

光机电一体化丛书

# 智能机器人

方建军 何广平 编著

化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心  
· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

智能机器人/方建军,何广平编著. —北京:化学工业出版社, 2003.12  
(光机电一体化丛书)  
ISBN 7-5025-5075-5

I. 智… II. ①方…②何… III. 智能机器人-基本知识 IV. TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 125361 号

---

光机电一体化丛书

智能机器人

方建军 何广平 编著

责任编辑:任文斗

文字编辑:廉静

责任校对:陶燕华 靳荣

封面设计:蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印刷

北京兴顺印刷厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 13¼ 字数 321 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5075-5/TH·175

定价:35.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 前 言

人类很早就梦想制造出一种具有人的外形和情感，并处处听命于人的自动化机器，以帮助人类完成危险的、繁重的体力劳动或者进入服务领域，为人类服务。然而直到 20 世纪 60 年代，世界上才出现了第一台工业机器人。这种机器人只能完成简单的上料、下料任务，与人类想象中的机器人差得很远。机器人从诞生之日起，就承载了人类过多、过高的期望。科学家和公众低估了智能机器人开发所面临的技术难题，将智能机器人与人工智能划上等号，把它看作是一个纯的软件系统来研究，结果始终停留在实验室。美国斯坦福研究所的眼车系统在形式上能够实现心理学中典型的猴子和香蕉问题的求解，但距离解决实际的复杂问题很远。挫折和失败终于使科学家清醒地意识到，智能机器人是硬件和软件的统一体，离开硬件支持是无法制造出智能机器人的。科学家并不拘泥于智能机器人的概念化，将一切具有感觉、认知能力的机器人都看作是智能机器人。随着科学技术的进步，机器人的智能化程度越来越高。日本索尼公司的仿人形机器人 Asimo，是智能机器人的典型代表。它表明智能机器人的研究进入了新的阶段。

智能机器人是多种高新技术的综合体，反映了一个国家的综合国力。同时，智能机器人的应用领域也十分的广泛，特别是在军事、医疗和娱乐领域的应用。智能机器人处在动态的发展之中，大量新的理论成果和实际系统不断涌现。面对目前掀起的一股智能机器人热潮，读者很难找到一本最新的介绍智能机器人的书籍。因此，我们组织编写了这本《智能机器人》。希望这本拙作能够起到“抛砖引玉”的作用，为智能机器人的普及和教学作出绵薄的贡献。

本书的第 1 章介绍了智能机器人的起源、发展历程以及智能机器人的相关技术和未来发展趋势；第 2 章介绍了智能机器人的驱动技术，包括最新的微驱动；第 3 章介绍机器人的感觉和多信息融合技术，介绍了智能机器人的视觉、触觉、力觉、滑觉和听觉等，对于多传感器信息，介绍了信息融合的理论和方法；第 4 章围绕机器人的视觉，在叙述了机器人视觉系统的概念后，讨论了视觉信号的表示、处理和模式识别方法，最后还介绍了实用的视觉系统；第 5 章讨论了智能机器人的控制技术，包括神经网络控制、模糊控制等先进的智能控制技术，智能机器人的运动规划和运动控制；第 6 章向读者介绍了双足机器人、球形机器人等智能机器人系统。本书除了与普通工业机器人类似的理论和知识以及移动机构外，基本涵盖了智能机器人的各方面技术。

本书第 1 章~第 4 章由方建军编写，第 5 章、第 6 章由何广平编写，全书由方建军统稿。参加编写的还有张树阁、汤修映、李知银、殷际英、田建君、白传栋、李功一、张若清、胡春江、吴伯农、景作军、刘仕良、张虎等。

在编写本书的过程中，作者参阅了大量国内外的书籍、论文和有代表性的研究成果。对参阅文献的所有作者表示诚挚的感谢。本书涉及的领域是一个发展十分迅速的交叉学科，由于作者的水平所限，加之时间仓促，书中难免有一些不足之处，敬请同行专家和读者批评指正。

作 者

此为试读，需要完整PDF请访问：[www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com) 2003 年 11 月于北京

# 目 录

第 1 章 概论	1
1.1 智能机器人的产生与发展	1
1.2 智能机器人的体系结构	5
1.3 智能机器人的感知与多传感器信息融合	9
1.4 智能机器人的控制技术	11
1.5 智能机器人的发展趋势	13
第 2 章 机器人的驱动技术	15
2.1 电气驱动	15
2.1.1 步进电动机	15
2.1.2 直流伺服电动机及其驱动	18
2.1.3 无刷伺服电动机及其驱动	20
2.2 液压驱动器	25
2.2.1 电磁伺服阀	25
2.2.2 摆动油缸	26
2.2.3 液压伺服马达	26
2.3 气压驱动器	27
2.3.1 叶片式气动马达	27
2.3.2 气压驱动的控制结构	27
2.4 新型驱动器	28
2.4.1 静电驱动器	28
2.4.2 形状记忆合金驱动器	29
2.4.3 电致磁伸缩驱动器	30
2.4.4 压电效应驱动器	31
2.4.5 人工肌肉	32
2.4.6 超声波电机	32
第 3 章 机器人感觉与多信息融合	34
3.1 智能机器人对传感器的要求	34
3.2 机器人感觉	34
3.2.1 运动传感器	34
3.2.2 力觉传感器	40
3.2.3 接近觉传感器	42
3.2.4 触觉传感器	44
3.2.5 滑觉传感器	46
3.2.6 听觉传感器	47

3.2.7	人工皮肤	48
3.2.8	机器人传感器的发展趋势	49
3.3	多传感器信息融合	49
3.3.1	多传感器系统与信息融合	49
3.3.2	信息融合方法和融合模式	50
<b>第4章</b>	<b>机器视觉</b>	<b>53</b>
4.1	视觉计算模型	53
4.1.1	人的视觉系统	53
4.1.2	视觉计算模型	55
4.2	机器视觉系统的组成	56
4.2.1	照明	56
4.2.2	视觉传感器	57
4.3	图像的生成和预处理	62
4.3.1	摄像机的几何模型	62
4.3.2	图像的预处理	64
4.4	图像分割	68
4.4.1	灰度阈值法	69
4.4.2	颜色分割	70
4.4.3	边缘检测	71
4.5	模式识别	74
4.6	机器人三维视觉	79
4.6.1	立体视差的基本原理	80
4.6.2	机器人三维视觉中摄像机的标定	80
4.6.3	机器人如何利用三维视觉进行自主导航定位	82
4.7	机器视觉系统的应用	84
4.7.1	搬运机器人	84
4.7.2	基于视觉的工件拾取机器人	87
<b>第5章</b>	<b>运动规划与控制技术</b>	<b>88</b>
5.1	智能机器人运动规划和控制技术导论	88
5.1.1	智能机器人系统的基本特征	89
5.1.2	智能机器人控制系统的基本结构	90
5.1.3	智能机器人控制系统的主要功能特点	91
5.1.4	智能控制研究的数学工具	91
5.1.5	智能控制理论的主要内容及其在智能机器人控制中的应用	92
5.2	智能控制理论基础	96
5.2.1	人工神经网络概述	96
5.2.2	模糊控制理论基础	105
5.2.3	智能控制中的优化技术基础	116
5.3	智能机器人运动规划	133
5.3.1	轮式移动机器人运动规划的解析方法	136

5.3.2	基于神经网络的移动机器人路径规划 .....	139
5.3.3	基于人工势场理论的机器人模糊运动规划 .....	147
5.3.4	基于遗传模拟退火算法的机器人路径规划 .....	154
5.4	智能机器人控制技术 .....	157
5.4.1	空间机器人的神经网络控制 .....	157
5.4.2	基于遗传算法的空间机器人神经网络控制 .....	165
5.4.3	多指灵巧手的神经网络控制 .....	167
5.4.4	智能机器人的模糊控制 .....	169
第6章	智能机器人系统实例 .....	177
6.1	室外智能移动机器人 .....	177
6.2	双足步行智能机器人 .....	182
6.3	球形机器人 .....	189
6.3.1	球形机器人的特点及应用前景 .....	190
6.3.2	球形机器人的研究现状 .....	191
6.4	仿鱼机器人 .....	193
参考文献	.....	200

# 第 1 章 概 论

## 1.1 智能机器人的产生与发展

1921 年，捷克剧作家 Karel Capek 在剧本《Rossum's Universal Robots》中，描述了一个具有人的外表、特征和功能的机器，并命名为“Robota”。英语“Robot”就是由此演变而来的。Capek 想象机器人外形像人、并具有人一样的智能和感性认识。此后，机器人成为很多科幻小说和科幻电影的主人公。1939 年纽约世界交易会上放映的德国电影《大都市》中的 Electro 步行机器人和它的狗 Spardo，以及在 1977 年拍摄的电影《星球大战》中的 C3PO 机器人，使普通公众对机器人具有人一样的情感、外形这种看法进一步加深。公众对智能机器人寄予很高的期望，然而在当时的科学技术条件下是无法实现的。即使在现在，要制造出类人智慧、有感情的机器人仍然是科学家的梦想和追求。

20 世纪 50 年代后期，美国橡树岭和阿尔贡国家实验室开始研制如图 1-1 所示的遥控式机械手，用于搬运放射性材料。在此后的五十多年里，机器人技术取得了突飞猛进的发展，其发展过程大致经历了三个阶段。

① 示教再现型机器人 第一代机器人，机器人没有装备任何传感器，对环境没有感知能力。机器人的作业路径、运动参数需要操作人员手把手示教或通过编程设定，机器人重复再现示教的内容。目前商品化、实用化的机器人大多是此类机器人。

② 感觉型机器人 此种机器人配备了简单的内、外部传感器，能感知自身运行的速度、位置、姿态等物理量，并以这些信息的反馈构成闭环控制，如配备简易视觉、力觉传感器等简单的外部传感器，因而具有部分适应外部环境的能力。

③ 智能型机器人 具有多种内、外部传感器组成的感觉系统，不仅可以感知内部关节的运行速度、力的大小等参数，还可通过外部传感器，如视觉传感器、触觉传感器等，对外部环境信息进行感知、提取、处理并做出适当的决策，在结构或半结构化环境中自主完成某一项任务。目前，智能机器人尚处于研究和发展阶段。

20 世纪 60 年代，美国斯坦福研究所研制的机器人 Shakey 是一种典型的“眼-车”系统，如图 1-2 所示。Shakey 的感觉器官主要是“眼”——安装在可动头部的电视摄像机和光学测距仪以及车体下部安装的用来确认障碍物的触觉器官“猫胡子”；移动机构是两个独立驱动的车轮。Shakey 的功能主要是视野范围内的对象识别，依靠积累的经验求解行动规划，以及运用逻辑推理的问答能力。Shakey 可以穿行房间，搜索、识别指定的对象，并进行“智能”的操作。当人命令它把放在大箱子上的小箱子推下来时，它在分析了对象的高度位置后，首先寻找楔形箱子，推动它靠拢长方形箱子，然后沿此斜坡登上木箱，把小箱子顺斜

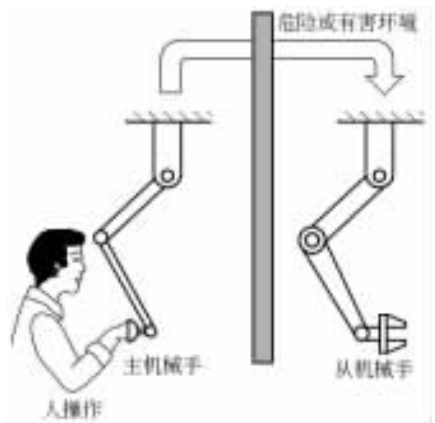


图 1-1 遥控式机械手

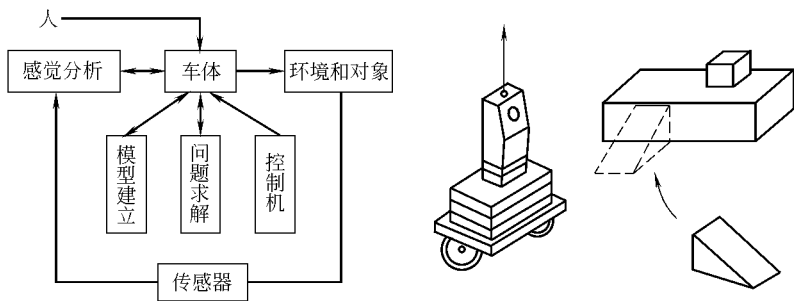


图 1-2 Shakey “眼-车”系统

坡推下。20 世纪 80 年代末，清华大学研制了“Eye-in-Hand”智能装配机器人系统，如图

1-3所示。该装配机器人由 PUMA560 机械手、图像处理系统和计算机构成。在机械手的顶部安装一台摄像机，用于观察工作台的全景。在机械手的末端有 CCD 摄像机和半导体激光发生器。Eye-in-Hand 能够完成很精密的装配任务。例如，该系统能把拿在手上的一根很细的针，通过两台摄像机的视觉反馈，准确无误地穿在竖在工作台上的针孔中。

提起智能机器人，很容易让人联想到人工智能。人工智能有生物学模拟学派、心理学派和行为主义学派三种不同的学派。在 20 世纪 50 年代中期，行为主义学派一直占统治地位。行为主义学派的学者们认为人类的大部分知识是不能用数学方法精确描述的，提出了用符号在计算机上表达知识的符号推理系统，即专家系统。专家系统用规则或语义网来表示知识规则，但人类的某些知识并不能用显式规则来描述。因此专家系统曾一度陷入困境。近年来神经网络技术取得一定突破，使生物模拟道路活跃起来。智能机器人是人工智能研究的载体。但两者之间存在很大的差异。例如，对于智能装配机器人而言，通过视觉系统获取

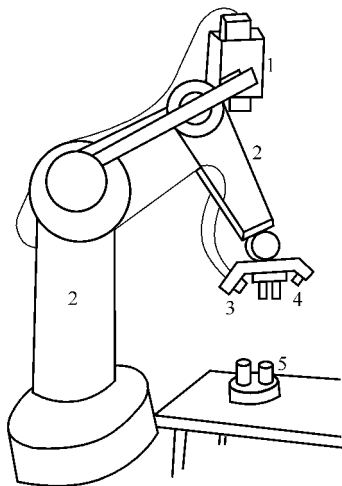


图 1-3 Eye-in-Hand 系统

- 1—全局摄像机；2—PUMA 机械手；  
3—在手上的摄像机；4—在手上的  
激光发射器；5—被识别的工件

取图纸上的装配信息。通过分析，发现并找到所需工件，按正确的装配顺序把工件一一装配上。因此，智能机器人需要具备知识的表达与获取技术，要为装配做出规划。同时，在发现和寻找工件时需要利用模式识别技术，找到图样上的工件。装配是一个复杂的工艺，它可能要采用力与位置的混合控制技术，还可能为机器人的本体装上柔性手腕，才能完成任务，这又是机构学问题。智能机器人涉及的面广，技术要求高，是高新技术的综合体。那么，到底什么是智能机器人呢？到目前为止，国际上对智能机器人仍没有统一的定义。一般认为，智能机器人是具有感知、思维和动作的机器。所谓感知，即指发现、认识和描述外部环境和自身状态的能力。如装配作业，它要能找到和识别所要的工件，需要利用视觉传感器来感知工件。同时，为了接近工件，智能机器人需要在非结构化的环境中，认识障碍物并实现避障移动。这些都依赖于智能机器人的感觉系统，即各种各样的传感器。所谓思维，是指机器人自身具有解决问题的能力。比如，装配机器人可以根据设计要求，为一个复杂机器找到零件的装配办法及顺序，指挥执行机构，即动作部分去装配完成这个机器。动作是指机器人具有可以完成作业的机构和驱动装置。因此，智能机器人是一个复杂的软件、硬件的综合体。虽然对智能机器人没有统一的定义，但通过对具体智能机器人的考察，还是有一个感性认识的。

智能机器人的发展方向大致有两种，一种是类人型智能机器人，这是人类梦想的机器人；另一种则是外形并不像人，但具有机器智能。随着现代科技的发展，机器人技术已广泛应用于人类生活的各种领域，研制具有人类外观特征、可以模拟人类行走与基本操作功能的类人型机器人，一直是人类对机器人研究的梦想之一。由于类人型机器人研究是一门综合性很强的学科，其本身包含着多项高科技成果，在很大程度上代表着一个国家的高科技发展水平。因此，一些发达国家不惜投入巨资进行研究开发。1986年，美国研制了第一台拟人型两足步行机器人SD-2，8个自由度，能静态行走。到1990年，实现了动态行走和斜坡行走。1987年，Pacific Northwest 实验室研制出38个自由度的液压驱动拟人机器人。1997年，日本本田公司率先研制出第一台类人型步行机器人样机。2002年，日本本田公司在东京展示了其最新研制的“Asimo”智能机器人，如图1-4所示。“Asimo”机器人高1.2m，不仅可以行走、爬楼梯，识别各种各样的声音，还能够通过头部的照相机捕捉到的画面和事先设计好的程序识别人类的各种手势运动以及10种不同的脸型。Asimo以下肢运动为主，上肢为辅，腿部功能相当完善。它的控制以ZMP理论为基础实现了真三维空间的行走，步姿可以和人类相媲美。Asimo的目标是进入家庭，为人类服务。因此，它的设计考虑了与人的友善和亲和。1997年，日本Sony公司也启动了步行机器人研究计划，虽然起步晚，但在吸收前人经验的基础上发挥后发优势。Sony的歌舞机器人SDR-3X如图1-5所示。同Asimo相反，SDR-3X的上肢动作灵巧，能够表演动作，下身仅仅适从跟随。SDR-3X的腰关节特设了两个自由度，因此它能表演展臂、劈叉、踢球、倾倒后自站立、优美舞姿等。SDR-3X体态轻盈，外形尺寸仅50cm×22cm×14cm（高×宽×厚），质量2~3kg。1990年，国防科技大学成功研制出我国第一台类人型机器人——“先行者”，实现了我国机器人技术的重大突破。这台类人型机器人可以前进，后退，左、右侧行，左、右转弯和前后摆动手臂，行走频率为每秒2步，并具备简单的语言功能。



图 1-4 Asimo 智能机器人



图 1-5 SDR-3X 智能机器人

除了工业应用外，智能机器人在农业、林业、矿业、军事、医疗、文娱等领域得到广泛应用。可以预见，智能机器人将首先在军事、医疗、文娱等领域取得突破性进展。

医疗机器人是指辅助或代替人类医生进行医疗诊治及护理的机器人。医疗机器人有多种类型，如医疗外科机器人、X射线介入性治疗机器人、无损伤诊断与检测微小性机器人、人工器官移植与植入机器人、康复与护理机器人等。

脑神经外科手术辅助机器人是近几年在多学科交叉领域中兴起，并越来越受到关注的机器人应用前沿研究课题之一。它是基于计算层面扫描图像或核磁共振图像的三维医疗模型，对脑神经外科手术进行规划与虚拟操作，最后由机器人进行辅助定位或手术操作。脑神经外科手术辅助机器人主要由手术规划和辅助手术两大部分组成。手术规划是以计算机图形学为基础，以 CT、MRI、血管造影等影像学技术为主要手段获取医疗图像，并对这些图像进行处理和三维模型重建，在手术前获得病人病灶点及周围组织的三维立体图像，构成一个“虚拟病人”，通过虚拟现实技术的各种仿真及交互方法，医生可以反复对病人进行虚拟手术，确定最佳的手术方案。辅助手术操作是在规划完成后，规划的手术方案的技术参数将从规划系统传送给机器人控制器，通过映射测量和映射算法将图形空间的规划参数变换到机器人操作空间，机器人按预定的手术方案完成指定的辅助手术操作。

目前脑神经外科手术的发展趋势是追求安全、微创和精确，使用机器人进行立体定向脑神经外科手术能够满足这些要求，并且在微创方面获得了传统治疗方法不可比拟的良好效果。在使用机器人系统之前，国内外普遍使用的是有框架脑立体定向手术，即在患者的颅骨上固定一个金属框架，并拍摄 CT 片。医生通过 CT 片来确定病灶在这个框架中的具体位置，并决定手术的位置。手术时在病人颅骨上钻一个小孔，将手术器械通过探针导管插入病人脑中，对病灶点进行活检、放疗、切除等手术操作。采用机器人进行立体定向神经外科手术时，机器人可以在手术时自动计算出开颅位置和方向，并精确控制探针插入的深度。用机器人辅助立体定向神经外科手术，不但没有了固定框架给患者带来的痛苦和给医生带来的操作不便，而且提高了定位精度和操作的可视性，为患者最大限度地减少了手术创伤。

在实现本地辅助医疗的基础上，医疗机器人正向远程辅助医疗的方向发展。2001 年 9 月 7 日，法国医生雅克·马雷斯科领导的医疗小组在美国纽约为远在法国斯特拉斯堡的病人进行胆囊摘除手术。远程遥控手术由法国电信公司提供网络支持，成功地将远程信号的反馈时间降到 150ms，雅克医生通过网络远程遥控在法国手术室内的外科手术机器人“ZEUS”，机器人将装有微型光纤摄像头的内窥镜导入病人的腹部，然后使用解剖刀和镊子摘除了可疑的胆囊组织，整个手术耗时 54min，病人在术后 48h 恢复排尿，并没有发生任何并发症，成功实现了世界首例跨洋手术。图 1-6 所示为医生在手术。网络机器人在家庭服务、娱乐领域也将大显身手。在拉斯威加斯的计算机展销会上，展示了如图 1-7 所示的网络机器人。机器人的外形像火星探测车或一条狗，具有友好的外形。机器人身上安装了数字摄像机、声呐、麦克风和喇叭。只要你能用计算机或手机上网，就可以对网络机器人发号施令。你在地出差，网络机器人可以帮助你照看孩子、倒垃圾，甚至是喂狗。



图 1-6 远程胆囊摘除手术



图 1-7 网络机器人

微型机器人是智能机器人的又一个重要方向。在西游记中，孙悟空经常摇身一变，变作一个虫子，钻入妖魔鬼怪的腹内。这虽然是神话，但从一个侧面反映了人类的梦想。随着微型机电系统的不断深入发展，微型机器人进入人体内进行手术、疏通血管、定点投放药物，将不再是梦想。国外正在开发体内自主行走式诊断治疗、定点投放药物、体内微细手术的外科手术机器人。医生用注射器将微型机器人推入体内，机器人携带生物传感器对人体组织进行检查，并将信号反馈到信息处理中心进行分析处理。如果发生病变，医生可以指挥机器人进行手术、定点投放药物等操作。机器人完成工作任务后自行消失，随人体废弃物排出，对人没有任何副作用。目前已经开发出一些样机，相信在不久的将来，这项技术将进入我们的生活，造福人类。

## 1.2 智能机器人的体系结构

智能机器人的体系结构主要包括硬件系统和软件系统两个方面。由于智能机器人的使用目的不同，硬件系统的构成也不尽相同。比较典型的结构如图 1-8 所示。该结构是以人为原型设计的。系统主要包括视觉系统、行走机构、机械手、控制系统和人机接口。

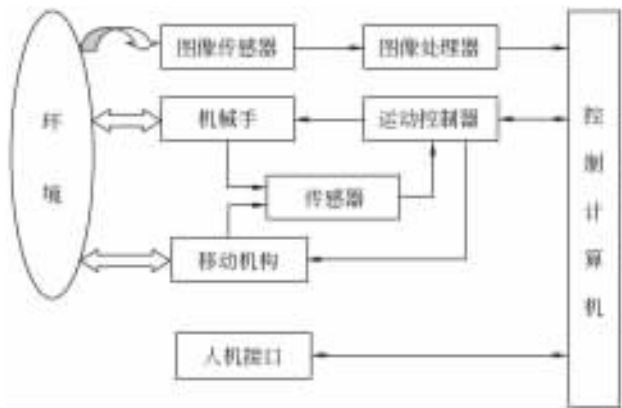


图 1-8 智能机器人的硬件系统

① 视觉系统 智能机器人利用人工视觉系统来模拟人的眼睛。视觉系统可分为图像获取、图像处理、图像理解 3 个部分，如图 1-9 所示。视觉传感器是将景物的光信号转换成电信号的器件。早期智能机器人使用光导摄像机作为机器人的视觉传感器。近年来，固态视觉传感器，如电荷耦合器件 CCD、金属氧化物半导体 CMOS 器件。同电视摄像机相比，固体视觉传感器体积小、质量轻、余晖小，因此得到广泛的应用。视觉传感器得到的电信号经过 A/D 转换成数字信号，即数字图像。单个视觉传感器只能获取平面图像，无法获取深度或距离信息。目前正在研究用双目立体视觉或距离传感器来获取三维立体视觉信息。但

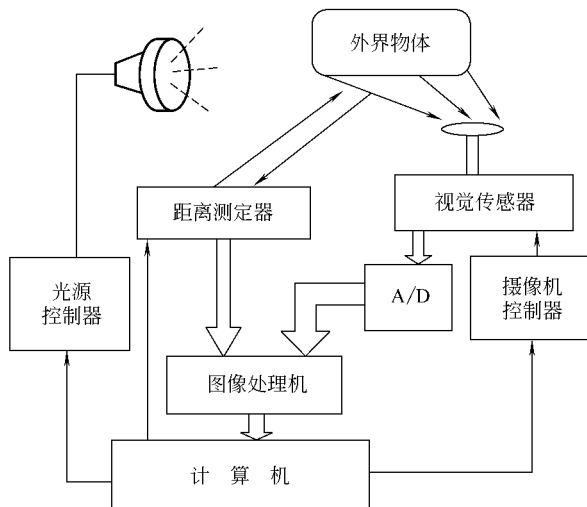


图 1-9 人工视觉系统

至今还没有一种简单实用的装置。数字图像经过处理，提取特征，然后由图像理解部分识别外界的景物。

② 行走机构 智能机器人的行走机构有轮式、履带式或爬行式以及类人型的两足式。目前大多数智能机器人采用轮式、履带式或爬行式行走机构，实现起来简单方便。1987 年开始出现两足机器人，随后相继研制了四足、六足机器人。让机器人像人类一样行走，是科学家一直追求的梦想。现在日本 Sony 公司和本田公司相继推出了人形机器人，使智能机器人行走技术向前推进了一大步。这项技术目前仍在研究中。

③ 机械手 智能机器人可以借用工业机器人的机械手结构。但手的自由度需要增加，而且还要配备触觉、压觉、力觉和滑觉等传感器以便产生柔软、灵活、可靠的动作，完成复杂作业。

④ 控制系统 智能机器人多传感器信息的融合、运动规划、环境建模、智能推理等需要大量的内存和高速、实时处理能力。现在的冯·诺曼结构作为智能机器人的控制器仍然力不从心。随着光子计算机和并行处理结构的出现，智能机器人的处理能力会更高。机器人会出现更高的智能。

⑤ 人机接口 智能机器人的人机接口包括机器人会说、会听以及网络接口。话筒、扬声器、语音合成和识别系统，使机器人能够听懂人类的指令，能与人以自然语言进行交流。机器人还需要具有网络接口，人可以通过网络和通讯技术对机器人进行控制和操作。

随着智能机器人研究的不断深入，越来越多的各种各样的传感器被使用，信息融合、规划，问题求解，运动学与动力学计算等单元技术不断提高，使智能机器人整体智能能力不断增强，同时也使其系统结构变得复杂。智能机器人是一个多 CPU 的复杂系统，它必然是分成若干模块或分层递阶结构。在这个结构中，功能如何分解，时间关系如何确定，空间资源如何分配等问题，都是直接影响整个系统智能能力的关键问题。同时为了保证智能系统的扩展，便于技术的更新，要求系统的结构具有一定开放性，从而保证智能能力不断增强，新的或更多传感器可以进入，各种算法可以组合使用。这便使体系结构本身变成了一个要研究解决的复杂问题。智能机器人的体系结构是定义一个智能机器人系统各部分之间相互关系和功能分配，确定一个智能机器人或多个智能机器人系统的信息流通关系和逻辑上的计算结构。对于一个具体的机器人而言，可以说就是这个机器人信息处理和控制系统的总体结构，它不包括这个机器人的机械结构内容。事实上，任何一个机器人都有自己的体系结构。目前，大多数工业机器人的控制系统为两层结构，上层负责运动学计算和人机交互，下层负责对各个关节进行伺服控制。许多科学家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。本节将把依据不同原则的代表型结构加以介绍，并对一般原则作一总结。

美国学者 Saridis 根据随着控制精度的增加而智能能力减弱的原则，提出智能控制系统的分层递阶结构。他将智能控制系统分为组织级、协调级和执行级三个层次，如图 1-10 所示。执行级是面向设备参数的基础级，执行确定的运动和提供明确的信息需求，在这一级不存在不确定性，可以用常规的控制理论方法进行设计。协调级接受组织级的指令和子任务执行过程的反馈信息，来协调下一层的执行，确定执行的序列和条件。它是一个离散事件动态系统，主要运用运筹学的方法研究。组织级接受任务命令，解释这个命令，并根据系统其他部分的反馈信息，确定任务，表达任务，并把任务分解成系统可以执行的若干子任务。因此，组织级应具有任务表达，对抽象任务的规划、决策和学习的功能和子任务库。它是智能控制系统中，智能能力最强，控制精度最低的一级。需要用人工智能方法研究。

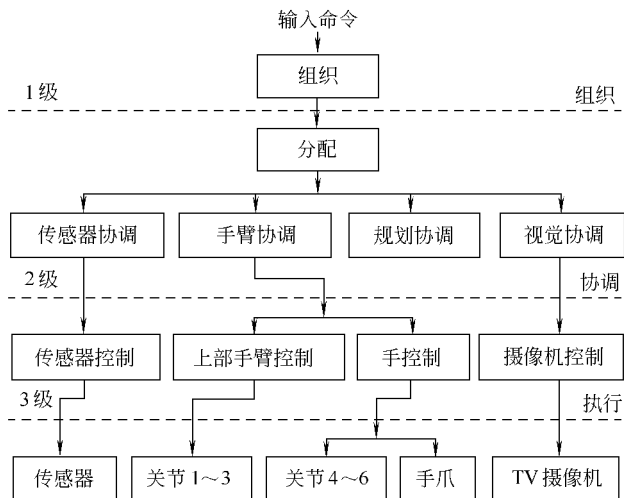


图 1-10 分层递阶控制结构

依据时间和功能来划分体系结构中的层次和模块是最为广泛遵循的原则。美国航空航天局（NASA）和美国国家标准局（NBS）提出的名为 NASREM 的结构就是典型的代表。该体系结构的出发点是考虑到一个智能机器人可能有作业手、通讯、声呐等多个被控制的分系统，而多个这样的机器人又有可能被组成一组，相互协调工作。体系结构的设计要满足这样的发展要求，甚至可以与具有计算机集成制造系统的工厂的系统结构相兼容。该体系的另一个出发点是考虑到已有的单元技术和正在研究的技术可能用到这一系统中来，包括现代控制方面的技术和人工智能领域的技术等。整个系统分成信息处理、环境建模和任务分解三列，分为坐标变换与伺服控制、动力学计算、基本运动、单体任务、成组任务和总任务六层，所有模块共享一个全局数据库，如图 1-11。它不仅是一个典型的、严格按时间和功能划分模

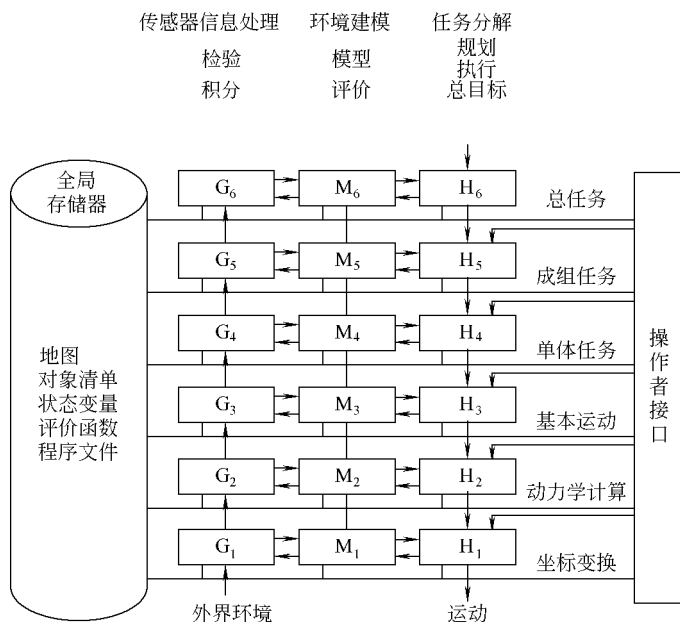


图 1-11 NASREM 分层控制结构

块的分层递阶系统，而且是在时间和空间两个方向上展开的。

任务分解列是整个体系结构的主导列。它接受交由整个系统完成的总命令，发出直接控制执行器件（比如电机）动作的电信号，若干个执行器件动作时间和空间上的总合完成总命令。它负责对总命令一级一级地进行时间和空间上的分解，最后分解成若干控制执行器动作的信号串。由于任务的接受和完成都体现在任务分解列，所以也可以说其他各列都是为之服务的，尽管在逻辑上并没有控制与被控制的关系。

环境建模列主要有五项功能：第一是依据信息处理列提供的信息，更新、修改数据库的内容；第二是向信息处理列提供周围环境的预测值，供信息处理列用来与传感器测得的数据比较、分析，做出判断。这两个功能都是和信息处理列打交道，相互交换信息的；第三是向任务分解列提供相关的环境模型数据和被控体的状态数据，任务分解列各模块以这些数据为基础进行任务分解、规划等工作；第四是对任务分解列模块的规划结果进行“仿真”，判断出按照分解列模块给出的各子目标执行的可能结果；第五是评价分解列模块的分解结果，分解的方案不一定惟一，选择的标准也因形势不同而变化。比如对一个路径进行规划，即分解成若干子目标，从起始点到目标点，未必仅有一条路线可通，而选择与评价的标准可能是路径最短，也可能是风险最小。后边的这三个功能是为任务分解列服务的。

全局存储器内存放表明物体和区域的空间关系的地图，各物体、区域等的特性表和整个系统的状态变量表，它被称为一个黑板结构。各模块利用它的数据，也修改它的数据，存放变量变化的结果。逻辑上，它是为所有模块服务的，事实上，直接和全局存储器打交道的主要是环境建模列各模块。在逻辑上它是一个全局数据库，在实现上它可以是分布式的，分散在各个单体、各个分系统以及各个 CPU 的存储器之中。

传感器信息处理列的功能是把装在系统上的各种传感器的信号进行滤波、集成、检验和度量，依信息处理顺序，自下向上逐渐复杂，并在不同层次上向环境建模列的各层次分别提供简单处理的信号、抽取出的特征信息、物体的分割与几何尺寸度量，最后到物体的识别结果。它通过由环境建模列提供的环境预测值和实测数据的比较来分析判断，通过对各种传感器测得数据在时间和空间上的综合，来完成上述功能。

体系结构的六层是依照信息处理的顺序排列的。第一层是坐标变换和伺服层。它把上层送来的载体要达到的几何坐标，分解变换成各关节的坐标，并对执行器进行伺服控制。第二层是动力学计算层。这一层工作于载体（单体）坐标系或世界（绝对）坐标系。它的作用是给出一个平滑的运动轨迹，并把轨迹上各点的几何坐标位置、速度、方向，定时地向第一层发送。第三层是基本运动层。这层工作在几何空间内，也可以工作在符号空间内。其结果是给出被控体运动的各关键点的坐标。由于上述这三层是对一个分系统的控制，各分系统工作性质不同，各层工作也相应不同。上述描述是以控制被控体运动而言的。第四层是单体任务层。这一层是面对任务的。把整个单体的任务分解成若干子任务串，分配给该单体上的各分系统。这一层也叫任务分解层或任务层。第五层是成组任务层。它的任务是把任务分解成若干子任务串，分配给组内不同的机器人单体。第六层是总任务层。它把总任务分解成由各组机器人完成的子任务并分配给各个机器人组。

NASREM 结构中各模块的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。

中国科学院沈阳自动化研究所移动机器人为背景，提出了开发式的体系结构 OSMOR

(an Open System for Mobile Robot), 如图 1-12 所示。整个系统结构分为任务分解、路径规划、运动学计算和伺服控制四层, 每层又分为两部分, 从而形成信息集成和任务分解两列。所有模块共享一个全局数据库。全局数据库内存放、修改和管理有关外部环境和系统状态的所有模块共用的全局数据, 各模块有自己的工作空间, 可以保存不同算法在工作时的临时数据。两列同层的对应模块仅传递要求与应答, 不传递信息数据。任务分解列的模块可直接向信息集成列模块提出所需的信息要求, 比如道路跟踪、搜寻路标或监视前方等, 信息列模块把结果存放在数据库中。信息列根据传感器, 判断意外事件, 比如能源将尽, 并将这一消息直接送给任务分解列同层模块, 事件描述的数据存储在数据库内, 任务分解列取出这些数据, 分析解决。人可以以不同的方式在不同层次通过任务分解列模块介入整个系统。车上的作业手、车体运动控制等各分系统都具有自己的下三层, 分系统可以增加, 其任务的分配与协调由任务分解层负责, 如图 1-13 所示。任务分解列负责接受移动机器人的总任务, 把这任务分解给各分系统, 最后变为电信号控制电机, 上层向下层发送命令, 即任务, 下层向上层反馈命令的执行结果。不同层次中加装标准格式的不同功能算法, 完成本层任务。

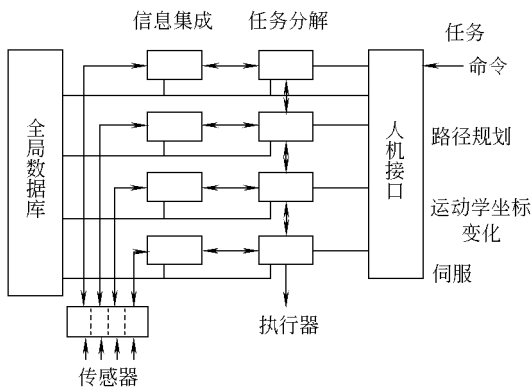


图 1-12 开发式的体系结构

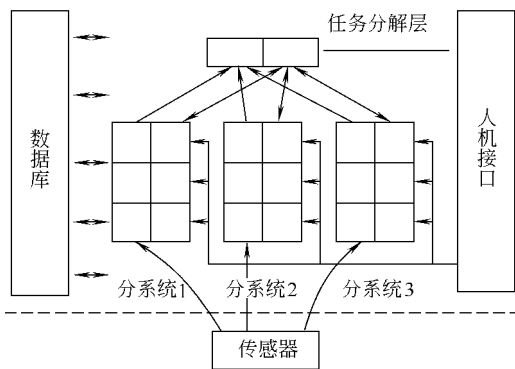


图 1-13 系统扩展

第一层为伺服级。它把从上层接收的关节转动要求量, 转变成执行部件控制的电压数字量, 送给执行部件。第二层为运动学计算层。本级进行运动学计算和坐标变换(由几何坐标变换为关节坐标)。依据现在位置状态点, 下一个应到达点及再下一个应到达点, 进行运动学计算。给出车体运动关节的转向、转速, 并把这一结果按一定时间节拍向下级输出。第三层为路径规划层。它接受从现有位置状态到达指定位置状态的命令, 进行路径的规划。规划在几何坐标内进行, 路径规划的结果是几何坐标描述的车体应经过的关键点。该层把至少超前一个点的结果向下层输出, 作为运动学计算层的命令。第四层为任务级, 也是最高一层。它负责接受对整个系统的命令, 把它分解给车体运动控制, 与手的协调任务分配, 以及多车协调等。

### 1.3 智能机器人的感知与多传感器信息融合

智能机器人的感知系统负责获取机器人内部状态和外部环境信息, 是机器人进行决策规划和运动控制的基础, 对于智能机器人在特殊环境下作业的机器人十分重要。感知系统的硬件组成单元是传感器, 其功能是为机器人提供诸如视觉、力觉、触觉、嗅觉等对外部环境的感知能力, 同时还可以感知机器人本身的工作状态与位置。机器人传感器分为内部传感器

和外部传感器两大类。内部传感器是用于检测机器人自身位置和状态的传感器，如关节型机器人的关节角度传感器等。外部传感器主要用于检测外部环境和工作对象的状态。外部传感器包括视觉、触觉、接近觉、力觉、嗅觉等。机器人感知系统是各种机器人传感器的集成和多传感器信息的融合。智能机器人的传感器分类如图 1-14 所示。

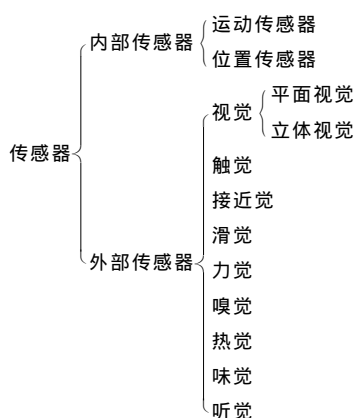


图 1-14 智能机器人的传感器分类

研究智能机器人的传感器是从模仿人的感觉开始的，如用视觉传感器模仿人的眼睛，用触觉传感器模仿人的触觉功能等。机器视觉最早用于处理积木世界、精密电子产品装配中的定位，后来在机器人视觉系统中得到应用。人工视觉一般包括图像获取、图像处理和图像理解三个过程。图像获取通过视觉传感器将三维环境图像转换为电位图像，所使用的传感器有电视摄像机和 CCD，早期使用黑白或彩色电视摄像机，现在则多应用 CCD；图像处理是将数字图像进行某种变换，如特征提取；图像理解则在处理的基础上给出环境描述，从而识别环境。视觉在移动机器人、自动车辆等领域有成功的应用。人工视觉最早应用于智能机器人，也是目前最为成功的感知系统。但机器视觉的处理

能力、实时性仍然较差，图像理解能力更是不尽如人意。人看到窗外的树叶飘动，根据飘动的方向、力度，就可以判断风向和风力。但是用人工视觉是无法做到的。人工视觉系统图像处理量大，随着光子计算机的出现，图像实时处理速度会大大提高、实时性问题就不难解决。图像理解仍需要深入研究。智能机器人的某些传感器，其性能指标超过人的感觉能力。如机器人的腕力传感器，它不仅能测出小到几克的力的变化，而且能感觉到六个方向的力。这对人来说是无法做到的。触觉传感器主要用于模仿人的触觉功能，通过触觉传感器与被识物体相接触或相互作用来完成对物体表面特征和物理性能的感知。触觉传感器用压电材料制作成传感器阵列，在每个方向上至少应装 25 个触觉元件，每个元件的尺寸不超过  $1\text{mm}^2$ ，才可能获得较满意的触觉能力。随着 MEMS 的技术进步，现在能够制作出分辨率优于人类皮肤的触觉传感器。

人类在感知外部环境时，并非单纯依靠某个感觉器官，而是多感官信息的综合。同样，智能机器人的传感器也不能单纯追求高精度、高性能，这样只会增加传感器的成本和感知系统的复杂性。单一传感器获得的信息只能是局部的、片面的环境特征信息，带有较大的不确定性，甚至偶尔是错误的。随着新型敏感材料和传感器不断涌现，在同一敏感材料上制作多传感器成为可能，促进了多传感器系统的发展。对于多传感器获取的信息进行处理，需要发展多传感器信息融合技术。智能机器人要在各种不确定的、非结构化的环境中工作，其主要任务是确定所处环境的模型描述。单个传感器无法胜任环境描述的重任，因此现在的智能机器人都装备了多个传感器。使用多种不同的传感器来获得环境的多种特征，从而描述环境模型。智能机器人使用多个不同类型的传感器，这些传感器获取同一环境下不同或相同侧面的信息，带来信息的冗余，甚至不同传感器获取同一侧面的信息互相矛盾。如何有效处理多传感器信息成为衡量智能机器人智能水平高低的重要条件之一。多传感器信息融合最早由美国人提出，在军事系统中得到成功应用，产生了一些实用系统。20 世纪 80 年代初，多传感器信息融合的研究受到世界各国更多学者的关注，相应的理论和技术也在孕育之中。先后出版了一些多信息融合方面的书籍、期刊，还举行了这方面的国际会议。多传感器

信息融合技术不仅引起学术界的极大关注，还得到了政府、企业的财政资助。美国、前苏联、日本共同进行的“脑神经研究中心”等一系列计划，把多传感器信息融合的研究又推到了一个新的高度。为了迎接来自美国和日本的挑战，欧洲共同体各国也从1987年开始了为期5年的SKIDS (Signal and Knowledge Integration with Decisional Control for Multisensory System) 计划，其主要目标是研究多传感器信息融合的通用结构、多传感器系统和融合设计建模。

## 1.4 智能机器人的控制技术

根据智能机器人的任务分解，在面向设备的基础级可以采用常规的自动控制技术，如PID控制、前馈控制等。在协调级和组织级，存在不确定性，控制模型往往无法建立或建立的模型不够精确，无法取得良好的控制效果。因此，需要采用智能控制方法，如神经网络控制、模糊控制、专家控制以及集成智能控制。

### (1) 神经网络控制

基于人工神经网络的控制，称之为神经网络控制。神经网络控制采用仿生学的观点与方法来研究人脑和智能系统的高级信息处理。神经网络控制器模仿人的形象思维，将输入和输出映射成控制信号。一旦模型建立后，在输入状态信息不完备的情况下，也能快速作出响应，进行模式识别。神经网络控制不需要数学建模。这对于智能机器人的控制来说，是十分理想的。但神经网络控制存在自学习的问题，也就是说，当环境发生变化，原来的映射关系不再适用时，需要重新训练网络。

### (2) 模糊控制

1965年美国著名控制论学者L. A. Zadeh首次提出一种完全不同于传统数学与控制理论的模糊集合理论，把信息科学推进到人工智能的新方向。基于模糊逻辑理论的控制方法，称之为模糊控制。1986年，世界上第一块基于模糊逻辑的人工智能芯片在著名的贝尔实验室研制成功。事实表明，模糊理论具有强大的生命力和广阔的应用前景。模糊理论之所以能在信息时代获得如此迅速的发展，是由于它为信息革命提供了一种新的富有魅力的数学工具与手段，具有许多优点。

a. 模糊理论给出了一种表现自然语义的理论和方法，使自然语言能够转化成机器可以“理解”和接受的东西，提高了机器的灵活性。

b. 模糊理论给出了模糊逻辑和近似推理的理论和方法，用简单的软、硬件可以使机器更“聪明”、智能化程度更高。模糊洗衣机、模糊冰箱等家电产品的面世，充分证明了这点。

c. 模糊理论的应用面广。模糊控制能够将人的控制经验及推理过程纳入自动控制策略之中。在经典模糊控制方面取得一大批有实际意义成果的同时，人们开始重视经典模糊控制系统稳态性能的改善、模糊集成控制、模糊自适应控制、专家模糊控制、神经模糊控制与多变量模糊控制理论与设计方法的研究。

模糊控制应用于无法建立数学模型或难以建立数学模型的场合。模糊控制提供了一种实现基于自然语言描述规则的控制规律的新机制，同时也提供了一种改进非线性控制器的替代方法。这些非线性控制器一般用于控制含有不确定性和难以用传统非线性理论来处理的装置。模糊控制单元由模糊规则库、模糊产生器、模糊推理机和模糊消除器四个功能模块组成，其基本功能结构如图1-15所示。模糊产生器模块实现对系统变量论域的模糊划分和对清晰输入值的模糊化处理。模糊规则库用于存储系统的基于语言变量的