



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

The Principle and Design of the Mobile Robot

# 移动机器人 原理与设计

王曙光 主编

王曙光 袁立行 赵勇 编



- 介绍小型移动机器人的基础理论、基本原理及结构
- 以“创意之星”机器人为例，介绍传感器、驱动装置  
给出几个设计实例和实验指导供读者参考和方便教学



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

The Principle and Design of the Mobile Robot

# 移动机器人 原理与设计

王曙光 主编

王曙光 袁立行 赵勇 编



人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

移动机器人原理与设计 / 王曙光主编. -- 北京 :  
人民邮电出版社, 2013. 3  
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-115-30037-9

I. ①移… II. ①王… III. ①移动式机器人—高等学  
校—教材 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第006781号

## 内 容 提 要

本书介绍了小型移动机器人的基础理论、基本原理及结构。以“创意之星”机器人为例,对机器人中常用的传感器、驱动装置作了较为详细的介绍。本书给出了几个设计实例,供读者参考;对移动机器人定位导航技术也作了介绍;最后给出了实验指导,以方便实践教学。

全书由9章组成,分别介绍机器人的概述,移动机器人的运动机构,移动机器人的运动学原理,“创意之星”机器人的开发环境,移动机器人的驱动技术,几种常用的传感器、不确定性表示及特征提取,移动机器人导航技术,关于多机器人系统的理论,最后介绍几个设计实例。

本书简洁易懂、实践性较强,可作为高等院校智能科学与技术、自动化、机电一体化、机械设计制造及自动化等相关专业的教材。

21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

### 移动机器人原理与设计

- 
- ◆ 主 编 王曙光  
编 王曙光 袁立行 赵 勇  
责任编辑 李海涛
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 12.25 2013年3月第1版  
字数: 298千字 2013年3月北京第1次印刷

---

ISBN 978-7-115-30037-9

定价: 33.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

从名称上看，机器人涉及机器和人。从发展历史来看，真正实用的机器人从产生到如今也不过 50 余年。因此，对“机器人”，科技界目前尚无明确的定义。但机器人技术发展迅速，也因为与“人”的特殊关系，而别具魅力。

某些专业，如自动化、智能科学与技术等，已经开始讲授有关机器人技术的课程。目前，国内优秀的机器人技术教材，基本是以工业机器人（可编程机械手臂）为对象的，这种装置更像机器，不像人。机器人与人不但要“形似”，更要“神似”。但要做到这一点，目前看来，还有很长一段路要走。

本书以小型移动机器人为对象，主要讲授移动机器人的基本结构、基本理论，以及基本的实现方法；对机器人运动学以及机器人技术的最新发展略有涉及。内容上理论与实践结合，系统性强，理论上力求易学易懂，适合普通高等院校本科生学习。

全书分为 9 章，另外还有一部分课程实验内容。第 1 章简要介绍了机器人的发展和应用现状、机器人的体系结构，第 2 章介绍了移动机器人的运动机构，第 3 章讲解了移动机器人的运动学模型的数学基础、建模分析过程，第 4 章对移动机器人的驱动方法、驱动装置作了较为详细的阐述，第 5 章讲解的是“创意之星”模块化机器人平台的内容和设计方法，第 6 章主要介绍了几种移动机器人最常用的传感器，以及误差表示与特征提取的理论，第 7 章对移动机器人定位导航技术作了综合性的介绍，第 8 章介绍了多机器人系统，第 9 章结合机器人竞赛，给出了几个移动机器人设计开发的实例。其中第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章由袁立行编写，第 2 章、第 3 章、第 9 章由赵勇编写，第 4 章及实验部分由王曙光编写。

在本书的编写过程中，北京博创兴盛科技有限公司提供了很多素材并提出了宝贵意见，同时参考了国内外学者的大量论文和专著，未能详尽列出，谨在此表示衷心感谢。本书在出版过程中得到了人民邮电出版社的大力支持，在此表示衷心感谢。

本书参考学时为 40~50 学时，第 6 章、第 7 章、第 8 章内容视情况可选讲一部分。由于编者学识有限，错误之处在所难免，敬请专家、读者给予批评指正。

编 者

2012 年 10 月



# 目 录

第1章 绪论	1	第3章 移动机器人运动学	32
1.1 引言	1	3.1 运动学概述	32
1.2 机器人的分类与组成	1	3.2 运动学模型的建立	32
1.3 机器人的体系结构	10	3.2.1 机器人的位置表示	33
1.3.1 分层式体系结构 (Hierarchical Architecture)	10	3.2.2 运动学模型	34
1.3.2 包容式体系结构 (Subsumption Architecture)	11	3.3 运动学约束	36
1.3.3 混合式体系结构	12	3.3.1 轮子运动学约束	36
1.4 移动机器人	13	3.3.2 机器人运动学约束	38
1.5 机器人竞赛	14	3.4 移动机器人的机动性	41
1.5.1 机器人足球比赛	15	3.4.1 活动性程度	41
1.5.2 机器人灭火比赛	16	3.4.2 可操纵度	42
1.5.3 国际机器人奥林匹克 竞赛	16	3.4.3 机动性	43
1.5.4 FLL 世锦赛	17	3.5 运动控制	43
1.5.5 中国教育机器人大赛	17	3.5.1 非完整约束和非完整 系统	44
1.5.6 中国机器人大赛暨 RoboCup 公开赛	17	3.5.2 移动机器人运动控制	44
习题	19	3.5.3 点镇定举例	46
第2章 移动机器人的运动机构	20	习题	49
2.1 腿足式机器人	20	第4章 移动机器人驱动	51
2.1.1 腿的数目	21	4.1 直流电机及其控制、 驱动技术	52
2.1.2 腿的自由度	21	4.1.1 直流电机	52
2.1.3 稳定性	21	4.1.2 直流电机驱动电路	52
2.1.4 步态规划	22	4.1.3 驱动示例	56
2.1.5 步态设计	24	4.2 步进电机及其控制、 驱动技术	57
2.2 轮式移动机器人	27	4.2.1 步进电机工作原理	57
2.2.1 轮子的设计	27	4.2.2 步进电机驱动	61
2.2.2 常见的轮式底盘结构及 运动关系	28	4.3 舵机及其驱动、控制技术	62
2.2.3 轮子和底盘结构选取的 原则	30	4.3.1 舵机的工作原理	62
习题	31	4.3.2 CDS5500 舵机	62
		4.3.3 舵机调试软件 RobotSevo Terminal	67
		习题	71

第5章 开发平台	72	习题	118
5.1 硬件系统	72	第8章 多机器人系统	119
5.1.1 结构件	72	8.1 多机器人协作	119
5.1.2 控制器	72	8.1.1 多机器人协作的方法	119
5.1.3 传感器	73	8.1.2 多机器人协作的 关键问题	120
5.1.4 执行器	79	8.2 多机器人定位与建图	121
5.1.5 下载调试器	79	8.2.1 多机器人交替定位 建图方法	122
5.2 软件环境	79	8.2.2 基于栅格地图的 复杂环境建图	123
5.2.1 NorthSTAR 软件简介	79	8.2.3 基于 PF-EKF 的 相对观测定位方法	127
5.2.2 控件库	81	8.2.4 基于免疫机理的 多机器人建图方法	127
5.2.3 NorthSTAR 软件设计	84	习题	129
习题	87	第9章 移动机器人设计开发实例	130
第6章 移动机器人感知	88	9.1 灭火机器人	130
6.1 移动机器人的传感器	88	9.1.1 课题背景	130
6.1.1 传感器分类	88	9.1.2 模拟房子介绍	130
6.1.2 红外传感器	89	9.1.3 系统总体设计	131
6.1.3 超声波传感器	91	9.1.4 硬件设计	131
6.1.4 图像传感器(摄像头)	94	9.1.5 软件流程	134
6.2 不确定性的表示	97	9.1.6 系统调试	135
6.2.1 误差的统计表示	98	9.1.7 实物图	136
6.2.2 误差的传播	98	9.2 擂台机器人	140
6.3 特征提取	99	9.2.1 课题背景	140
6.3.1 基于距离数据的 特征提取	100	9.2.2 擂台赛场地介绍	140
6.3.2 基于可视表象的 特征提取	101	9.2.3 系统总体设计	141
习题	102	9.2.4 硬件设计	141
第7章 移动机器人导航	103	9.2.5 软件设计	144
7.1 移动机器人定位	103	9.2.6 系统调试	146
7.1.1 定位的基本方法	103	9.2.7 实物图	146
7.1.2 定位用的传感器	105	9.3 吸尘机器人	150
7.1.3 基于激光雷达的地图匹配 自定位	110	9.3.1 课题背景	150
7.1.4 基于视觉的运动目标 跟踪自定位	111	9.3.2 模拟房子介绍	151
7.1.5 卫星定位	114	9.3.3 系统总体设计	151
7.2 移动机器人导航技术	114	9.3.4 硬件设计	152
7.2.1 传统的导航方法	115	9.3.5 软件设计	154
7.2.2 智能导航方法	116		

### III | 移动机器人原理与设计

9.3.6 系统调试 .....	154	实验三 四轮车 .....	169
9.3.7 实物图 .....	155	实验四 机器龟 .....	172
习题 .....	161	实验五 两轮自平衡小车 .....	177
<b>课程实验</b> .....	162	实验六 语音问答实验 .....	181
实验一 入门实验 .....	162	实验七 画图机器人 .....	184
实验二 简易机械臂 .....	167	<b>参考文献</b> .....	190

## 1.1 引言

机器人 (Robot) 是可以自动执行工作的机器装置, 因此机器人可以看成是专门设计出来的一种可以接受人类指挥, 又可以运行预先安装的程序系统的机器装置, 原则上该系统可以根据以人工智能技术制定的原则纲领行动, 因此有了“人”这个元素, 所以称为“机器人”。研制机器人的主要目的是协助或取代人类进行部分工作, 如生产业、建筑业、服务业、危险环境或者特种环境下的工作。机器人在工业、医学、农业、建筑业甚至军事等领域均有重要应用。

值得注意的是, 从外形上来看, 绝大多数的机器人是很不像人类的, 而且即使是最高级的机器人也不会做的和人一模一样。我们可以这样理解, 机器人是用机械传动、现代微电子技术、传感器技术、自动控制技术、人工智能等高科技制造的一种能模仿人类的某种技能的机械电子设备, 它是在电子、机械及信息技术的基础上发展而来的, 是高级整合控制论、机械电子、计算机、材料和仿生学的产物。

人的体征很难有合适的装置来模仿, 我们把能自主完成人类所赋予的任务与命令的机器装置, 归为机器人家族的成员。例如世界上第一台真正实用的工业机器人诞生于 20 世纪 60 年代初期, 它的基座上有一个机械臂, 可以绕着轴在基座上旋转, 臂上有一个小一些的机械臂, 可以“张开”和“握拳”, 完全是一个坦克的炮塔模样。

## 1.2 机器人的分类与组成

随着科学技术的不断进步, 机器人学科越来越具有强大的生命力, 它在某种程度上已经代表信息技术、自动化技术、系统集成技术等最新发展。自 20 世纪 50 年代美国发明第一台工业机器人以来, 机器人的发展已近半个世纪。纵观半个世纪以来机器人的发展历史, 机器人技术在需求的牵引下已得到了巨大的发展。目前, 国际上工业机器人已是成熟的产业。据国际机器人联合会统计, 到 1997 年末, 全世界工业机器人的总装机量已超过 71 万台。现在, 全世界机器人已经很难确定具体的装机量。单从工业机器人方面, 我国工业机器人自 2009 年起至 2011 年将达到年产量 134100 台的水平。在 2011 年新安装各类工业机器人 9500 台, 市场保有量将达到 48600 台。其中主要集中在汽车、汽车零部件、摩托车、电器、工程机械、



石油化工等行业。中国作为亚洲第三大工业机器人需求国，市场发展稳定，汽车及其零部件制造仍然是工业机器人的主要应用领域，随着我国产业结构调整升级不断深入和国际制造业中心向中国的转移，我国的机器人市场会进一步加大，市场扩展的速度也会进一步提高。随着新兴应用领域的不断发展及传统汽车产业的需求，由于我国制造业的发展，特别是汽车及汽车零部件制造业的发展，工业机器人仍将保持稳定的增长势头。

现在，国际上对机器人概念的认识已经趋近一致。一般来说，人们都可以接受这种说法，即机器人是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。联合国标准化组织采纳了美国机器人协会给机器人的定义“一种可编程和多功能的操作机，或是为了执行不同的任务而具有可用计算机改变和可编程动作的专门系统”。机器人的分类，现在比较流行的有两种，国际上从应用环境出发将机器人分为制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务与仿人型机器人；国内的机器人专家从应用环境出发，将机器人分为工业机器人和特种机器人。这两种分类方法是一致的。

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人。工业机器人是自动执行工作的机器装置，是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。工业机器人的主要特点是借助伺服技术控制机器人的关节，利用人手对机器人进行动作示教，机器人能实现动作的记录和再现，即所谓的示教再现机器人。从1954年美国戴沃尔最早提出工业机器人的概念，到1959年UNIMATION公司的第一台机器人在美国诞生，现有的工业机器人绝大多数都采用这种控制方式。应该说工业机器人的发展开创了机器人发展的新纪元。

工业机器人被广泛地应用于汽车、电器、摩托车、工程机械等制造业领域，从事焊接、装配、喷漆、搬运、包装、检测等工作。机器人在发达国家已从20世纪七八十年代的“精品”发展成为目前广泛使用的“消费品”。目前国际上工业机器人的发展主要致力于进一步降低成本、提高效率、改善柔性和扩展应用。制造业大量应用工业机器人带动了制造业领域机器人的应用和发展。

非制造业应用的机器人不像工业机器人那样仅具有人手臂的形态和功能，而是呈现出千姿百态、各式各样的外形和功能。非制造业环境通常也不像制造业环境那样具有结构化（即任务和工作环境已知，可重复），它要求机器人集感知、思维和行动于一体。因此，这类机器人在国际上通常称为Advanced Robot，中文常称之为特种机器人、先进机器人或智能机器人。特种机器人是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人，包括水下机器人、空间机器人、极限作业机器人、微机器人、建筑机器人、医疗机器人、采掘机器人、服务机器人、农业机器人、个人机器人、娱乐机器人等。在特种机器人中，有些分支发展很快，有独立成体系的趋势，如服务机器人、水下机器人、军用机器人、微操作机器人等。目前国际上特种机器人的研究与开发非常活跃，开发了各种领域应用的机器人，尽管目前特种机器人还没有形成产业，但是却具有更为广阔的市场前景。下面列举3种机器人进行详细介绍。

## 一、仿生机器人

众所周知，自然界中的生物以多彩多姿的形态、灵巧机敏的动作活跃于自然界。这其中人类灵巧的双手和可以直立行走的双足是最具灵活特性的，而非人生物的许多机能又是人类无法比拟的，如柔软的象鼻子，可以在任意管道中爬行的蛇，小巧的昆虫等。因此，自然界

生物的运动行为和某些机能已成为机器人学者进行机器人设计、实现其灵活控制的灵感源泉,使得各类仿生机器人不断涌现。仿生机器人是模仿自然界生物的外部形态或某些机能的机器人系统。仿生机器人的类型很多,为对其有清楚的认识,我们按模仿特性进行分类,仿人手臂型主要是研究七自由度和多自由度的关节型机器人操作臂、多指灵巧手以及手臂和灵巧手的组合;仿人双足型主要是研究双足步行的机器人;大型仿非人生物机器人主要是研究多足(四足、六足、八足)步行的机器人,如蛇形机器人、水下鱼形机器人等,其体积较大;微型仿非人生物机器人主要是研究各类昆虫型机器人,如仿尺蠖虫行进方式的爬行机器人、微型机器人狗、蟋蟀微机器人、蟑螂微机器人、蝗虫微机器人等。仿生机器人的主要特点:一是多为冗余自由度或超冗余自由度的机器人,机构复杂;二是其驱动方式不同于常规的关节型机器人,采用绳索或人造肌肉驱动。

由于仿生机器人所具有的灵巧动作对人类的生产和科学研究活动有着极大的帮助,所以,自20世纪80年代中期以来,机器人科学家们就开始了有关仿生机器人的研究。

自1983年以来,美国 Robotics Research Corporation 以拟人臂组合化为设想,基于系列关节研制出 K-1607 等系列七自由度拟人单臂机器人和 K/B-2017 双臂一体机器人,其中 K/B-2017 机器人已用于空间站实验。1986 年美国 Utah 大学工程设计中心研制成功了著名的 UTAH/MIT 灵巧手,该手有四指,拇指两关节,其余三指各有三关节,手指关节靠绳索驱动并设有张力传感器。1990 年,贝尔实验室完成了灵巧手的软硬件控制系统,并模拟人手拿、夹、抓、握物体等多种动作进行了实验。1992 年日本的 Machinery Laboratory、Jakasago Research & Development Center 进行了多指仿人手臂真实作业研究,系统由主从手臂及传感控制系统组成,该灵巧手有四指,每指有三个关节,具有 14 个自由度。随着多指灵巧手研究的发展,具有灵巧手的仿人臂及其系统的研究愈来愈受到重视。美国 CED、Sarcos 公司、贝尔实验室和能源部等联合开发了具有手的仿人臂,并推出了新型灵巧遥控操作系统 DTS,其中的灵巧臂(DA)是液压式 10 自由度手臂(包括三自由度的手)。1995 年 Bologna 大学在 PUMA 机器人的基础上设计研制成有三指灵巧手的仿人臂系统。

仿人型步行机器人是目前机器人技术的前沿课题,是具有挑战性的技术难题之一。日本本田公司和大阪大学联合推出的 P2 和 P9 型仿人步行机器人代表了当今世界的最高水平。P2 型机器人高 1.8m,重 210kg,具有 30 个自由度,完全模拟人体结构。美国的 NIT Leglab 有两个小组在从事仿人步行机器人的研究,已完成的项目包括一个重 22kg 的平面型机器人。英国的影子计划近年取得了很大成效,他们应用塑料和胶制造出了可模拟人类肌肉的材料,并利用肌肉驱动方式制造了一个双足步行机器人,它的腿部肌肉共有 22 块,位置与作用完全模拟人体的结构。

仿非人生物机器人近 20 年来一直是一个非常活跃的研究领域,国外很多研究机构和公司在进行这方面的研究和开发。Keisuke Arikawa 等研究的 TITAN-VIII 型四足步行机器人能够以稳定的方式在不平的地面行走,可以以非接触方式绕过地面上的障碍,能够向任何方向运动,同时腿的自由度可以用于工作。罗尔斯罗伊斯公司在为英国核潜艇建造并保养压力水反应堆时应用了蛇形机器人,其各关节间用虎克通用接头连接,每个连接处最大可弯曲  $30^\circ$ 。美国 NASA 正在研究一种蛇形机器人,用于太空探索,它是由简单的低自由度组件组成的高柔性、高冗余性的蛇形机器人。Takaharu Ldagki 等人研制出了带步进压电移动机构的管内探伤机器人,其直径为 5.5mm、长 20mm、重 1g,可以在直径为 8mm 的管中行

走。1999年日本研制的宠物狗 AIBOERS-110 有 18 个关节，每个关节由伺服电机驱动以保持柔性运动。CWRU 的仿生机器人实验室研究了基于蟋蟀运动机能的机器人，它共有 6 条腿，后两条腿较长，有两个关节，各腿的运动通过压缩空气来驱动，它可以在一定范围内行走和跳跃，能够适应粗糙地带和障碍。国内一些科研院所，如北京航空航天大学、北京科技大学、国防科学技术大学、东南大学、沈阳自动化所和哈尔滨工业大学等进行了仿生机器人的研究。北航机器人研究所在国家“863”智能机器人主题支持下，研制出了能实现简单抓持和操作作业的 3 指 9 自由度灵巧手。沈阳自动化所研制开发的 6000m 水下自治机器人达到世界先进水平。哈工大机器人研究所研制了高灵活性的仿人手臂及拟人双足步行机器人，其仿人手臂具有工作空间大、关节无奇异姿态、结构紧凑等特点，通过软件控制可实现避障、回避关节极限和优化动力学性能等功能。双足步行机器人为关节式结构，具有 12 个自由度，可以完成平地前进、后退、侧行、转向和上下阶梯等步行功能。关于仿生机器人的研究，美国和日本走在前列，此外加拿大、英国、瑞典、挪威、澳大利亚等国也都在开展这方面的技术研究。

先进制造技术的发展对仿生机器人的研究正起着积极的促进作用。随着先进制造技术的发展，工业机器人已从当初的上下料功能向高度柔性、高效率和精密装配功能转化，因此，开发面向先进制造环境的仿人机械臂及灵巧手有大量的理论与实践工作要做。

目前运用的绝大多数机器人都是固定式的，它们只能固定在某一位置上工作，因而其应用范围和功能受到限制。近年来，对移动机器人的研究受到越来越多的重视。移动机器人技术可以使机器人移动到固定式机器人无法达到的预定目标，完成设定的操作任务。移动机器人中绝大多数是仿生机器人，包括步行机器人和爬行机器人等。仿生移动式机器人在工业、农业和国防上有广泛的应用前景，它们能用于卫星探测、军事侦察、危险的废料处理以及农业生产等领域。

为了开拓机器人新市场，向非制造业扩展是机器人发展的一个重要方向。在非制造业中的医疗、娱乐和社会福利等方面的仿生机器人有很好的发展前景，如用于外科手术的多指手、仿生机器人玩具、老年人或卧床不起病人护理机器人和人工肢等。

科学家预言，21 世纪的尖端技术之一是微型机器人。仿生微型机器人可用于小型管道进行检测作业，可进入人体肠道进行检查和实施治疗而不伤害人体，也可以进入狭小的复杂环境进行作业。

## 二、可穿戴机器人的概念

“可穿戴机器人”是指套在人体外面的机器人，也称“外骨骼机器人”。外骨骼本来是指昆虫或甲壳类动物身体外表的骨骼，具有支撑和保护作用。很早就有科幻小说提及穿戴在人体外面、具备动力的特殊装甲，用来提高人类的战斗力，这样的装备即被称为外骨骼机器人。理想中的外骨骼机器人能够对使用者提供防护并增强使用者的负重和运动能力，最好还可以飞行。在外骨骼机器人研制方面，美国、日本颇见成效。

美国的研究计划全称为“外骨骼增强人类体能表现 (Exoskeleton for Human Performance Augment)”计划。计划启动后共有 3 个单位获选，进行外骨骼机器人的初期研制：橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory)、加州大学伯克利分校和 Sarcos 公司。到 2005 年，萨克斯公司的全身式外骨骼机器人脱颖而出。从 2006 年起，萨克斯公司开始研制美国军用外

骨骼机器人，2007年，该公司被雷声公司收购。2008年4月28日，雷声公司宣称萨克斯公司研制的外骨骼机器人XOS已获得显著成功，但仍在继续改进，美军于2009年开始测试经过改进的型号。

在研究外骨骼机器人时，最大的难题是能源问题。在最初研制阶段，伯克利大学采用的是用人体行走动作充电的方案。“伯克利下肢末端外骨骼”机器人(BLEEX)只到士兵腰部附近，负载就挂在腰际的支架上，最大负载可达45kg，电源可维持205小时。在最大负载时，使用者的氧气消耗量比自力负担同样质量要少15%。伯克利分校推出的第二代BLEEX在零部件微型化方面很有成效，所有的电子线路和许多机械部件都放在金属管内，但由于发电装置影响到行走步态，使用者消耗的能量反而增多。

萨克斯公司胜出的主要原因是该公司暂时搁置能源问题，先解决全身式外骨骼机器人的控制、快速反应以及流畅动作等问题。只要有能源，XOS就可以让使用者轻松地连续500次举起、放下90kg的杠铃。鉴于美军的目标是举起180kg的物品，还有跑、跳等能力，所以XOS仍在改进之中。

XOS的控制原理类似于飞机的线性传导控制。XOS在精心挑选的几个地方设置了“力传感器”，当穿戴者移动肢体想要做某一动作时，凡是受力的传感器立即通知中控计算机，然后由计算机高速计算外骨骼应采取何种动作来帮助使用者，依据计算结果，计算机指示恰当位置的液压元件移动活塞，活塞拉动缆线，外骨骼就动起来了。

XOS的控制原理是：以某种方式移动外骨骼，将力传感器受到的来自人体的力量减至最小；或者说，因为外骨骼代替使用者承担负载，所以使用者刚开始出力就“立即”获得帮助而不必出力，于是相关位置的传感器就不会继续受到人体施加的力。XOS的牵头人杰克布森把这种控制原理叫作“让道(get out of the way)”。这看起来简单，但具体实施却并不容易，就传感器而言，每秒必须检测受力状况数百到数千次不等，并传输到中控计算机，中控计算机必须立即完成运算，并下达指令到相关的液压元件完成动作。上述过程如果不够迅速，使用者就会感到像在水中行走那样有“动作明显落后于意念”的不适应感。

目前市场上没有适合的液压元件，因此萨克斯公司必须自行设计XOS所需的30个液压元件。设计目标是即使使用者不同，只要穿上XOS就可以使用，无需人机磨合。所以必须解决的问题是，如果换成体型差异较大的使用者，传感器如何分辨收到的压力是因为使用者想要移动还是因为较大的身躯在挤压。

传统的液压元件如果在接到指令后就立即动作，必须靠耗用能量来保持工作流体的充分压力。为此，萨克斯公司设计了专门的液压阀来降低XOS的能耗。不仅如此，公司设计团队还打算通过修改XOS的计算机程序来更好地模仿人类走路。人类走路主要依靠臀部的大肌肉抬腿，在足部接触地面之前，其他许多缓冲和维持平衡的小肌肉都不出力。按照这种方式走路，XOS还可以更省电。然而无论如何，68kg的XOS目前只能依靠自带电池工作40min，长时测试或性能展示都要依靠外接的液压管线。

美国国防部已经拨款，用于研制军用人造肌肉纤维，目标是利用电压变化造成上述纤维收缩或舒张产生力量，以取代液压元件。即使萨克斯公司能够进一步降低XOS的能耗，活动部件较少的系统还是更为可靠，而且处理电线弯曲比处理液压管线弯曲更加容易，也没有液体渗漏的问题，所以未来主流的外骨骼机器人或许不会继续采用液压系统。



日本在研制机器人方面有很好的基础，世界上大约一半的工业机器人都出自日本。日本已经有了外观类似 XOS 的全身式商用外骨骼机器人。筑波大学的山海嘉之教授创立的 Cyberdyne 公司研制的混合助力肢体 (HAL) 外骨骼机器人，其第五代产品 HAL-5 在 2005 年亮相“爱知”世界博览会并引起广泛关注，被美国《时代》杂志评为 2005 年最佳发明。

HAL-5 自身质量 21kg，可以自我支撑，使用者穿上后不会感觉有负担。由挂在腰际的锂电池提供能源的 HAI-5，至少可以帮助使用者增加 40kg 的抬起或举起能力。完成 HAL-5 “人机默契”训练通常需要 30min。HAL-5 于 2008 年 10 月开始生产，年产量 500 套。但日本目前还没有传出研制军用外骨骼机器人的消息。

HAL-5 有两套控制系统，其中一套不使用力传感器，而是使用贴附在人体皮肤上的电极检测微弱的生物电流，来判断使用者想要出力的方式；另一套控制系统可以记忆并模仿使用者的动作特点，如某一条腿比较无力，这样可以更密切地配合使用者，也可以解决某些人生物电流较弱的问题。

### 三、可重构机器人

随着机器人技术应用的发展，机器人功能和结构也呈现出多样性。对于模块化可重构的机器人，称为可重构机器人；在此基础上，能根据工作环境和任务自主变形的可重构机器人称为自重构机器人。

可重构机器人是一种能根据任务需要，重新组合构型的机器人，它是在模块化机器人的基础上发展起来的。可重构机器人是利用一些不同尺寸和性能的可互换的连杆和模块，根据工作环境和任务装配成不同构型的机器人。这种组合并不是简单的机械装配，参与重构机器人的各模块本身就是一种集通信、控制、驱动、传动为一体的单元，重构后的机器人将能适应新的工作环境和工作任务，具有很好的柔性。

自重构机器人由一系列相对独立的机械电子模块有机连接而成。每一个模块都有连接、开脱及越过相邻模块的功能，每个模块允许动力和信息输入并且可以通过该模块输入到其他相邻模块，通过机器人自主改变各模块间的相对几何位置，来改变机器人的构型。根据各模块的功能和结构的异同，通常把自重构机器人分为同构系统 (homogeneity) 和异构系统 (heterogeneity)。同构机器人系统中各模块的功能和构造相同，通过重构，各模块在新的单元中扮演不同的角色。异构机器人系统中各模块的功能和结构各不相同。

根据同构机器人因模块在组成自重构机器人时所起的作用不同和目标系统的拓扑结构形式不同，可以把自重构机器人分为链式连接系统和点阵晶格系统。

链式连接系统的主要特点是模块串接成链式或分支的树状结构；构成机器人的模块较少，各模块可分离成单独动作的模块机器人；模块的运动副同时也是机器人本身的关节；模块间相互有规律的运动形成了机器人的步态；如果把模块简约成关节点，将模块连接用连线表示，其拓扑结构可以用图论中的图来表达，从图论的角度来看，链式系统拓扑结构是一维或二维的树状结构。由 Yim 等开发的 Polybot 机器人以及 Castano 和 Shen 等开发的 CONRO 机器人都属于链式连接系统。

点阵晶格系统的主要特点是构成系统的每个模块都处在网格位置上，模块所处网格位置不同则系统的形状不同，单个机器人模块的意义并不重要，必须由多个模块来满足系统

目标的变化;模块运动副的作用是产生模块间相对位置的改变而实现新的目标构型;其拓扑结构是多维的或三维的晶格状结构,由于模块数量较大且构成复杂,其拓扑结构也较复杂。点阵晶格系统有 Chirikjian 等人提出的六边形平面模块系统, Kotay 和 Rus 等提出的分子机器人和结晶机器人, Yoshida 等提出的 3D 晶格式机器人, BOiior 等提出的 ProteO 变形机器人等。

最早的异构系统是由日本名古屋大学 Fukuda 提出的 CEBOT 系统,它是一种分级构成的异构系统。异构系统最大的特点是构成系统的模块结构或功能各不相同,因而造成工作任务分配非常困难。相比较而言,同构系统则灵活得多。

国外的第一台可重构机器人样机诞生于 1988 年,它是由美国卡内基·梅隆大学机器人研究所研制的可重构模块化机械手系统(RMMS)。RMMS 不仅实现了机械结构的重构,而且从电子硬件、控制算法、软件等方面实现了可重构。在 RMMS 的基础上, Khosla 等又做了进一步研究,通过对机器人机械结构、软件算法、通信系统等方面的改进,于 1996 年研制出了新型 RMMSHJ。1988 年, Fukuda 等从概念的角度提出了动力可重构机器人系统(DRRS), DRRS 由许多具有基本机械功能的智能“细胞”组成,每个“细胞”能根据任务自动地与其他细胞分离、组合,构成机械手或移动机器人,给予系统自行修理的功能。1990 年在日本名古屋大学, Fukuda 等又研制出细胞机器人系统(CEBOT), CEBOT 是一种分布式机器人系统,它根据环境的变化动态地重新配置结构,从而达到最优结构。其他学者还对这种体系做了进一步的研究。

1994 年,美国 Johns Hopkins 大学的 Gregory 提出了变形机器人系统,该系统虽然也是由许多模块组成的,但是其变形是在组成系统的模块保持连接后进行的,并且能够自重构。1994 年日本的 Murate 等提出并研制出了一种由多个可重构的装置组成的自动安装机械系统,它具有对环境适应能力强、容错的特点。1999 年 Murate 使用形状记忆合金研制出了自重构系统。1998 年美国的 Kotay 等提出了由机器人分子组成的可自重构机器人,这种机器人能自动地重构成各种最佳形状,以适应不同环境。1999 年 Doniela 和 Rus 等又提出了一种由晶体结构“分子”组成的可自重构机器人系统,晶体结构“分子”通过扩张和收缩,进行相对于其他“分子”的运动。

美国加州大学的 CONRO 项目提出了用分布控制机理来控制自重组步态,解决了机器人的控制和自重构模块之间适应性交流,以及多模块之间的协同,使有计算能力的个体模块能得到相邻模块布局的局部信息,提出用一些触发信号 Hmones 来协调运动。

在应用上,机器人模块向小型化方向发展,在某些领域小型机器人将会取代体积更大、价格很高的机器人。美国麻省理工学院的机器人专家受 Rodeny 和 Brooks 工作的启示发明了一种高尔夫球大小的机器人。该机器人可以按照类似蚂蚁一样的方式搜寻食物,相互间通过简单的光传感器进行联系,并集体做出决策。在 Rodney 和 Brooks 提出的基于行为控制的算法中,每台机器人对本地刺激做出反应。在这里没有中心计划,没有主机器人,机器人团队的能力表现为众多机器人模块互相合作的结果。如在常规情况下每个机器人模块可以独立地完成任务,但遇到障碍时,它们可以组成一支蛇形机器人,以便通过障碍。另外,各模块功能也可以不相同,以任务驱动进行合理的组合,以完成任务。

我国在可重构移动机器人方面也做了一些研究。在自组织变形机器人方面,我国的仿蛇、仿鱼机器人也取得了一定的成绩,但就研究水平来讲,我国对可重构机器人特别是自重构机器人的研究还处于初级阶段。

可重构模块化机器人系统是由各功能模块根据工作环境和任务要求经快速装配而成的，因此它必须具备以下功能：

- a. 方便地构成满足不同工作构型要求的机器人，同时模块数量和类型应尽可能少；
- b. 对控制软件的修改不能因工作任务的变化而变得复杂；
- c. 重构后的机器人能立刻投入工作。

构成机器人系统的模块本身必须具备以下特性：

- a. 每个模块单元应能独立地完成某一特定的功能；
- b. 每一模块应具有独立的驱动系统，重量和惯性应尽量小，从而获得最佳的运动和动作特性；
- c. 各模块应具有良好的装配性和通信能力，以利于各模块协调工作；
- d. 各模块应具有一定的数据处理能力，一方面控制软件要有适应机器人重构后的能力，另一方面还要有一定的信息容错能力。

目前，模块化可重构机器人系统的研究得到了广泛重视，主要集中在以下几方面。①模块所具有的功能和结构，主要研究构成机器人各模块的结构特点及功能。对于同构系统可重构机器人主要研究模块间的自主连接及分离能力，各模块的动力及信息输入与输出能力，模块关节的运动能力等；对于异构系统可重构机器人主要研究因受目标结构的限定对各模块功能的划分方法。②目标结构的描述与形成，主要研究内容有目标结构的描述与形成，多目标结构间的转换以及非目标结构的形成。目前对于模块数量有限、目标结构明确的可重构模块化机器人的目标结构的描述与形成已取得一些成果，但对于多目标结构间的转换算法、变形方式及模块间的变形次序，以及根据不可预知的环境和工作来形成新的目标结构相关的变形原理、变形规则、约束规则算法的研究还没有取得重大进展。③运动学规律的研究，目前在二维空间对于模块化可重构机器人系统通常不考虑重力及惯性力的影响，但在三维空间和变形速度较快时，则必须考虑重力及惯性力对系统的影响。④信息的获取和处理，包括各模块的自身所需信息如何获取，重构后各模块的信息如何重构，特别是重构后发生相互“干涉”的信息如何处理。

机器人学的进步和应用是 20 世纪自动控制领域最有说服力的成就。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不断扩大，正引起国际上重新认识机器人技术的作用和影响。可以预见，在 21 世纪，各种先进的机器人系统将会进入人类生活的各个领域，成为人类良好的助手和亲密的伙伴。

机器人一般由执行机构、驱动装置、检测装置、控制系统和复杂机械等组成。对于机器人本体，其臂部一般采用空间开链连杆机构，其中的运动副（转动副或移动副）常称为关节，关节个数即为机器人的自由度。根据关节配置形式和运动坐标形式的不同，机器人执行机构可分为直角坐标式、圆柱坐标式、极坐标式和关节坐标式等类型。出于拟人化的考虑，常将机器人本体的有关部件分别称为基座、腰部、臂部、腕部、手部（夹持器或末端执行器）和行走部（对于移动机器人）等。

驱动装置是驱使执行机构运动的机构，按照控制系统发出的指令信号，借助于动力元件使机器人进行动作。它输入的是电信号，输出的是线、角位移量。机器人使用的驱动装置主要是电力驱动装置，如步进电机、伺服电机等，此外也有的采用液压、气动等驱动装置。

检测装置的作用是实时检测机器人的运动及工作情况，根据需要反馈给控制系统，与设

定信息进行比较后,对执行机构进行调整,以保证机器人的动作符合预定的要求。作为检测装置的传感器大致可以分为两类:一类是内部信息传感器,用于检测机器人各部分的内部状况,如各关节的位置、速度、加速度等,并将所测得的信息作为反馈信号送至控制器,形成闭环控制;一类是外部信息传感器,用于获取有关机器人的作业对象及外界环境等方面的信息,以使机器人的动作能适应外界情况的变化,使之达到更高层次的自动化,甚至使机器人具有某种“感觉”,向智能化发展,例如视觉、声觉等外部传感器给出工作对象、工作环境的有关信息,利用这些信息构成一个大的反馈回路,从而大大提高机器人的工作精度。

控制系统有两种方式:一种是集中式控制,即机器人的全部控制由一台微型计算机完成。另一种是分散(级)式控制,即采用多台微机来分担机器人的控制。如当采用上、下两级微机共同完成机器人的控制时,主机常用于负责系统的管理、通信、运动学和动力学计算,并向下级微机发送指令信息。作为下级从机,各关节分别对应一个CPU,进行插补运算和伺服控制处理,实现给定的运动,并向主机反馈信息。根据作业任务要求的不同,机器人的控制方式又可分为点位控制、连续轨迹控制和力(力矩)控制。

机器人的主要研究问题有以下几方面。

### 1. 建模问题

机器人的运动具有高度的灵活性和适应性,因此一般都是冗余度或超冗余度机器人,结构复杂。机器人的运动学和动力学模型与常规系统有很大差别,且复杂程度更大。为此,研究建模问题,实现机构的可控化是研究机器人的关键问题之一。

### 2. 控制优化问题

机器人的自由度越多,机构越复杂,这必将导致控制系统的复杂化。复杂系统的实现不能全靠子系统的堆积,要做到“整体大于组分之和”,同时要研究高效优化的控制算法才能使系统具有实时处理能力。

### 3. 信息融合问题

在机器人的设计开发中,为实现对不同物体和未知环境的感知,都装备有一定量的传感器,多传感器的信息融合技术是实现机器人具有一定智能的关键。信息融合技术把分布在不同位置的多个同类或不同类的传感器所提供的局部环境的不完整信息加以综合,消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾,从而提高系统决策、规划、反应的快速性和正确性。

### 4. 机构设计问题

合理的机构设计是机器人实现的基础。生物的形态经过千百万年的进化,其结构特征极具合理性,而要用机械来完全仿制生物体几乎是不可能的,只有在充分研究生物肌体结构和运动特性的基础上,提取其精髓进行简化,才能开发全方位关节机构和简单关节组成高灵活性的机器人机构。

### 5. 微传感和微驱动问题

微型仿生机器人有些已不是传统常规机器人的按比例缩小,它的开发涉及电磁、机械、



热、光、化学、生物等多学科。对于微型仿生机器人的制造，需要解决一些工程上的问题，如动力源、驱动方式、传感集成控制以及同外界的通信等，实现微传感和微驱动的一个关键技术是机、电、光一体结合的微加工技术。同时，在设计时必须考虑到尺寸效应、新材料、新工艺等问题。

### 1.3 机器人的体系结构

近年来，许多研究人员、学者致力于解决体系结构中的各种问题，并使结构思想具有一定的普遍指导意义，其中最典型的两种体系结构是分层式体系结构和包容式体系结构。

#### 1.3.1 分层式体系结构 (Hierarchical Architecture)

分层式体系结构是基于认知的人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 模型，因此也称为基于知识的体系结构。在 AI 模型中，智能任务由运行于模型之上的推理过程来实现，它强调带有环境模型的中央规划器，是机器人智能化不可缺少的组成部分。该模型必须准确、一致。分层式体系结构把各种模块分成若干层次，使不同层次上的模块具有不同的工作性能和操作方式。

分层式体系结构中最有代表性的是由 20 世纪 80 年代智能控制领域著名学者 Saridis 提出的三层模型。Saridis 认为，随着控制精度的增加，智能能力减弱，即层次向上智能增加，但是精度降低，层次向下则相反。按照这一原则，他把整个结构按功能分为 3 个层次：执行级、协调级和组织级。其中，组织级是系统的“头脑”，它以人工智能实现在任务组织中的认知、表达、规划和决策；协调级是上层和下层的智能接口，它以人工智能和运筹学实现对下一层的协调，确定执行的序列和条件；执行级是以控制理论为理论基础，实现高精度的控制要求，执行确定的运动。需要指出的是，这仅仅是一个概念模型，实际的物理结构可多于或少于 3 级，无论多少级，从功能上来说由上到下一般均可分为这 3 个层次。信息流程从低层传感器开始，经过内外状态的形势评估、归纳，逐层向上，在高层进行总体决策；高层接受总体任务，根据信息系统提供的信息进行规划，确定总体策略，形成宏观命令，再经协调级的规划设计，形成若干子命令和工作序列，分配给各个控制器加以执行。

在分层式体系结构中，最广泛遵循的原则是依据时间和功能来划分体系结构中的层次和模块。其中，最有代表性的是美国国家宇航局 (NASA) 和美国国家标准局 (NBS) 提出的 NASREM 的结构，其出发点之一是考虑到一个智能机器人可能有作业手、通信、声纳等多个被控分系统，而这样的机器人可能组成一个组或组合到更高级的系统中，相互协调工作；出发点之二是考虑已有的单元技术和正在研究的技术可以应用到这一系统中来，包括现代控制技术和人工智能技术等。整个系统横向上分为信息处理、环境建模和任务分解 3 列，纵向上分为坐标变换与伺服控制、动力学计算、基本任务、单体任务、成组任务和总任务 6 层，所有模块共享一个全局数据库，如图 1-1 所示。

NASREM 结构的各模块功能和关系非常清楚，有利于系统的构成和各模块内算法的添加和更换。它具有全局规划和推理的能力，对复杂的环境可以做出合理的反应，适应于一个或一组机器人的控制。但同其他的分层式体系结构一样，NASREM 的问题在于输入环境