



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

基于16/32位DSP 机器人控制系统 设计与实现

张培仁 张志坚 编著
郑旭东 张华宾



清华大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

基于 16/32 位 DSP

机器人控制系统

设计与实现

张培仁 张志坚
郑旭东 张华宾 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

机器人的研究应用与发展对国民经济各领域的推动起到了越来越重要的作用。“机器人设计技术”课程也将在重点高校作为一门学科建设受到重视。

本书积聚了作者 5 年来的科研成果和丰富的教学经验,全书以 4 部分 22 章分别讲述了基于 16/32 位 DSP 机器人控制系统的理论基础,涉及时下几个主流 DSP 系列,如 TMS320LF240x 和 TMS320C28x。然后,作者将获奖成果或已投入生产的项目“足球机器人”、“自平衡两轮电动车”、“旋转式倒立摆”用来具体讲述系统的实现过程,包括硬件设计、软件设计、算法设计、电路系统分析与设计等,是一本含金量相当高的科技教材。

本书已列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,适合作为人工智能、自动化控制、电子电气、机械设计及相关专业的本科生教材,也适合作为研究生和相关研究开发人员的技术参考用书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

基于 16/32 位 DSP 的机器人控制系统的设计与实现/张培仁等编著. —北京:清华大学出版社, 2006

ISBN 7-302-13903-2

I. 基… II. ①张… ②张… ③郑… ④张… III. 机器人控制—控制系统—系统设计 IV.TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 116138 号

出 版 者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

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

邮 编: 100084

社总机: 010-62770175

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 夏非彼

文稿编辑: 周烈强 何武

封面设计: 林陶

版式设计: 科海

印 刷 者: 北京市耀华印刷有限公司印刷

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26 字数: 633 千字

版 次: 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-13903-2/TP·8354

印 数: 1~5000

定 价: 45.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010) 82896445

前 言

机器人技术近 40 年来有了飞速的发展,已成为现代化高科技的重要发展方向之一。机器人的研究关系到多个学科,并且这些学科相互交叉融合。它对国民经济各个部门的发展都有重要意义。中国科学技术大学自动化系“嵌入式微处理器和远程控制网络实验室”从事嵌入式微处理器研究已有 30 年历史,具有丰富的经验和深厚的理论基础。2000 年以来,本实验室着重从事智能机器人的设计和制造及其控制算法的研究,前后从事旋转式倒立摆、自平衡两轮电动车(代步车)和足球机器人的多项科研工作,并代表中国科学技术大学多次参加国内外足球机器人(小型组)比赛,取得优秀成绩,是国内各大学中该项目成绩最好的参赛队。笔者也曾是中国科学技术大学的大学生参加 2003 年度国际和国内机器人比赛的技术指导。

旋转式倒立摆研究项目是由孙德敏和张培仁教授共同领导完成的。对该项目做出重要贡献的还有王永、卿志远、都改欣、黄南晨等人。

足球机器人(小型组)是以中国科学技术大学副校长王东进教授为组长,由张培仁、汪增福、陈晓明、杨杰教授、陈继荣副教授各自带领博士生和硕士生共同完成的。本实验室对该项目做出重要贡献的还有研究生徐俊艳、徐勇明、郑旭东、王康正、曾鹏、邓超等人。

自平衡两轮电动车研究项目是在张培仁、张培强教授主持和领导下完成的。对本项目有重要贡献的还包括张先舟、屠运武、张志坚、丁学明、张华宾、曹少华等人。

本书是我们 5 年来科研、教学工作的小结,也是为今后开设“机器人设计技术”课程教材做好准备。编著本书过程中,考虑到机器人技术教材的完整性,在书中个别地方引用其他老师已发表文章的内容时,特在书中引用节的结尾处注明其主要科研负责人和参加者姓名。没有注明的内容完全是本实验室的独立研究成果。DSP 基础部分是根据有关公司公布的技术资料结合我们使用中的体会写成的。

本书经中国科学技术大学自动化系张培仁教授精心选材、组织、审核、校验,并由张培仁、郑旭东、张志坚、张华宾共同执笔完成本书各章节。机器人发展和研究热点部分由张培仁执笔完成,DSP 基础章节和足球机器人部分由郑旭东执笔完成,自平衡两轮电动车部分由张志坚执笔完成,倒立摆部分由张华宾执笔完成。自平衡两轮电动车部分引用了本实验室张培仁、屠运武、丁学明等人的论文和文章。倒立摆部分引用了本实验室张培仁、都改欣和其他实验室孙德敏、黄南晨等人的论文和文章。足球机器人部分引用了本实验室

张培仁、徐俊艳、徐勇明、曾鹏等人的论文和文章。笔者在此对本书引用了其论文和文章的同仁们表示衷心感谢。另外，本实验室其他老师和研究生也对我们的科研工作给予了大力帮助，并提供大量资料，在此笔者一并表示衷心感谢。

本书编著时间短，作者水平有限，书中难免存有不足和错误之处，请广大读者批评指正，并给予谅解。

中国科学技术大学 张培仁
2006年1月于合肥

目 录

第 0 章 机器人学的发展和相关机器人系统介绍.....	1
0.1 机器人学的发展概述	1
0.2 机器人研究的热点和内容	2
0.2.1 机械结构设计.....	2
0.2.2 体系结构设计.....	2
0.2.3 多机器人系统的研究.....	3
0.2.4 机器人的传感器和传感器信息融合.....	4
0.2.5 机器人的电路系统设计.....	5
0.3 足球机器人简介	6
0.3.1 足球机器人主要组成部分.....	6
0.3.2 研究足球机器人的意义.....	8
0.4 自平衡两轮电动车简介	9
0.5 倒立摆机器人系统概述	10

第 1 部分 基础理论

第 1 章 DSP 概述	12
1.1 DSP 的特点	12
1.2 TI 公司的 DSP 产品	14
第 2 章 TMS320LF240x 概述	17
2.1 TMS320C2000 系列 DSP 概况	17
2.2 TMS320LF240x 芯片特点	17
2.3 TMS320LF240x DSP 的 PGE 封装图和 CPU 控制器功能结构图	18
2.4 TMS320LF240x DSP 引脚功能	21
2.5 TMS320LF240x DSP 存储器映射图	27
2.6 TMS320LF240x DSP 外设存储器映射图	30
2.7 TMS320LF240x 的存储器和 IO 空间	31
2.7.1 程序存储器.....	31
2.7.2 数据存储器.....	32
2.7.3 I/O 空间	34

第 3 章 TMS320LF240x DSP 内部资源	35
3.1 TMS320LF240x DSP 的 CPU 功能模块	35
3.1.1 状态寄存器 ST0 和 ST1	38
3.1.2 输入定标移位器	40
3.1.3 乘法器	41
3.1.4 中央算术逻辑部分	42
3.1.5 辅助寄存器算术单元 (ARAU)	43
3.2 系统配置和中断	45
3.2.1 系统配置寄存器	47
3.2.2 中断优先级和中断向量表	51
3.2.3 外设中断扩展控制器 (PIE)	54
3.2.4 中断向量	56
3.2.5 中断响应的流程	57
3.2.6 中断响应的延时	58
3.2.7 CPU 中断寄存器	58
3.2.8 外设中断寄存器	61
3.2.9 复位	67
3.2.10 无效地址检测	67
3.2.11 外部中断控制寄存器	67
3.3 程序控制	69
3.3.1 程序地址的产生	69
3.3.2 流水线操作	72
3.3.3 转移、调用和返回	73
3.3.4 条件转移、调用和返回	74
3.3.5 重复单条指令	76
第 4 章 TMS320C28x 系列概述	77
4.1 TMS320C28x 系列芯片的性能	77
4.2 TMS320F28x 系列 DSP 的引脚及其功能	79
4.3 C28x 系列 DSP 的内部结构	92
第 5 章 C28x 系列 DSP 内部资源介绍	98
5.1 中央处理器单元 CPU	98
5.1.1 CPU 的逻辑图及特性	99
5.1.2 CPU 的结构及其总线	100
5.1.3 CPU 的寄存器	101
5.2 时钟和系统控制	106
5.2.1 时钟信号和控制寄存器	106
5.2.2 振荡器 OSC 和锁相环 PLL 时钟模块	107
5.2.3 低功耗方式模块	109
5.2.4 看门狗模块	110

5.3 CPU 的中断系统和复位	110
5.3.1 CPU 中断向量和优先级	112
5.3.2 CPU 中断寄存器	113
5.3.3 可屏蔽中断处理的标准操作流程	113
5.3.4 不可屏蔽中断	114
5.4 片内外设的中断扩展 (PIE)	115
5.4.1 向量映射	116
5.4.2 从外设到 CPU 的多通道中断请求流程	118
5.4.3 PIE 向量表	118
5.5 32 位 CPU 定时器 0/1/2	125
5.5.1 CPU 定时器的寄存器	126
第 6 章 C 语言程序编写和调试环境	131
6.1 TMS320C2x/C2xx/C5x C 编译器概述	131
6.2 TMC320C2x/C2xx/C5x C 编译器环境	132
6.2.1 主要菜单及功能介绍	134
6.2.2 工作窗口区	137
6.2.3 利用 TMC320C2x/C2xx/C5x C 编译器开发应用程序	139
6.2.4 头文件和命令文件示例	142

第 2 部分 RoboCup 小型组机器人

第 7 章 RoboCup 简介	151
7.1 机器人足球比赛的起源和类型	151
7.2 小型组比赛	152
7.3 国内外的相关进展	153
7.3.1 国际领先队伍介绍	153
7.3.2 国内参赛队伍介绍	154
7.4 小型组比赛系统	155
7.4.1 系统组成及其相互关系	155
7.4.2 视觉子系统	155
7.4.3 决策子系统	156
7.4.4 无线通信子系统	157
7.4.5 机器人车体子系统	159
第 8 章 底层系统设计	160
8.1 研究的出发点和发展趋势	160
8.2 机构设计概况	161
8.3 电路系统设计概况	164

第 9 章 机构设计	166
9.1 机构设计流程	166
9.2 设计目标	166
9.3 运动机构的分析与设计	167
9.3.1 轮子的设计思想	167
9.3.2 轮子布局	171
9.4 球处理机构的分析与设计	176
9.4.1 带球机构	176
9.4.2 击球机构	179
9.4.3 挑球机构	181
第 10 章 电路系统分析与设计	185
10.1 电路系统总述	185
10.2 主控芯片的性能与工作方式	187
10.2.1 TMS320F2812	187
10.2.2 HCTL2000	188
10.3 通信系统	192
10.3.1 通信结构	193
10.3.2 nRF2401	193
10.3.3 异步串行通信芯片 ST16C550	194
10.4 各执行机构的驱动与控制电路	198
10.4.1 带球机构	198
10.4.2 运动机构	199
10.4.3 击球和挑球机构	201
10.5 传感器电路设计	203
10.5.1 球检测电路	203
10.5.2 车体姿态传感器	204
10.5.3 ADXL210JE	205
10.5.4 ADXRS300	208
10.6 辅助电路	213
10.6.1 74HC595	213
10.6.2 EEPROM	217
第 11 章 控制系统的实现	230
11.1 控制系统简介	230
11.2 指令信息的接收与处理	230
11.3 机构控制	236
11.3.1 带球机构	236
11.3.2 击、挑球机构	237
11.4 异常预防与处理	238
11.5 软件实现	240

第 12 章 运动控制	242
12.1 综述	242
12.2 基于动力学模型的实时次优轨迹生成算法	243
12.2.1 建模	243
12.2.2 输入域的解耦和分离	245
12.2.3 基于 bang-bang 控制的轨迹生成算法	247
12.2.4 轨迹同步	249
12.2.5 结果	250
12.3 底层运动控制	253
12.3.1 基于数字 PI 算法的电机调速	253
12.3.2 针对扭矩控制的改进数字 PI 算法	255
12.3.3 基于强化学习的参数整定方法	257

第 3 部分 自平衡两轮电动车

第 13 章 概述	260
13.1 自平衡两轮电动车及其设计流程	260
13.1.1 自平衡两轮电动车	260
13.1.2 自平衡两轮电动车设计流程	261
第 14 章 系统动力学分析	263
14.1 力学分析	263
14.1.1 建立坐标系	263
14.1.2 系统模型参数	263
14.1.3 系统速度	264
14.1.4 系统动能的计算	265
14.1.5 系统运动微分方程	267
14.2 系统参数的测量	270
14.2.1 理论基础	270
14.2.2 硬件电路工作原理	271
14.2.3 参数测量	273
第 15 章 硬件设计	276
15.1 总体设计	276
15.2 DSP TMS320LF2407A	277
15.2.1 TMS320LF240xA 概述	277
15.2.2 TMS320LF2407A	279
15.3 摆杆角度的测量	280
15.3.1 传感器简介	280

15.3.2 倾角传感器.....	281
15.4 摆杆角速度的测量.....	284
15.4.1 微型固态陀螺 MEMS 角速度传感器.....	284
15.4.2 ENC-03JA 角速度传感器.....	286
15.5 左右轮角速度的测量.....	288
15.5.1 E6B 编码器.....	288
15.5.2 码盘信号检测.....	290
15.6 电源和系统状态指示.....	291
15.6.1 电源.....	291
15.6.2 系统状态指示.....	292
15.7 功放电路.....	292
15.7.1 功率 MOSFET 简介.....	292
15.7.2 驱动电路.....	294
第 16 章 系统调试、仿真平台.....	296
16.1 TMS320LF2407A 与 PC 机的串行通信.....	296
16.1.1 TMS320LF2407A 的串行通信接口.....	296
16.1.2 电平转换电路.....	300
16.1.3 PC 端监控软件.....	301
16.2 TMS320LF2407A 与 PC 机的无线通信.....	303
16.2.1 nRF2401 简介.....	304
16.2.2 nRF2401 在自平衡两轮电动车调试平台中的应用.....	306
16.3 PC 端分析、仿真软件——MATLAB.....	308
第 17 章 线性系统理论在自平衡两轮电动车中的应用.....	310
17.1 理论基础.....	310
17.2 几个重要的 MATLAB 函数.....	312
17.3 自平衡两轮电动车状态空间模型.....	313
17.4 自平衡两轮电动车载人时的状态反馈控制.....	315
17.4.1 系统状态方程、能控性.....	315
17.4.2 第一种情况.....	316
17.4.3 第二种情况.....	318
17.4.4 第三种情况.....	320
17.4.5 三种情况的分析.....	322

第 4 部分 旋转式倒立摆

第 18 章 倒立摆系统概述.....	324
18.1 倒立摆的基本概念.....	324

18.2 常见的倒立摆	325
第 19 章 硬件设计	328
19.1 系统总体设计方案	328
19.1.1 旋转式倒立摆总体结构	328
19.1.2 倒立摆系统工作原理	329
19.2 机械设计	330
19.3 DSP 控制器	331
19.4 DSP 的电源供电及时钟选择	335
19.4.1 供电方案	335
19.4.2 DSP 的时钟选择	336
19.5 复位电路及 MAX706	337
19.6 通信接口	339
19.7 角位移传感器	340
19.8 无刷直流电机及控制电路	341
19.8.1 无刷直流电机的结构及原理	341
19.8.2 使用 dq 变换求取无刷直流力矩电机系统的数学模型	343
19.8.3 无刷直流力矩电机系统的函数	344
19.8.4 无刷直流电机的力矩波动	345
19.8.5 电机驱动的设计	346
第 20 章 软件设计	352
20.1 DSP 程序总体设计与流程图	352
20.2 DSP 中断服务子程序、寄存器	353
20.2.1 初始化子程序	353
20.2.2 脉宽调制控制输出子程序初始化	355
20.2.3 串口通信子程序	355
20.2.4 采样子程序	356
20.2.5 控制计算子程序	357
20.3 PC 软件设计	357
第 21 章 模型分析与控制算法设计	361
21.1 倒立摆模型分析	361
21.1.1 模型分析	361
21.1.2 试验参数计算	363
21.2 基于状态反馈的带观测器的倒立控制	364
21.3 基于能量分析的摆起控制	368
21.3.1 摆起控制的实现方法	368
21.3.2 “摆起—倒立”控制效果	369
第 22 章 随动系统	372
22.1 随动系统的结构和原理	372

22.1.1 把倒立摆改装为随动系统.....	372
22.1.2 电平转换器.....	373
22.2 随动系统稳定性分析	375
22.3 随动系统的时域特性分析	376
22.4 随动系统的频域特性分析	378
22.5 随动系统的频域校正实验	380
附录 A C-Lib 中的函数集	385
附录 B 解耦图形的推导	397
附录 C 电机调速程序.....	399

第 0 章 机器人学的发展和 相关机器人系统介绍

0.1 机器人学的发展概述

自 20 世纪 60 年代人类研究了第一台机器人以来,机器人技术就显示出强大的生命力,在 40 年的时间里,机器人技术得到迅速发展。机器人学是现代高科技发展的重要方向之一。

机器人在工业、民用以及军事等领域具有广泛的应用前景。它对我国国防、工业和农业现代化,提高人民生活水平有重要意义。机器人技术是一个多学科交叉的高科技领域,对人工智能、模式识别、自动控制、电子电气、机械设计、电子电路等多个学科提出了很高的要求。因此,开展机器人的研究对带动人工智能、自动控制、电子电气、机械设计以及相关领域的发展具有重要的推动作用。

国内外专家学者一直在讨论到底什么是机器人。早在 1967 年,日本召开国际机器人学术会议,就有人提出了“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、半机械半人性、自动性、作业性、通用性、信息性、柔性、有限特征的柔性机器”这一概念。也有人把机器人描述为“一种用于搬运材料、邮件或其他特种装置的可重复编程的多功能操作机”。日本工业机器人协会则把它定义为“一种带有存储器的通用机械,能通过编程和自动控制来执行作业等任务的机器”。我国科学家认为:“机器人是一种自动化机器,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,具有高度的灵活性”。以上定义虽不一致,但基本上都认为机器人是这样一种机器:具有一定仿人性的能力,可以代替人工作的自动化设备。

机器人发展大致经历了三个阶段:

第一阶段,可编程的示教再现机器人。这类机器人无传感器,采用开关控制、示教再现控制和可编程控制。机器人的作业路径或运动参数都需要编程给定或者示教给定,它无法感知环境变化,例如工业用焊接、喷漆的机器人。

第二阶段,具有一定感知功能和适应能力的离线编程型机器人。这类机器人配备了简单的内部传感器,能感知自身运动的速度、位置、姿态等物理量,并以这些信息的反馈构成闭环控制;它还配有简单外部传感器,因此具有部分适应外部环境的能力。到 20 世纪 70 年代和 80 年代,随着计算机和人工智能的发展,特别是微处理器的进步,机器人进入实用时代,发展了不少具有移动机构、通过传感器控制的机器。

第三阶段,智能型机器人。这类机器人具有由多种外部传感器组成的传感系统,可通过它们获取大量外部数据、信息,再进行处理,从而确切地描述外部环境,自主完成某一项任务。它应具有知识库,能根据环境变化做出相应的决策。到 20 世纪 90 年代,人工智

能、模糊控制、神经网络、遗传算法等先进技术的应用,使机器人具有自主判断和决策功能,应用领域不断扩大。在这一阶段,深海探测、火星探险、微小型足球机器人、仿人型机器人相继问世。

目前机器人研究的领域可分三类,即工业机器人、服务机器人以及娱乐机器人。工业机器人现已应用于许多领域,在技术水平、应用范围、产业规范等方面占有绝对主导地位。目前热点是在水下、空间、核工业、医用、军用等方面的应用。娱乐机器人包括机器人宠物、在 PC 平台操作的比赛机器人以及自主决策的足球机器人等。服务机器人以人为服务对象,从事医疗、引路、家政等服务。

0.2 机器人研究的热点和内容

机器人研究的热点也是设计机器人要解决的关键技术。机器人系统主要由机械结构、传感器系统、控制系统和信息处理等部分组成。因此机器人的研究内容涉及许多方面,主要包括机械结构设计、体系结构设计、电子电路各种接口设计、运动学建模、动力学建模、机器人仿真平台研制、移动机器人定位、路径规划、环境建模、多个传感器的信息获取及融合等技术。另外还有一个重要分支,即多机器人系统的研究。下面讨论部分主要内容。

0.2.1 机械结构设计

机器人的机械结构形式选型和设计是非常重要的。就机器人结构而言,在各种领域和场合,特别是极端条件下(如深海中),开展丰富而具创造性的工作是很困难的。当前,各个研究单位都在设计地上、地下、水中、空中、宇宙等作业环境的各种移动机构;对足式步行机器人、履带式机器人、特种机器人研究比较多。由于轮式机器人技术最为普及和成熟,本书主要介绍轮式移动机器人。

0.2.2 体系结构设计

机器人是一个具有高度复杂性的综合系统,为了使系统能够可靠、及时地工作,应解决如下问题:需要什么样的体系结构和软件支持?因此,研究人员在解决机器人具体技术的同时,必须致力于体系结构的研究。机器人的体系结构通常也称为机器人控制器的体系结构,是指把感知、建模、规划、决策、行动等多种功能模块有机结合起来,从而在静态、动态环境中完成目标任务的机器人结构框架。目前机器人的体系结构主要有三种:慎思式体系结构、基于行为的反应式体系结构和混合式体系结构。

慎思式体系结构(Deliberative Architecture)又称基于功能分解的体系结构,按照“感知—建模—规划—执行”的模式来实现机器人的学习与控制。它是按照图 0-1(a)所示操作的序列循环执行。

在这种结构下,机器人系统首先通过各种传感器感知外界环境信息,然后更新机器人的知识库,如环境地图信息、路径信息等,并由中心控制器对已知的信息予以推理,用以进行规划与决策,最后将规划的命令送到末端执行器。

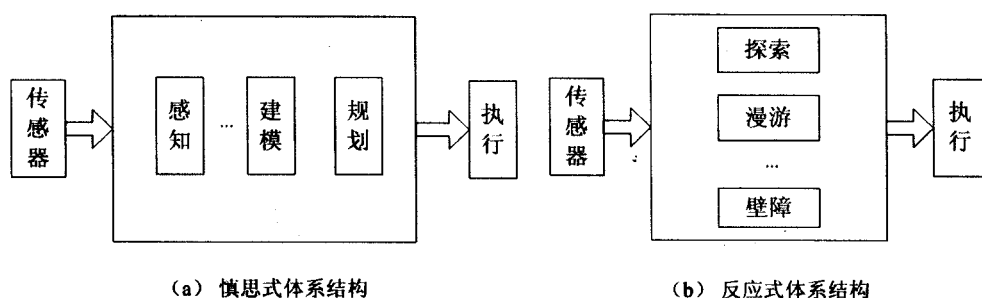


图 0-1 机器人体系结构

这种结构的主要优点是：在静态或动态环境已知条件下，对机械结构力学、动力学分析清楚时建模比较准确，方法简单，便于学习和控制。这种结构的主要缺点是：(1) 要求环境已知或部分已知，对完全未知、移动、不可预测的环境适应性差；(2) 反应速度慢。这是因为，机器人要通过大量运算来分析自身所处状态，而后再执行相应动作。特别是机器人遇到意外，偶发突然情况时，由于事先建模没有包括此种情况，所以要停下来重新进行规划。

基于行为的反应式体系结构 (Behavior-Based Reactive Architecture) 不依赖于规划，而是将感知直接映射为动作，即机器人在整个动作空间是按照行为来分解，如图 0-1 (b) 所示。这种结构由于不经过规划行为，直接对外界环境的感知做出反应，使得机器人反应速度快；但同时正是由于没有远期规划，缺少全局整体观点，智能低，难于优化机器人的学习和行为控制。

基于行为的反应式体系结构源于动物对环境反应机制的模仿，但它完全脱离环境建模和规划，这样很难完成复杂任务。目前不少研究者把基于功能分解的体系结构与基于行为的反应式体系结构互相结合，包容二者体系，设计出多种混合式结构。大多数混合式结构包含三个部分：(1) 一个反应式反馈控制机制；(2) 一个满速的基于功能分解的体系结构机制；(3) 联系上述两部分的序列控制机制。

要使机器人能够在复杂多变的环境中自主地完成任务，就要使机器人具备更高的智能。传统的人工智能研究和机器人制造采取的是自上而下的研究方法，即先确定一个复杂的高层认知任务，接着把这个任务分解为一系列子任务，然后构造实现这些任务的完整系统。这种事先把相关知识存储起来，然后利用计算机的大容量存储能力和快速计算能力对相关知识进行处理的方法又称为“以知识为基础的研究”方法。这种方法在已知条件下可以具备规划和推理“思维”能力，但在未知环境中应变能力和学习能力可能比较差。在未知环境下系统的实时性、鲁棒性都可能面临挑战。在此背景下，近年来具有自学习能力成为机器人新的研究热点。机器人通过学习技术增强自身智能，改善行为策略。其中，强化学习是最广泛应用的一种方法。

0.2.3 多机器人系统的研究

多机器人系统目前也引起普遍重视，这是出于单机器人在信息的获取、处理及控制能力等方面存在局限性，难以适应复杂的工作任务及多变的工作环境。于是人们考虑通过多

机器人的协作与协调来弥补机器人个体能力不足, 扩大完成任务的能力范围以及提高完成任务的效率。美国、欧盟和日本等国都非常重视多机器人系统的研究, 也建立了一些仿真系统和实际系统。

多机器人系统协调控制的研究热点包括: (1) 群体的体系结构; (2) 通信与磋商, 即多机器人通信时会产生竞争, 如何进行有效同步将是关键问题; (3) 感知与学习; (4) 建模与规划; (5) 防止死锁和避碰; (6) 智能机器人控制系统的实现。分布式多机器人系统中每个机器人作为一个独立的智能体, 根据自身的感知和其他机器人交互, 自主进行决策与行动, 这种系统通过分工合作带来好处的同时, 也对控制系统的设计带来了更多难题, 即控制系统实施是局部的, 而系统设计追求的目标是全局的, 而在这种分布式多智能体系中, 局部与局部、局部与整体往往充满矛盾与冲突, 尤其当系统中机器人数量越来越多时, 这种冲突更加严重, 系统的组织、规划、协调与控制问题变得更加困难。

0.2.4 机器人的传感器和传感器信息融合

机器人发展到现阶段已向着带有感觉和具有智能的方向发展。机器人感觉系统是由各种传感器及由其组成的传感器系统来实现的, 其作用是使机器人具有理解目标, 掌握外界情况, 并做出决策以适应外界环境变化而进行工作的能力。因此机器人传感器是一类具有特定用途的传感器, 涉及多种学科。

机器人传感器一般也可以分为外部传感器和内部传感器两大类。机器人外部传感器又可以分为视觉式和非视觉式两大类。

视觉式包括单点视觉、线阵视觉、平面视觉和立体视觉。非视觉式包括距离觉、听觉、力觉、触觉、滑觉、压觉。

外部传感器主要功能是检测外部状况信息, 使机器人适应外界环境变化。例如作业环境中对象变化, 障碍物状态, 位置变化等。

机器人内部传感器包括位置、速度、加速度、力、温度、平衡、倾斜角、异常等传感器。它的功能是检测机器人自身状态, 如自身的运动、位置和姿态等信息。

机器人传感器与一般传感器相比有如下特点: (1) 种类众多, 高度集成化、综合化; (2) 各种传感器之间联系密切, 因此需要信息融合技术; (3) 传感器实质上包括获取和处理两部分; (4) 传感器往往是机器人控制系统中的一部分, 直接用于反馈控制从而直接参与机器人的动作控制; (5) 要求体积小, 易于安装。

传感器信息融合技术是指人们不仅仅要了解和掌握单一、孤立传感器的情况, 还需要知道整个传感器系统的状态。传感器信息融合 (Sensor Data Fusion) 又称为数据融合, 它是对多种信息的获取、表示及其内在联系进行综合处理和优化的技术。传感器信息融合技术对多信息的视觉进行处理及综合, 得到各种信息的内在联系和规律, 从而剔除错误信息, 保留正确有用成分, 最终实现信息的优化。

智能机器人的仿生机构研究和探索, 机器人视觉中三维、时变图像处理, 主动视觉研究, 机器人内部非视觉传感器信息的获取和理解, 智能机器人的行为控制, 环境建模与处理, 知识的认识与逻辑推理, 以及神经网络技术在机器人控制和传感器信息处理方面的应用等等, 都与信息融合思想有关, 因而信息融合技术在机器人设计中占有重要地位。

传感器信息融合技术方法分四类: 组合、综合、融合、相关。由此产生多种算法, 例