIA-I 机器人 图 1.40 FRONTIER-I 机器人 图 1.41 FRONTIER-II 机器人

此外,北京理工大学、北京航空航天大学、东北大学、同济大学、南开大学、中南大学、大连理工大学等高校以及部分国内高科技企业也一直致力于智能移动机器人领域的研发工作。目前,机器人技术正在渗透到社会的每一个角落,虽然我国机器人研究起步较晚,但通过“七五”到“十五”持续二十多年的科技攻关及国家高技术研究发展计划(863 计划)的支持,获得了很大发展。此外,我国的机器人市场也有很大潜力。2005 年已生产各种类型工业机器人和系统 600 台套,机器人销售额 14 亿元,机器人产业对国民经济的年收益额为 65 亿元。专家曾预测到 2010 年我国机器人拥有量为 17 300 台,年销售额为 93.1 亿元。据市场预测,“十一五”期间我国工业机器人的总需求量约为 8 000 ~ 20 000 台套,到 2015 年我国机器人市场的容量约达十几万台套。

## 2. 国内仿人机器人发展概况

我国研究仿人机器人起步较晚,但是经过这些年的努力,已经有了很大的发展。

哈尔滨工业大学从 1985 年开始研制双足步行机器人,先后研制出 HIT-I, HIT-II 和 HIT-III 三种型号的机器人,其中, HIT-III (图 1.42) 实现了步距 200 mm 的静态/动态步行,能够完成前进、后退、侧行、转弯、上下台阶及上斜坡等动作<sup>[38][39]</sup>。

国防科技大学于 1988 年开始研制双足机器人,并于 2000 年底成功研制出国内第一台仿人机器人“先行者”(图 1.43)。它身高 140 cm,重 20 kg,可在小偏差的不确定环境中行走,并且在 2003 年推出了可以实现无缆行走的第四代仿人机器人<sup>[40]</sup>。

上海交通大学于 1999 年成功研制出仿人机器人 SFHR<sup>[41][42]</sup>,该机器人的腿部和手臂分别有 12 和 10 个自由度,全身共有 24 个自由度。可以实现步长 10 cm 的步行运动。仿人机器人本体上配备了主动视觉系统,是研究多传感器集成、通用机器人学以及控制算法良好的实验平台。

北京理工大学的黄强教授于 2002 年成功研制出 BHR-1 型仿人机器人。该款机器人身高 158 cm,体重 76 kg,全身具有 32 个自由度,行走步幅 0.33 m,步速 1 km/h,并且能够根据自身力觉、平衡觉等传感器设备以及机器人自身的平衡状态和地面高度的变化,实现未知地面的稳定行走和太极拳表演。黄教授又在 2005 年成功研制 BHR-2 (汇童)