

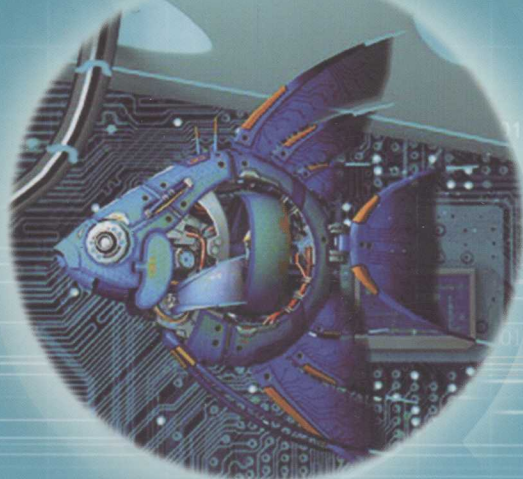
水中机器人（机器鱼）教育全局视觉系列教材

Underwater Robot (Robotic Fish) Technology Textbook Series: Global Vision League

仿生机器鱼

◎ 编著 谢广明 何宸光

Robot



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

TP242.2
19

013058779

水中机器人(机器鱼)教育全局视觉系列教材

仿 生 机 器 鱼

编著 谢广明 何宸光



HEUP 哈尔滨工程大学出版社



北航

C1665187

TP242.2
19

内 容 简 介

仿生机器鱼是中国素质体育机器人运动会水中专项全局视觉组竞赛项目所指定的标准竞赛机器人。本书全面系统地介绍了仿生机器鱼的仿生学原理、机械结构、硬件系统、运动控制与优化等内容。本书适用于参加中国素质体育机器人运动会水中专项运动全局视觉组竞赛项目的教练员、裁判员和运动员,也适用于机器人爱好者。

图书在版编目(CIP)数据

水中机器人(机器鱼)教育全局视觉系列教材. 仿生机器鱼/谢广明,何宸光编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013.7

ISBN 978-7-5661-0617-9

I. ①水… II. ①谢… ②何… III. ①海洋机器人-竞赛-教材 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 148161 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 10
字 数 162 千字
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次印刷
定 价 27.50 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

利國利民 造福子孫

功在當代 利在千秋

水中机器人(机器鱼)教育全局视觉系列教材

编审委员会

编委会主任：何宸光

编 委 会：晓 敏 韩立群 冀运熙 张 怡
邢小泉 秦吉宏 白 洁 乔 雷
滕兆勇

前言

江泽民同志指出：科学技术是第一生产力。振兴经济首先要振兴科技。只有坚定地推进科技进步，才能在激烈的竞争中取得主动。当前，我国经济正面临着加速发展、调整结构、提高效益的重大任务，尤其需要全社会提高科技意识，多方面增加科技投入，真正依靠科技进步。科技工作要面向经济建设主战场，在开发研究、高新技术及其产业、基础性研究这三个方面合理配置力量，确定各自攀登高峰的目标。在世界高科技领域中，中华民族要占有应有的位置。通过深化改革，建立和完善科技与经济有效结合的机制，加速科技成果的商品化和向现实生产力转化。不断完善保护知识产权的制度。认真抓好引进先进技术的消化、吸收和创新。努力提高科技进步在经济增长中所占的比重，促进整个经济由粗放经营向集约经营转变。

众所周知，文化是一个民族的实力，教育是一个民族的生机，体育是一个民族的国力。社会变革是极其巨大的，正是这极其巨大的变革迫使人们去认识新事物，迎接新挑战，迫使人们去思考许许多多前所未有的东西。服务机器人作为新生事物，已经走进人类社会，人类已经走进机器人时代。机器人技术涵盖了人类所有的学科知识和自然科学知识，特别是智能机器人和服务机器人与人们的生产生活密不可分。2012 年国家科技部组织编制了《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》，《规划》中明确了服务机器人技术是集机械、信息、材料、生物医学等多学科交叉的战略性高技术，对于相关技术与产业的发展起着重要的支撑和引领作用。在全国范围内实施《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》，实现机器人技术作为战略高技术，推动国防军事、智能制造装备、资源开发，发展未来服务机器人产业，有望培育新的战略性新兴产业，而且具有很强的技术辐射性与带动性，对促进智能制造装备发展、提高应急处理突发事件能力、发展医疗康复设备、增强军事国防实力等都具有十分重要的现实意义。

2011 年，国家体育总局与神州通信集团战略合作，共同调研机器人运动

的国际和国内现状,在美国、日本、欧洲国家等发达国家,机器人教育教学已被纳入中小学的必修课,有些大学还专门设立了机器人学科或机器人学院;机器人体育赛事方面,国际上著名赛事均由本国军事或太空部门主办,如 AUVic 赛事由国际无人系统联合会(AUVSI)和美国海军装备研究中心联合主办,水下 SAUC-U 赛事由全球海军技术研究局主办。机器人运动在我国必须规范开展,而规范的前提是规则。国家体育总局借鉴国际机器人教育教学和机器人体育赛事的先进经验,结合国内机器人赛事的现状,根据《中华人民共和国体育法》的有关规定,将机器人运动纳入国家社会体育运动项目,定义为中国素质体育机器人运动,以彰显这项运动的本质是素质教育。

中国素质体育机器人运动受到了社会各界的广泛关注,全国政协十一届五次会议上以关于“高度重视,深入做好素质体育机器人赛事”提出提案(3427号),国家体育总局对提案作出答复(体群字【2012】96号)。《答复》中明确做好六项工作:一、项目的基础建设;二、组织建设;三、竞赛系统建设;四、加强对外交流;五、把握文化大发展大繁荣对素质体育机器人运动带来的新机遇、新要求;六、加强与其他部门的合作,并于2012年颁布施行《中国素质体育机器人运动通用竞赛规则》,为这项利国利民伟大工程的规范开展、健康开展、广泛开展打下了坚实的基础。

此次出版的机器人专项教育系列教材在我国机器人教育领域尚属首次,此系列教材的出版使我国机器人基础教育、专项教育、学历教育的全面普及有了良好的开端,为我国机器人体育事业的健康发展、积极发展起到了巨大的推动作用。

何宸光

2013年3月于北京

目 录

第1章 绪论	1
1.1 机器人	1
1.2 仿生机器人	16
1.3 水下仿生机器人	23
1.4 仿生机器鱼	24
1.5 多机器人系统研究	42
思考与习题	51
参考文献	51
第2章 机器鱼的仿生学基础	54
2.1 引言	54
2.2 鱼类游动的物理原理	55
2.3 鱼类游动的运动学模型	57
思考与习题	63
参考文献	63
第3章 仿生机器鱼机械结构	64
3.1 鱼头设计	65
3.2 鱼体骨架	71
3.3 鱼尾设计	77
思考与习题	78
第4章 硬件系统	79
4.1 总体方案	79
4.2 控制系统	80
4.3 推进系统	83
4.4 通信系统	85
4.5 供电部分	86
4.6 测控平台	87

思考与习题	93
第 5 章 仿生机器鱼运动控制原理与方法	94
5.1 引言	94
5.2 基于鱼体波的控制方法	94
5.3 基于 CPG 的机器鱼运动控制	97
5.4 数值仿真	108
5.5 实体机器鱼实验	111
5.6 总结	113
思考与习题	113
参考文献	113
第 6 章 机器鱼的速度优化	117
6.1 引言	117
6.2 机器鱼速度优化实验平台简介	121
6.3 优化算法	127
6.4 总结	139
思考与习题	140
附录 名词解释	141
后记	143

第 1 章 绪 论

1.1 机 器 人

1.1.1 机器人定义

20 世纪人类最伟大的发明之一就是机器人技术,经过 50 余年的发展它已经取得了长足的进步。在科技界,科学家会给每一个科技术语一个明确的定义,但机器人问世已有几十年,机器人的定义仍然仁者见仁,智者见智,没有一个统一的意见。原因之一就是,机器人技术还在发展,新的机型、新的功能不断涌现。其根本原因是,机器人涉及了人的概念,成为一个难以回答的哲学问题。就像机器人一词最早诞生于科幻小说中一样,人们对机器人充满了幻想。也许正是由于机器人定义的模糊,才给了人们充分的想象和创造空间。

“机器人”一词诞生于 1920 年捷克作家卡雷尔·卡佩克发表的科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》。剧中,罗萨姆公司推出了一种能够代替人类进行劳动的机器人产品,将人们从繁重的、重复的劳动中解放出来。后来,罗萨姆公司对机器人进行了改进,使其有了情感。有了情感的机器人对自己的地位心生不满,终于有一天,起义爆发了,人类被屠戮殆尽。统治了世界的机器人痛苦地发现,由于技术资料被人类焚毁,它们无法繁殖后代,所以它们开始寻找人类的幸存者,但没有结果。最后,一对感知能力优于其他机器人的男女机器人相爱了,这时机器人进化为人类,世界又起死回生了。卡佩克在剧本中把捷克语“奴隶——Robota”写成了“Robot”,这就是机器人一词的起源。

1950 年,美国作家埃萨克·阿西莫夫在他的科幻小说 *I, Robot* 中首次使用了“Robotics”,即“机器人学”。阿西莫夫提出了“机器人三原则”:

- (1) 机器人必须不能伤害人类,且在人类受到伤害时不可袖手旁观;
- (2) 机器人必须服从人类的命令,除非这条命令与第一条相矛盾;
- (3) 机器人必须保护自己不受伤害,除非这种保护与以上两条相矛盾。



机器人学术界一直将这三原则作为机器人开发的准则,这是给机器人赋予的伦理性纲领,也是对机器人的定义。机器人三原则理论被提出的半个世纪以来,不断地被科幻作家和导演使用。阿西莫夫因此被称为“机器人学之父”。

其实并不是人们不想给机器人一个完整的定义,自机器人诞生之日起人们就不断地尝试着说明到底什么是机器人。但随着机器人技术的飞速发展和信息时代的到来,机器人所涵盖的内容越来越丰富,机器人的定义也不断充实和创新。在《机器人技术手册》中美国机器人工业协会给出的定义:机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置,通过可编程序动作来执行各种任务并具有编程能力的多功能机械手。日本工业机器人协会给出的定义:一种带有存储器件和末端操作器的通用机械,它能够通过自动化的动作替代人类劳动。我国科学家对机器人的定义:机器人是一种自动化的机器,所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力,如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力,是一种具有高度灵活性的自动化机器。

在研究和开发未知及不确定环境下作业的机器人的过程中,人们逐步认识到机器人技术的本质是感知、决策、行动和交互技术的结合。随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深,机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。结合这些领域的应用特点,人们研制了各式各样的具有感知、决策、行动和交互能力的特种机器人和各种智能机器人,如移动机器人、微机器人、水下机器人、医疗机器人、军用机器人、空中空间机器人、娱乐机器人等。对不同任务和特殊环境的适应性,也是机器人与一般自动化装备的重要区别。这些机器人从外观上已远远脱离了最初仿人型机器人和工业机器人所具有的形状,更加符合各种不同应用领域的特殊要求,其功能和智能程度也大大增强,从而为机器人技术开辟出更加广阔的发展空间。

中国工程院院长宋健指出:“机器人学的进步和应用是20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。”机器人技术综合了多学科的发展成果,代表了高技术的发展前沿,它在人类生活应用领域的应用在不断扩大,引起国际上对机器人技术的重新认识。

1.1.2 机器人历史

机器人这一术语产生于20世纪,真正意义上实现机器人制造的历史就只有短短的50年,然而要制造一个具有人的功能的自动机器却是人类有史以来

的一个梦想。这要追溯到遥远的古代，正是有了这些具有想象力和创新精神的前人，人类的机器人梦想才得以不断地实现，机器人技术才得以不断的进步与发展。

1. 古代的机械

最早的机械自动装置产生于中国，这个要追溯到公元前 400 多年的春秋战国时期，被后人称为土木工匠祖师的鲁国人鲁班用竹木削成飞鸢，借助风力飞翔于空中。《墨子》一书中有这样的记载：“公输子削竹木以为鸢，成而飞之，三日不下。”就是说鲁班制作的木鸟，能飞上高空，三天不降落。这是有记载的最早的机械装置，如图 1.1 所示。鲁班的发明故事反映了古代人对机械的想象与创造，是古代劳动人民智慧的象征。

东汉时期（公元 25—220 年），张衡发明了测量路程用的“记里鼓车”，车上装有木人、鼓和钟，每走 1 里，击鼓 1 次，每走 10 里击钟一次，奇妙无比，如图 1.2 所示。三国时期蜀汉（公元 221—263 年），丞相诸葛亮既是一位军事家，又是一位发明家，他成功地创造出了“木牛流马”，可以运送军用物资，可以说是最早的陆地军用机器人。

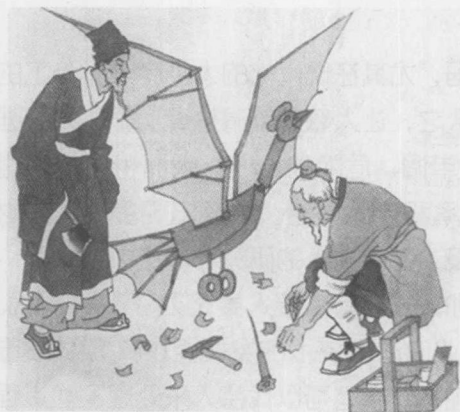


图 1.1 鲁班的木鸟图



图 1.2 记里鼓车

希罗是亚历山大时代的一位古希腊数学家，居住于托勒密埃及时期的罗马省。他也是一名活跃于其家乡亚历山大里亚的工程师，他被认为是古代最伟大的实验家。希罗发明的汽转球，是有文献记载以来的第一部蒸汽机。世界上第一部自动售卖机也是出于希罗之手，当在机器顶上的槽接受了投币者的硬币



时,机器就会分配一定分量的圣水给投币者。这个发明被收纳在希罗的书——《机械学与光学》的列表里。

14 世纪前期机械时钟的出现到 16 世纪自动玩偶的兴起与普及象征着欧洲机械工艺的飞速蓬勃发展。机械时钟最早出现在意大利,后来普及到欧洲各国。14 世纪中期,欧洲的英国、法国等国家的大型建筑物上面出现了报时钟,利用重力作用产生动力。15 世纪末、16 世纪初出现了铁制发条,这成为了新的动力源,极大程度地推动了机械钟表和自动玩偶的发展,为其小型化创造了条件。1665 年,荷兰的科学家惠更斯应用伽利略的理论设计了钟摆,并指导制造成功了第一台摆钟。1675 年,他又用游丝取代了原始的钟摆,这样就形成了以发条为动力、以游丝为调速机构的小型钟,同时也为制造便于携带的袋表提供了条件。1738 年,法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明了一只机器鸭,它会嘎嘎叫,会游泳和喝水,还会进食和排泄。瓦克逊的本意是想把生物的功能加以机械化而进行医学上的分析。1773 年,瑞士的 Jaquet Droz 和他的儿子及徒弟共同创作了历史上最著名的写字、绘画、风琴演奏三个机械人偶,并于 1774 年在拉夏德封首度向世人展示。这三个机械人偶极尽精巧,表演逼真,宛如真人一般,能向听众行礼,改变视线及鼓动胸部等。

2. 现代的机器人

随着社会的发展,社会分工越来越细,尤其在现代化的大生产中。分工的细化导致个人工作的不断重复性,久而久之,让人感到单调枯燥。于是人们强烈希望用某种机器代替完成那些枯燥、单调、危险的工作,因而机器人问世了。先进的机器设备能够提高劳动生产率和产品质量,创造出更多的社会财富,提供更多的就业机会。各国也争相投入到机器人的研究与生产中。

1946 年,世界上第一台计算机研制成功,标志着人类跨入了数据时代。计算机技术取得的惊人成就,推动了工业自动化技术的发展。1947 年,美国原子能委员会的阿尔贡研究所研发了遥控机器手,可以代替人来处理实验过程中的放射性物质。并且 1948 年开发了机械式的主从机器手。1952 年,第一台数控机床诞生,大大提高了劳动生产效率和工艺精度。与数控机床相关的控制、机器零件的研究奠定了机器人发展的基础。

1954 年美国乔治·德沃尔最早提出了工业机器人的思想,设计出了一台可编程的工业机器人,并为该机器人申请了专利。该专利的要点是借助伺服技术控制机器人的关节,机器人通过实现动作的记录和再现来重复人手的动

作，这就是早期的示教再现机器人。1962年，美国万能自动化公司生产了第一台机器人 UNIMATE，并在通用汽车公司投入使用，这标志着第一代机器人的诞生。从此机器人开始进入人类历史舞台，人类以机器人为载体，以自己的智慧和劳动，揭开了历史的新篇章。

1962年美国 AMF 公司生产出“VERSTRAN”（意思是“万能搬运”），是一种真正商业化的工业机器人，并出口到世界各国，掀起了全世界对机器人和机器人研究的热潮。这种机器人的控制方式类似于数控机床，但是外形上有很大的区别，主要是由类似人的手和手臂组成的。

1962—1963年，传感器的应用提高了机器人的可操作性。人们试着在机器人上安装各种各样的传感器，以提高机器人的感知能力，从而增强机器人自身的判断能力。例如，1961年恩斯特采用的触觉传感器；托莫维奇和博尼 1962年在世界上最早的“灵巧手”上用到了压力传感器；而麦卡锡 1963年则开始在机器人中加入视觉传感系统，并在 1965年，帮助 MIT 推出了世界上第一个带有视觉的传感器，能识别并定位积木的机器人系统。

1965年，约翰·霍普金斯大学应用物理实验室研制出 Beast 机器人。Beast 已经能通过声呐系统、光电管等装置，根据环境校正自己的位置。20世纪60年代中期开始，美国麻省理工学院、斯坦福大学、英国爱丁堡大学等陆续成立了机器人实验室，美国兴起研究第二代带传感器、“有感觉”的机器人，并向人工智能进发。

1968年，美国斯坦福研究所公布了他们研发成功的机器人 Shakey。该机器人带有视觉传感器，能根据人的指令发现并抓取积木，不过控制它的计算机有一个房间那么大。Shakey 可以算是世界第一台智能机器人，拉开了第三代机器人研发的序幕。

1969年日本早稻田大学加藤一郎实验室研发出第一台双脚走路的机器人。加藤一郎长期致力于研究仿人机器人，被誉为“仿人机器人之父”。日本专家一向以研发仿人机器人和娱乐机器人的技术见长，后来更进一步，催生出本田公司的 ASIMO 和索尼公司的 QRIO。从 20 世纪 60 年代后期起，喷漆、弧焊机器人相继在工业生产中得到应用，由加工中心和工业机器人组成的柔性加工单元标志着单件小批生产方式的一个新的高度。几个工业化国家竞相开展了具有视觉、触觉、多手、多足，能超越障碍、钻洞、爬墙、水下移动的各种智能机器人的研究工作，并开始在海洋开发、空间探索和核工业中试用。整个 20 世



纪 60 年代, 机器人技术虽然取得了许多进展, 建立了产业并生产了多种机器人商品, 但是在这一阶段多数工业部门对应用机器人还持观望态度, 机器人在工业应用方面的进展并不快。

在 20 世纪 70 年代, 大量的研究工作把重点放在使用外部传感器来改善机械手的操作。1973 年世界上第一次机器人和小型计算机的携手合作, 就诞生了美国 Cincinnati Milacron 公司的机器人 T3。博尔斯和保罗在斯坦福使用视觉和力反馈, 表演了与 PDP-10 计算机相连由计算机控制的“斯坦福”机械手, 用于装配自动水泵。几乎同时, IBM 公司的威尔和格罗斯曼在 1975 年研制出了一个带有触觉和力觉传感器的计算机控制的机械手, 用于完成具有 20 个零件的打字机机械装配工作。

1978 年, 美国 Unimation 公司推出通用工业机器人 PUMA, 这标志着工业机器人技术已经完全成熟。PUMA 至今仍然工作在工厂第一线。它是一个电动机驱动, 关节式结构, 多 CPU 二级微机控制, 采用 VAL 专用语言, 可配置视觉、触觉的力觉感受器, 是技术较为先进的机器人。同年, 日本山梨大学的牧野洋研制出具有平面关节的 SCARA 型机器人。整个 20 世纪 70 年代, 出现了更多的机器人商品, 并在工业生产中逐步推广应用。随着计算机科学技术、控制技术和人工智能的发展, 机器人的研究开发, 无论是水平还是规模都得到了迅速发展。据国外统计, 到 1980 年全世界约有 2 万余台机器人在工业中应用。

1984 年, 恩格尔·伯格又推出了机器人 Helpmate, 这种机器人能在医院里为病人送饭、送药、送邮件。同年, 他还预言“我要让机器人擦地板, 做饭, 出去帮我洗车, 检查安全”。

进入 20 世纪 80 年代后, 机器人生产继续保持了 20 世纪 70 年代后期的发展势头。到 20 世纪 80 年代中期机器人制造业成为发展最快和最好的经济部门之一。机器人在工业中开始普及应用, 工业化国家的机器人产值近几年以年均 20%~40% 的增长率上升。1984 年全世界机器人使用总台数是 1980 年的四倍, 到 1985 年底, 使用总台数已达到 14 万台, 1990 年达到 30 万台左右, 其中高性能的机器人所占比例不断增加, 特别是各种装配机器人的产量增长较快, 和机器人配套使用的机器视觉技术和装置正在迅速发展。

1998 年丹麦乐高公司推出机器人套件 (Mind Storms), 让机器人制造变得跟搭积木一样, 相对简单又能任意拼装, 使机器人开始走入个人世界。

1999 年日本索尼公司推出犬型机器人爱宝 (AIBO), 当即销售一空, 从

此娱乐机器人成为目前机器人迈进普通家庭的途径之一,如图 1.3 (a) 所示。

2002 年美国 iRobot 公司推出了吸尘器机器人 Roomba, 它能避开障碍, 自动设计行进路线, 还能在电量不足时, 自动驶向充电座。Roomba 是目前世界上销量最大、最商业化的家用机器人, 如图 1.3 (b) 所示。

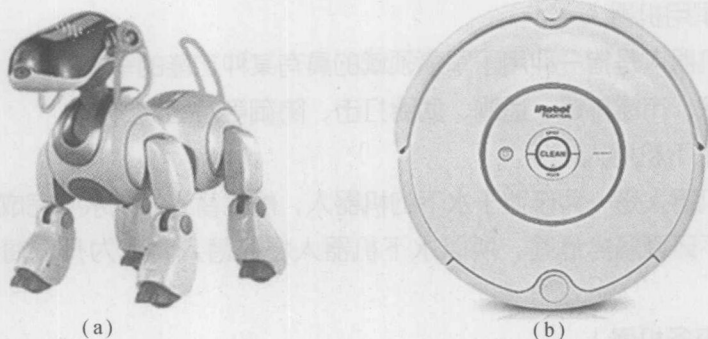


图 1.3 AIBO 和 Roomba

(a) 机器人爱宝 (AIBO); (b) 吸尘器机器人 Roomba

2006 年 6 月, 微软公司推出 Microsoft Robotics Studio, 机器人模块化、平台统一化的趋势越来越明显, 比尔·盖茨预言, 家用机器人很快将席卷全球。

2008 年中国研制的福娃机器人能够感应到 1 m 范围内的游客, 可以与人对话、摄影留念、歌唱舞蹈等, 还能回答与奥运会有关的问题。

到了 21 世纪, 随着微电子、MEMS 技术和人工智能的发展, 机器人技术进入了一个飞速发展的阶段。随着智能技术的应用, 机器人智能化程度不断增强。例如, 临场感技术、虚拟现实技术、多真体技术、人工神经网络技术、遗传算法和遗传编程、放声技术、多传感器集成和融合技术以及纳米技术等。各国争相投入大量资金进行研究, 相继取得了重大的突破。可以说, 智能机器人将是未来机器人技术发展的方向。

1.1.3 机器人的分类

机器人分类方法有很多, 不同的分类方式可以将机器人划分为不同的类别。本书主要介绍以下几种方法。



1. 按照机器人用途划分

(1) 工业机器人

工业机器人是指面向工业领域的多关节机械手或者多自由度机器人。工业机器人是自动执行工作的机器装置,主要用于生产制造业,靠自身动力和控制能力来实现例如焊接、搬运、装配、检验等作业。

(2) 军用机器人

军用机器人是指一种用于军事领域的具有某种功能的军事装置,其主要用于侦察勘探、布雷排爆、运输、武器打击、防御等方面。

(3) 水下机器人

水下机器人是一种作业于水下的机器人,能代替人潜入水中完成某些极限作业。水下环境恶劣危险,所以水下机器人将代替人类成为开发海洋的重要工具。

(4) 服务机器人

服务机器人主要是指一类能协助人类处理日常生活事务,完成有益于人类健康的服务工作,但是不包括从事生产的设备。例如,从事维护保养、修理、运输、清洁、保安、监护等一些贴近人们生活工作的机器人。

(5) 娱乐机器人

娱乐机器人是以供人观赏、娱乐为目的的机器人。它们具有生物的一些外部特征,可以像人、动物等,同时具有机器人的功能,可以行走或完成动作,可以有语言能力,会唱歌,有一定的感知能力。如机器人歌手、足球机器人、玩具机器人、舞蹈机器人等。

(6) 医用机器人

医用机器人是指有广泛的感觉系统、智能装置、模拟装置,从事医疗或辅助医疗工作的机器人。一般有运送物品机器人、移动病人机器人、临床医疗用机器人、为残疾人服务机器人、护理机器人、医用教学机器人、手术机器人等。

2. 按驱动方式划分

(1) 液压驱动

液压驱动是利用液体的抗挤压力来实现力的传递,推动装置运动。

(2) 气压驱动

气压驱动类似液压驱动,效率没有液压驱动高,但是缓冲性好,不会对器