

国家级“智能科学基础系列课程教学团队”机器人学课程配套教材
相关教材曾获全国普通高校优秀教材一等奖

关于本电子书说明

本人由于一些便利条件，可以帮您提供各种中文电子图书资料，且质量均为清晰的PDF图片格式，方便阅读和携带。文学、法律、计算机、人文、经济、医学、工业、学术等方面的图书，都可以帮您找提供电子版本，500万图书馆资源收藏供你选择。

我的QQ是859109769 佳佳e图书（提供完整版）

第2版

机器人学基础

FUNDAMENTALS OF ROBOTICS SECOND EDITION

蔡自兴 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

机器人学是一门高度交叉的前沿学科，引起许多具有不同专业背景人们的广泛关注，随着研究的深入，已获得快速发展。本书是一部比较系统和全面的机器人学导论性著作，主要介绍机器人学的基本原理及其应用，反映出国内外机器人学研究和应用的最新进展。全书共10章，主要内容包括机器人学的起源与发展、机器人学的数理基础、机器人运动学的表示与求解、机器人动力学方程、机器人的控制原则和控制方法、机器人传感器、机器人轨迹规划、机器人程序设计、机器人的应用和展望等。

本书特别适合作为高等院校本科生的“机器人学”课程教材，也适合从事机器人学研究、开发和应用的科技人员参考。

本书特色：

- 系统、全面的内容，满足多种方式的教学需求。
- 清晰、严谨的叙述，梳理难易适度的基础知识。
- 新颖、宽泛的习题，激发解决问题的创新思维。

FUNDAMENTALS OF ROBOTICS SECOND EDITION



架指导：人工智能/智能机器人

ISBN 978-7-111-49346-4



9 787111 493464 >

定价：39.00元

投稿热线：(010) 88379604

客服热线：(010) 88378991 88361066

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

华章网站：www.hzbook.com

网上购书：www.china-pub.com

数字阅读：www.hzmedia.com.cn

智能

国家级“智能科学基础系列课程教学团队”机器人学课程配套教材
相关教材曾获全国普通高校优秀教材一等奖



第2版

机器人学基础

FUNDAMENTALS OF ROBOTICS SECOND EDITION

蔡自兴 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人学基础 / 蔡自兴等编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2015.3
(智能系统与技术丛书)

ISBN 978-7-111-49346-4

I. 机… II. 蔡… III. 机器人学—高等学校—教材 IV. TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 029654 号

本书是一部比较系统和全面的机器人学导论性著作, 主要介绍机器人学的基本原理及其应用, 并反映了国内外机器人学研究和应用的最新进展。全书共 10 章, 主要内容包括: 机器人学的起源与发展、机器人学的数理基础、机器人运动学的表示与求解、机器人动力学方程、机器人的控制原则和控制方法、机器人传感器、机器人轨迹规划、机器人编程、机器人的应用和展望等。

本书特别适合作为高校本科生的机器人学教材, 也适合从事机器人学研究、开发和应用的科技人员参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 李 燕

责任校对: 董纪丽

印 刷: 三河市宏图印务有限公司

版 次: 2015 年 3 月第 2 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 13.75

书 号: ISBN 978-7-111-49346-4

定 价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

FOREWORD

代 序

机器人学——自动化的辉煌篇章^①

现代自动控制技术的进步，为科学研究和探测工作开辟了新的可能性，开拓了靠人力所不能胜任的新科学事业。20 世纪 90 年代实现了 6000 米到 10 000 米深海探测，实现了对太阳系的金星、火星、木星及一些卫星和彗星的探测。哈勃空间望远镜的轨道运行给天文学家研究宇宙提供了前所未有的工具和机会。1997 年美国科学家研制的探路者号（Pathfinder）小车胜利地完成了火星表面的实地探测，是 20 世纪自动化技术最高成就之一。

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。仅仅花了 20 年，机器人从爬行学会了两腿走路，成为直立机器人，而人类从爬行到直立花了上百万年。机器人已能用手使用工具，能看、听、用多种语言说话。它安心可靠地干最脏最累的活。据估计，现在全世界已有近 100 万个机器人在生产线上工作。有近万家工厂在生产机器人，销售额每年增长 20% 以上。机器人们正雄心勃勃，准备在 21 世纪进入服务业，当出租车司机，到医院里去当护士，到家庭去照顾老人，到银行里去当出纳。

如果微电子学再进一步，就可以把 IBM/6000SP 挤进它的脑袋里，运行 Deep Blue 软件，像 1997 年 5 月击败世界冠军 Gary Kasparov 那样，使世界象棋大师们望而生畏。Lsaac Asimov 曾设想“机器人有数学天才，能心算三重积分，做张量分析题目如同吃点心一样”，这些已不难做到。

20 世纪 60 年代出现过的恐惧以及反对自动化和机器人的社会心态已被证明是没有根据的。今天，一些应用机器人最多的国家失业率并没有明显升高，即使有，也没有人指责控制论科学家和工程师，那是金融家和政治家的过错。相反，智能技术广泛进入社会，有利于提高人民生活质量，提高劳动生产率，提高全社会的文化素质，创造更多的就业

① 这是国际自动控制联合会第十四届世界大会主席、全国政协副主席、中国工程院院长宋健院士在大会开幕式上所做学术报告《智能控制——超越世纪的目标》（1999 年 7 月 5 日，北京）的中译文摘录。

机会。

站在进入 21 世纪的门槛，回顾人类文明进步的近代史，如果说 19 世纪实现了社会体力劳动机械化，延伸了人的体力，那么 20 世纪的主要特征是实现了劳动生产自动化，极大地提高了社会劳动生产率，创造了比过去任何时期都多得多的社会财富，彻底改变了人类的生产和生活方式，提高了人们的生活质量，延长了人类的平均寿命。这完全是现代科学技术的功劳。我们可以感到骄傲的是，控制论科学家和工程师们为此做出了重要贡献。预计 21 世纪，自动化技术仍将是高技术前沿，继续是推进新技术革命的核心力量。制造业和服务业仍然是它取得辉煌成就的主要领域。

在生命科学和人工智能的推动下，控制理论和自动化领域出现了提高控制系统智能的强大趋势。1992 年成立了一个新学术团体——国际智能自动化联合会（International Federation on Intelligent Automation, IFIA），标志着智能控制研究已进入了科学前沿。对这门新学科今后的发展方向和道路已经取得了一些共识，可以列举以下诸点：

第一，研究和模仿人类智能是智能控制的最高目标。所以，人们把能自动识别和记忆信号（图像、语言、文字）、会学习、能推理、有自动决策能力的自动控制系统称为智能控制系统。

第二，智能控制必须靠多学科联合才能取得新的突破。生命科学和脑科学关于人体和脑功能机制的更深入的知识是不可缺少的。揭开生物界的进化机制以及生命系统中自组织能力、免疫能力和遗传能力的精确结构对建造智能控制系统极为重要。这主要是生物化学家和遗传学家的任务，但控制论科学家和工程师们能够为此做出贡献。

第三，智能的提高，不能全靠子系统的堆积。要做到“整体大于组分之一”，只靠非线性效应是不够的。智能越高，系统将越复杂。复杂巨系统的行为和结构必定是分层次的。子系统和整体的利益和谐统一是有机体得以生存发展的基本原则。每一个层次都有自己的新特征和状态描述，要建立每个层次能上下相容的结构和与周边友好的界面。统计力学中从分子热运动到气体宏观状态参数抽取是层次划分的范例，这就是物理学家们称之为“粗粒化”抽取（Coarse-graining extraction）的最好说明。

第四，世界一切生物进化都是逐步的，人类从新石器时代到机器化时代经历了一万年，从机械自动化到电子自动化仅花了 100 年。要做到智能自动化，把机器人的智商提高到智人水平，还需要数十年。这是科学技术进步不可逾越的过程。20 世纪后半叶，微电子学、生命科学、自动化技术突飞猛进，为 21 世纪实现智能控制和智能自动化创造了很好的起始条件。为达到此目标，不仅需要技术的进步，更需要科学思想和理论的突破。很

多科学家坚持认为，这需要发现新的原理，或者改造已知的物理学基本定理，才能彻底懂得和仿造人类的智能，才能设计和制造出具有高级智能的自动控制系统。无论如何，进程已经开始。可以设想，再过 50 年，第 31 次 IFAC 大会时，人类的生产效率比现在要提高 10 倍，不再有人挨饿。全世界老人都可以有一个机器人服务员，在身边帮助料理生活。每一个参加会议的人都可能在文件箱中带一个机器人秘书，就像现在的笔记本式计算机一样。

21 世纪对人类是一个特别重要的历史时期，世界人口将稳定在一个较高的水平上，例如 120 亿，比现在再翻一番。科学界要为保障人类和我们的家园——地球的生存和可持续发展做出必要的贡献，而控制论科学家和工程师应当承担主要任务。进一步发展和大力推广应用控制论和自动化技术，保证我们的后代在一个没有短缺、饥饿和污染的世界里生活得更幸福，是天赋我责。正如物理学家 Murroy Gellmann 所说，在可见的未来，包括人类在内的自然进化将让位于人类科学技术和文化的进步。Cybernetics 一词来自希腊文，原意为舵手，我们至少有资格成为舵手们的科学顾问和助手，对推动社会进步发挥更大作用，这是我们的光荣。

宋健

机器人学导论

前言

机器人学作为一门高度交叉的前沿学科，引起许多具有不同专业背景人们的广泛兴趣，并对其进行深入研究，使其获得了快速发展。自第一台电子编程工业机器人问世 50 多年来，机器人学已取得令人瞩目的成就。

本书介绍机器人学的基本原理及其应用，是一部比较系统和全面的机器人学导论性著作。全书共 10 章。第 1 章简述机器人学的起源与发展，讨论机器人的定义，分析机器人的特点、结构与分类，探讨机器人学与人工智能的关系和机器人学的研究领域。第 2 章讨论机器人学的数理基础，包括空间任意点的位置和姿态变换、坐标变换、齐次坐标变换、物体的变换和逆变换，以及通用旋转变换等。第 3 章阐述机器人运动方程的表示与求解，包括机械手运动姿态、方向角、运动位置和坐标的运动方程以及连杆变换矩阵的表示，欧拉变换、滚-仰-偏变换和球面变换等求解方法等。第 4 章涉及机器人动力学方程，着重分析机械手动力学方程的两种求法，即拉格朗日功能平衡法和牛顿-欧拉动态平衡法，然后总结出建立拉格朗日方程的步骤。第 5 章研究机器人的控制原则和控制方法，包括机器人的位置控制、力和位置混合控制、智能控制等。第 6 章介绍机器人传感器的特点与分类、各种典型的机器人内传感器和外传感器的工作原理。第 7 章讨论机器人轨迹规划问题，着重研究关节空间和笛卡儿空间中机器人运动的轨迹规划和轨迹生成方法。第 8 章概括地论述机器人的程序设计，研究对机器人编程的要求和分类、机器人语言系统的结构和基本功能、几种重要的专用机器人语言、机器人的离线编程，以及基于 MATLAB 的机器人学仿真等。第 9 章探讨机器人的应用问题，论述应用机器人必须考虑的因素和采用机器人的步骤，分析机器人的应用领域，介绍工业机器人的应用实例。第 10 章分析机器人学的现状，展望机器人学的未来，包括国内外机器人技术和市场的发展现状和预测、机器人技术的发展趋势等。

本书适合作为本科生教材，也适合从事机器人学研究、开发和应用的科技人员学习参考。

本书第 1 版由蔡自兴编著，第 2 版除蔡自兴外，谢斌参与了 3.1 节、3.2 节和 8.5 节的修订工作，江南大学李挺也参与了 3.1 节的修订工作。在本书编写和出版过程中，得到

众多领导、专家、教授、朋友和学生的热情鼓励和帮助。中国工程院宋健院士在IFAC大会开幕式上所做主题报告摘录，作为本书代序，是对本书作者和广大读者的极大支持和厚爱。在此特向有关领导、专家、合作者和广大读者致以衷心的感谢，此外，还要特别感谢部分国内外机器人学专著、教材和有关论文的作者们。

由于本书编写时间仓促，书中一定有不足之处，希望得到各位专家和广大读者的批评指正。

蔡自兴

2015年1月26日

于中南大学民主楼

目 录

代序

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 机器人学的发展 1

1.1.1 机器人的由来 1

1.1.2 机器人的定义 2

1.1.3 机器人学的进展 2

1.2 机器人的特点、结构与分类 4

1.2.1 机器人的主要特点 4

1.2.2 机器人系统的结构 4

1.2.3 机器人的自由度 5

1.2.4 机器人的分类 6

1.3 机器人学与人工智能 9

1.3.1 机器人学与人工智能的
关系 10

1.3.2 机器人学的研究领域 11

1.3.3 智能机器人 11

1.4 本书概要 12

1.5 本章小结 13

习题 14

第 2 章 数理基础 15

2.1 位置和姿态的表示 15

2.1.1 位置描述 15

2.1.2 方位描述 15

2.1.3 位姿描述 16

2.2 坐标变换 17

2.2.1 平移坐标变换 17

2.2.2 旋转坐标变换 17

2.3 齐次坐标变换 18

2.3.1 齐次变换 18

2.3.2 平移齐次坐标变换 20

2.3.3 旋转齐次坐标变换 21

2.4 物体的变换及逆变换 22

2.4.1 物体位置描述 22

2.4.2 齐次变换的逆变换 23

2.4.3 变换方程初步 25

2.5 通用旋转变换 26

2.5.1 通用旋转变换公式 26

2.5.2 等效转角与转轴 27

2.6 本章小结 28

习题 29

第 3 章 机器人运动学 31

3.1 机器人运动方程的表示 31

3.1.1 运动姿态和方向角 32

3.1.2 运动位置和坐标 34

3.1.3 连杆变换矩阵及其乘积 35

3.2 机械手运动方程的求解 38

3.2.1 欧拉变换解 38

3.2.2 滚、仰、偏变换解 41

3.2.3 球面变换解 42

3.3 PUMA 560 机器人运动方程 43

3.3.1 PUMA 560 运动分析 43

3.3.2 PUMA 560 运动综合 47

3.4 本章小结 50

习题	50	6.1.2 应用传感器时应考虑的 问题	114
第4章 机器人动力学	55	6.2 内传感器	115
4.1 刚体动力学	55	6.2.1 位移位置传感器	115
4.1.1 刚体的动能与位能	56	6.2.2 速度和加速度传感器 ...	119
4.1.2 动力学方程的两种求法 ...	58	6.2.3 力觉传感器	120
4.2 机械手动力学方程	62	6.3 外传感器	123
4.2.1 速度的计算	63	6.3.1 触觉传感器	123
4.2.2 动能和位能的计算	64	6.3.2 应力传感器	126
4.2.3 动力学方程的推导	67	6.3.3 接近度传感器	127
4.3 本章小结	68	6.3.4 其他外传感器	129
习题	69	6.4 机器人视觉装置	130
第5章 机器人控制	71	6.4.1 机器人眼	130
5.1 机器人的基本控制原则	71	6.4.2 视频信号数字变换器 ...	132
5.1.1 基本控制原则	71	6.4.3 固态视觉装置	133
5.1.2 伺服控制系统举例	74	6.4.4 激光雷达	136
5.2 机器人的位置控制	76	6.5 本章小结	137
5.2.1 直传动系统的建模	76	习题	137
5.2.2 位置控制的基本结构	79	第7章 机器人轨迹规划	139
5.2.3 单关节位置控制器	81	7.1 轨迹规划应考虑的问题	139
5.2.4 多关节位置控制器	88	7.2 关节轨迹的插值计算	140
5.3 机器人的力和位置混合控制	90	7.2.1 三次多项式插值	141
5.3.1 力和位置混合控制方案 ...	90	7.2.2 过路径点的三次多项式 插值	142
5.3.2 力和位置混合控制系统 控制规律的综合	92	7.2.3 高阶多项式插值	143
5.4 机器人的智能控制	96	7.2.4 用抛物线过渡的线性 插值	144
5.4.1 智能控制系统的分类	97	7.2.5 过路径点用抛物线过渡 的线性插值	145
5.4.2 机器人自适应模糊控制 ...	102	7.3 笛卡儿路径轨迹规划	146
5.4.3 多指灵巧手的神经控制 ...	105	7.4 规划轨迹的实时生成	152
5.5 本章小结	108	7.5 本章小结	154
习题	109	习题	155
第6章 机器人传感器	112	第8章 机器人编程	157
6.1 机器人传感器概述	112	8.1 机器人编程要求与语言类型 ...	157
6.1.1 机器人传感器的特点与 分类	112		

8.1.1 对机器人编程的要求	157	9.1.1 机器人的任务估计	178
8.1.2 机器人编程语言的类型	158	9.1.2 应用机器人三要素	179
8.2 机器人语言系统结构和基本功能	160	9.1.3 使用机器人的经验准则	179
8.2.1 机器人语言系统的结构	160	9.1.4 采用机器人的步骤	180
8.2.2 机器人编程语言的基本功能	160	9.2 机器人的应用领域	181
8.3 常用的机器人编程语言	162	9.2.1 工业机器人	181
8.3.1 VAL 语言	163	9.2.2 探索机器人	183
8.3.2 SIGLA 语言	163	9.2.3 服务机器人	184
8.3.3 IML 语言	164	9.2.4 军事机器人	186
8.3.4 AL 语言	164	9.3 工业机器人应用举例	187
8.4 机器人的离线编程	165	9.3.1 材料搬运机器人	187
8.4.1 机器人离线编程的特点和主要内容	165	9.3.2 焊接机器人	188
8.4.2 机器人离线编程系统的结构	167	9.3.3 喷漆机器人	190
8.5 基于 MATLAB 的机器人学仿真	170	9.4 本章小结	192
8.5.1 坐标变换	170	习题	193
8.5.2 构建机器人对象	171	第 10 章 机器人学展望	194
8.5.3 机器人运动学求解	173	10.1 机器人技术和市场的现状	194
8.5.4 轨迹规划	174	10.1.1 世界机器人发展现状	194
8.6 本章小结	175	10.1.2 国内机器人发展现状	196
习题	176	10.2 机器人技术的发展趋势	198
第 9 章 机器人应用	178	10.3 各国雄心勃勃的机器人发展计划	200
9.1 应用工业机器人必须考虑的因素	178	10.4 应用机器人引起的社会问题	201
		10.5 本章小结	203
		习题	204
		参考文献	205

绪 论

“机器人”已是家喻户晓的“大明星”，它正在迅速崛起，并对整个工业生产、太空和海洋探索以及人类生活的各方面产生越来越大的影响。但是，现实世界中的机器人，并不像普通人想象中那样完美。现有的机器人既不像神话和文艺作品所描写的那样智勇双全，也不如某些企业家和宣传家们所宣扬的那样多才多艺。

1.1 机器人学的发展

1.1.1 机器人的由来

人类长期以来存在一种愿望，即创造出一种像人一样的机器或“人造人”，以便能够代替人去进行各种工作。这就是“机器人”出现的思想基础。机器人的概念在人类的想象中已存在 3000 多年了，尽管直到 60 多年前，“机器人”才作为专有名词加以引用。

进入近代之后，人类关于发明各种机械工具和动力机器，协助甚至代替人们从事各种体力劳动的梦想更加强烈。18 世纪发明的蒸汽机开辟了利用机器动力代替人力的新纪元。随着动力机器的发明，出现了第一次工业和科学革命，各种自动机器、动力机和动力系统相继问世，机器人也开始由幻想时期转入自动机械时期，各种精巧的机器人玩具和工艺品应运而生。这些机器人玩具和工艺品的出现，标志着人类在机器人从梦想到现实这一漫长道路上，前进了一大步。进入 20 世纪之后，机器人已躁动于人类社会和经济的母胎之中，人们含有几分不安地期待着它的诞生。他们不知道即将问世的机器人将是个宠儿，还是个怪物。1920 年，捷克剧作家卡雷尔·凯培克在他的幻想情节剧《罗萨姆的万能机器人》中，第一次提出了“机器人”这个名词。1950 年，美国著名科学幻想小说家阿西摩夫在他的小说《我是机器人》中，提出了有名的“机器人三守则”：

- 1) 机器人必须不危害人类，也不允许它眼看人将受害而袖手旁观；
- 2) 机器人必须绝对服从于人类，除非这种服从有害于人类；
- 3) 机器人必须保护自身不受伤害，除非为了保护人类或者是为人类做出牺牲。

这三条守则，给机器人社会赋以新的伦理性，并使机器人概念通俗化，更易于为人类

社会所接受。

多连杆机构和数控机床的发展和应用为机器人技术打下重要基础。

美国人乔治·德沃尔于1954年设计了第一台可编电子程序的工业机器人，并于1961年发表了该项机器人专利。1962年，美国万能自动化(Unimation)公司的第一台机器人Unimate在美国通用汽车公司(GM)投入使用，这标志着第一代机器人的诞生。从此，机器人开始成为人类生活中的现实。

1.1.2 机器人的定义

国际上至今还没有合适的、为人们普遍同意的“机器人”定义，专家们采用不同的方法来定义这个术语。它的定义还因公众对机器人的想象以及科学幻想小说、电影和电视中对机器人形状的描绘而变得更为困难。为了规定技术、开发机器人新的工作能力和比较不同国家和公司的成果，就需要对机器人这一术语有某些共同的理解。各国对机器人有自己的定义。这些定义之间差别较大。

国际上，关于机器人的定义主要有如下几种：

1) 英国简明牛津字典的定义。机器人是“貌似人的自动机，具有智力的和顺从于人的但不具人格的机器”。

2) 美国机器人协会(RIA)的定义。机器人是“一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的，通过可程序动作来执行种种任务的，并具有编程能力的多功能机械手(manipulator)”。

3) 日本工业机器人协会(JIRA)的定义。工业机器人是“一种装备有记忆装置和末端执行器(end effector)的，能够转动并通过自动完成各种移动来代替人类劳动的通用机器”。

4) 美国国家标准局(NBS)的定义。机器人是“一种能够进行编程并在自动控制下执行某些操作和移动作业任务的机械装置”。

5) 国际标准组织(ISO)的定义。机器人是“一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能机械手，这种机械手具有几个轴，能够借助于可程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置，以执行种种任务”。

《中国大百科全书》对机器人的定义为：能灵活地完成特定的操作和运动任务，并可再编程的多功能操作器。而对机械手的定义为：一种模拟人手操作的自动机械，它可按固定程序抓取、搬运物件或操持工具完成某些特定操作。

上述各种定义有共同之处，即认为机器人：①像人或人的上肢，并能模仿人的动作；②具有智力或感觉与识别能力；③是人造的机器或机械电子装置。

1.1.3 机器人学的进展

从20世纪60年代初期到70年代初期，即第一台工业机器人问世后头十年，机器人技术的发展较为缓慢，许多研究单位和公司所做的努力均未获得成功。这一阶段的主要成果有

美国斯坦福国际研究所(SRI)于1968年研制的移动式智能机器人,夏凯(Shakey)和辛辛那提·米拉克龙(Cincinnati Milacron)公司于1973年制成的第一台适于投放市场的机器人T3等。

人工智能学界在20世纪70年代后开始对机器人产生浓厚兴趣。他们发现,机器人的出现与发展为人工智能的发展带来了新的生机,提供了一个很好的试验平台和应用场所,是人工智能可能取得重大进展的潜在领域。这一认识,很快为许多国家的科技界、产业界和政府有关部门所赞同。到了70年代中期,机器人技术进入了一个新的发展阶段。到70年代末期,工业机器人有了更大的发展。进入80年代后,机器人生产继续保持70年代后期的发展势头,机器人制造业成为发展最快和最好的经济部门之一。

到20世纪80年代后期,由于传统机器人用户应用工业机器人已趋饱和,从而造成工业机器人产品的积压,不少机器人厂家倒闭或被兼并,国际机器人学研究和机器人产业出现不景气现象。到90年代初,机器人产业出现复苏和继续发展迹象。但是,好景不长,1993~1994年又出现低谷。1995年以来,世界机器人数量逐年增加,增长率也较高。到2000年,服役机器人约100万台,机器人学也维持着较好的发展势头。

进入21世纪,工业机器人产业发展速度加快,年增长率达到30%左右。其中,亚洲工业机器人增长速度高达43%,最为突出。

据联合国欧洲经济委员会(UNECE)和国际机器人联合会(IFR)统计,全球工业机器人在1960~2006年年底累计安装175万多台,至2011年累计安装超过230万台。工业机器人市场前景看好。

近年来,全球机器人行业发展更为迅速,2007年全球机器人行业总销售量比2006年增长10%。现在全世界服役的工业机器人总数在100万台以上。此外,还有数百万服务机器人在运行。

根据IFR统计,2011年是工业机器人产业蓬勃发展的一年,全球市场同比增长37%。其中,中国市场的增幅最大,销售量达22 577台,较2010年增长50.7%;2012年达到26 902台,同比增长19.2%。到2015年,中国的工业机器人拥有量将达到十万台(套)。预测数据还表明,中国市场有望于2015年成为世界最大的机器人市场。

机器人的应用范围已遍及工业、科技和国防的各个领域。服务机器人的开发与应用更是引人注目。机器人技术的迅速发展,已对许多国家的工业生产、太空和海洋探索、国防以及整个国民经济和人民生活产生了重大影响,而且这种影响必将进一步扩大。当一种工业、技术和经济发生重大变化时,总是要求科学和教育系统发生与之相适应的调整和发展。

在我国,自1985年起已先后在几个全国一级学会内设立了机器人专业委员会,以组织和开展机器人学科的学术交流,促进机器人技术的发展,提高我国机器人学的学术水平和技术水平。机器人学这一新学科在我国也已经形成,并开展了经常性的研究和学术交流活动。

严格地说,目前在工业上运行的90%以上的机器人,都不具有智能。随着工业机器人数量的快速增长和工业生产的发展,对机器人的工作能力也提出更高的要求,特别是需要

各种具有不同程度智能的机器人和特种机器人。21 世纪的机器人智能将提高到更高的水平，值得关注。

1.2 机器人的特点、结构与分类

1.2.1 机器人的主要特点

机器人具有下列两个主要特征。

1. 通用性

机器人的通用性(versatility)取决于其几何特性和机械能力。通用性指的是执行不同的功能和完成多样的简单任务的实际能力。通用性也意味着，机器人具有可变的几何结构，即根据生产工作需要变更的几何结构；或者说，在机械结构上允许机器人执行不同的任务或以不同的方式完成同一工作。

2. 适应性

机器人的适应性(adaptivity)是指其对环境的自适应能力，即所设计的机器人能够自我执行未经完全指定的任务，而不管任务执行过程中所发生的没有预计到的环境变化。这一能力要求机器人认识其环境，即具有人工知觉。

1.2.2 机器人系统的结构

一般情况下，一个机器人系统由下列四个互相作用的部分组成：机械手、环境、任务和控制器，如图 1-1a 所示，图 1-1b 为其简化形式。

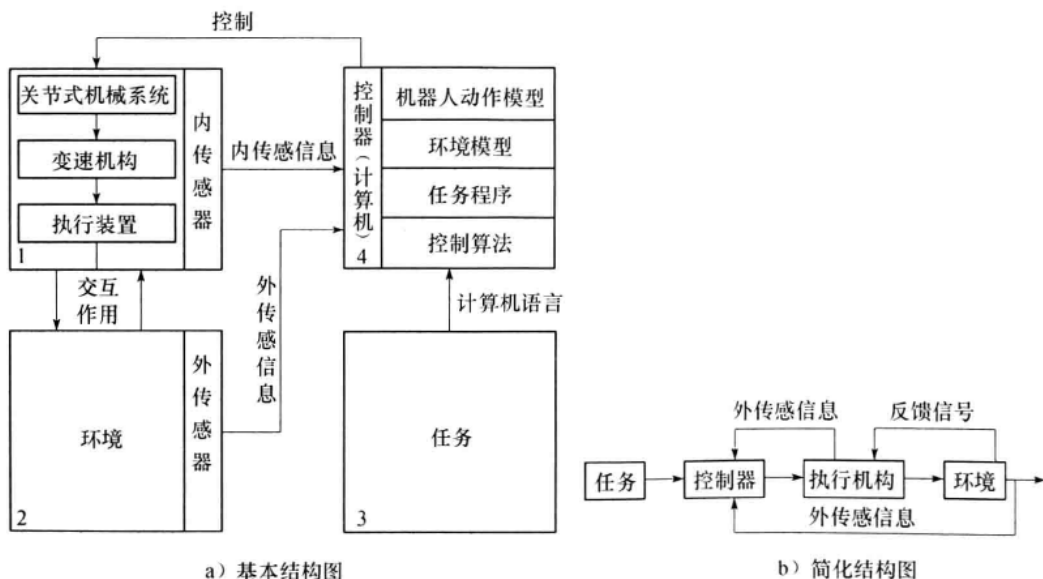


图 1-1 机器人系统的基本结构

机械手是具有传动执行装置的机械,它由臂、关节和末端执行装置(工具等)构成,组合为一个互相连接和互相依赖的运动机构。机械手用于执行指定的作业任务。不同的机械手具有不同的结构类型。图 1-2 给出机械手的几何结构简图。机械手又称为操作机、机械臂或操作手。大多数机械手是具有几个自由度的关节式机械结构,一般具有六个自由度。其中,头三个自由度引导夹手装置至所需位置,而后三个自由度用来决定末端执行装置的方向。

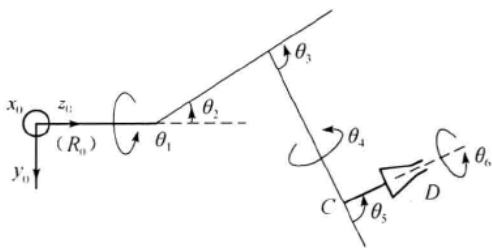


图 1-2 机械手的几何结构简图

环境指机器人所处的周围环境,它不仅由几何条件(可达空间)所决定,而且由环境和它所包含的每个事物的全部自然特性所决定。机器人的固有特性由这些自然特性及其环境间的互相作用所决定。在环境中,机器人会遇到一些障碍物和其他物体,它必须避免与这些障碍物发生碰撞,并对这些物体发生作用。环境信息一般是确定的和已知的,但在许多情况下,环境具有未知的和不确定的性质。

我们把任务定义为环境的两种状态(初始状态和目标状态)间的差别。必须用适当的程序设计语言来描述这些任务,并把它们存入机器人系统的控制计算机中去。

计算机是机器人的控制器或脑子。机器人接收来自传感器的信号,对之进行数据处理,并按照预存信息、机器人的状态及其环境情况等,产生出控制信号去驱动机器人的各个关节。

对于技术比较简单的机器人,计算机只含有固定程序;对于技术比较先进的机器人,可采用程序完全可编程的小型计算机、微型计算机或微处理机作为其电脑。具体说来,在计算机内存储有下列信息:

- 1) 机器人动作模型 表示执行装置在激发信号与机器人运动之间的关系。
- 2) 环境模型 描述机器人在可达空间内的每一个事物。
- 3) 任务程序 使计算机能够理解其所要执行的作业任务。
- 4) 控制算法 计算机指令的序列,它提供对机器人的控制。

1.2.3 机器人的自由度

自由度是机器人的一个重要技术指标,它是由机器人的结构决定的,并直接影响到机器人的机动性。

1. 刚体的自由度

物体上任何一点都与坐标轴的正交集有关。物体能够对坐标系进行独立运动的数目称为自由度(Degree of Freedom, DOF)。物体所能进行的运动包括(见图 1-3):

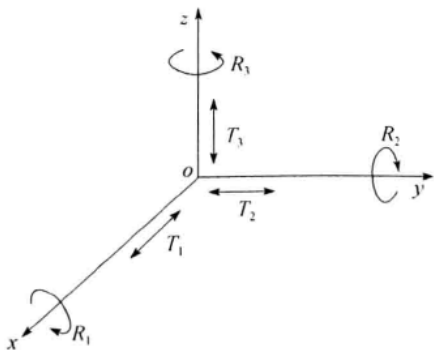


图 1-3 刚体的六个自由度

沿着坐标轴 ox 、 oy 和 oz 的三个平移运动 T_1 、 T_2 和 T_3 ;

绕着坐标轴 ox 、 oy 和 oz 的三个旋转运动 R_1 、 R_2 和 R_3 。

这意味着物体能够运用三个平移和三个旋转, 相对于坐标系进行定向和运动。

一个简单物体有六个自由度。当两个物体间确立起某种关系时, 每一物体就对另一物体失去一些自由度。这种关系也可以用两物体间由于建立连接关系而不能进行的移动或转动来表示。

2. 机器人的自由度

人们期望机器人能够以准确的方位把它的末端执行装置或与它连接的工具移动到给定点。如果机器人的用途是未知的, 那么它应当具有六个自由度。不过, 如果工具本身具有某种特别结构, 那么就可能不需要六个自由度。例如, 要把一个球放到空间某个给定位置, 有三个自由度就足够了。

一般情况下, 机器人机械手的手臂具有三个自由度, 其他的自由度数末端执行装置所具有。当要求某一机器人钻孔时, 其钻头必须转动。不过, 这一转动总是由外部的马达带动的, 因此, 不把它看作机器人的一个自由度。这同样适用于机器人的机械手。机械手的夹手应能开闭。不过, 也不能把夹手的这个开闭所用的自由度当作机器人的自由度之一, 因为这个自由度只对夹手的操作起作用。这一点是很重要的, 必须记住。

1.2.4 机器人的分类

机器人分类方法有很多种。这里首先介绍三种分类法, 即分别按机械手的几何结构、机器人的控制方式以及机器人控制器的信息输入方式来分。

1. 按机械手的几何结构来分

机器人机械手的机械配置形式多种多样。最常见的结构形式是用其坐标特性来描述的。这些坐标结构包括笛卡儿坐标结构、柱面坐标结构、极坐标结构、球面坐标结构和关节式球面坐标结构等。这里简单介绍三种最常见的柱面、球面和关节式球面坐标结构机器人。

(1) 柱面坐标机器人

柱面坐标机器人主要由垂直柱子、水平手臂(或机械手)和底座构成。水平机械手装在垂直柱子上, 能自由伸缩, 并可沿垂直柱子上下运动。垂直柱子安装在底座上, 并与水平机械手一起(作为一个部件)能在底座上移动。这样, 这种机器人的工作包迹(区间)就形成一段圆柱面, 如图 1-4 所示。因此, 把这

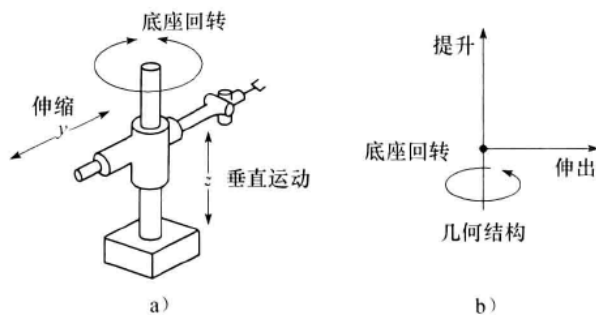


图 1-4 柱面坐标机器人

种机器人叫做柱面坐标机器人。

(2) 球面坐标机器人

这种机器人如图 1-5 所示。它像坦克的炮塔一样,机械手能够做里外伸缩移动、在垂直平面上垂直回转以及在水平平面上绕底座旋转。因此,这种机器人的工作包迹形成球面的一部分,并被称为球面坐标机器人。



图 1-5 球面坐标机器人

(3) 关节式球面坐标机器人

这种机器人主要由底座(或躯干)、上臂和前臂构成。上臂和前臂可在通过底座的垂直平面上运动,如图 1-6 所示。在前臂和上臂间,机械手有个肘关节;而在上臂和底座间,有个肩关节。在水平平面上的旋转运动,既可由肩关节进行,也可以绕底座旋转来实现。这种机器人的工作包迹形成球面的大部分,称为关节式球面机器人。

2. 按机器人的控制方式分

按照机器人的控制方式可把机器人分为非伺服机器人和伺服控制机器人两种。

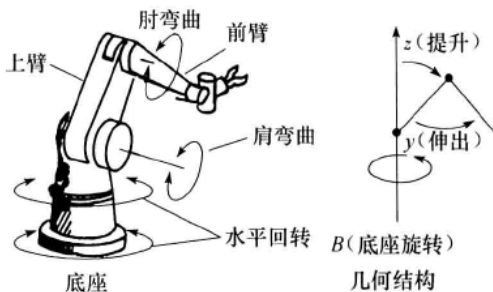


图 1-6 关节式球面机器人

(1) 非伺服机器人

非伺服机器人(non-servo robot)工作能力比较有限,它们往往涉及那些叫做“终点”、“抓放”或“开关”式机器人,尤其是“有限顺序”机器人。这种机器人按照预先编好的程序顺序进行工作,使用终端限位开关、制动器、插销板和定序器来控制机器人机械手的运动。其工作原理方块图如图 1-7 所示。图中,插销板用来预先规定机器人的工作顺序,而且往往是可调的。定序器是一种定序开关或步进装置,它能够按照预定的正确顺序接通驱动装置的能源。驱动装置接通能源后,就带动机器人的手臂、腕部和抓手等装置运动。当它们移动到由终端限位开关所规定的位置时,限位开关切换工作状态,送给定序器一个“工作任务(或规定运动)业已完成”的信号,并使终端制动器动作,切断驱动能源,使机械手停止运动。

(2) 伺服控制机器人

伺服控制机器人(servo-controlled robot)比非伺服机器人有更强的工作能力,因而价

格较贵,但在某些情况下不如简单的机器人可靠。图 1-8 表示伺服控制机器人的方块图。伺服系统的被控制量(输出)可为机器人端部执行装置(或工具)的位置、速度、加速度和力等。通过反馈传感器取得的反馈信号与来自给定装置(如给定电位器)的综合信号,用比较器加以比较后,得到误差信号,经过放大后用以激发机器人的驱动装置,进而带动末端执行装置以一定规律运动,到达规定的位置或速度等。显然,这就是一个反馈控制系统。

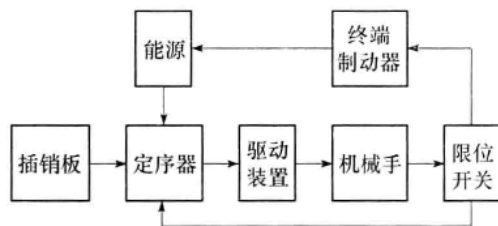


图 1-7 非伺服机器人方块图

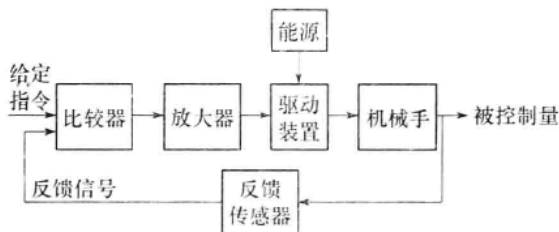


图 1-8 伺服控制机器人方块图

3. 按机器人控制器的信息输入方式分

在采用这种分类法进行分类时,不同国家也略有不同,但它们都有统一的标准。这里主要介绍日本工业机器人协会(JIRA)、美国机器人协会(RIA)和法国工业机器人协会(AFRI)所采用的分类法。

(1) JIRA 分类法

日本工业机器人协会把机器人分为六类:

第 1 类:手动操作手,是一种由操作人员直接进行操作的具有几个自由度的加工装置。

第 2 类:定序机器人,是按照预定的顺序、条件和位置,逐步地重复执行给定的作业任务的机械手,其预定信息(如工作步骤等)难以修改。

第 3 类:变序机器人,它与第 2 类一样,但其工作次序等信息易于修改。

第 4 类:复演式机器人,这种机器人能够按照记忆装置存储的信息来复现原先由人示教的动作。这些示教动作能够被自动地重复执行。

第 5 类:程控机器人,操作人员并不是对这种机器人进行手动示教,而是向机器人提供运动程序,使它执行给定的任务。其控制方式与数控机床一样。

第 6 类:智能机器人,它能够采用传感信息来独立检测其工作环境或工作条件的变化,并借助其自我决策能力,成功地进行相应的工作,而不管其执行任务的环境条件发生了什么变化。

(2) RIA 分类法

美国机器人协会把 JIRA 分类法中的后四种机器当作机器人。

(3) AFRI 分类法

法国工业机器人协会把机器人分为四种型号:

A 型:第 1 类,手控或遥控加工设备。

B 型：包括第 2 类和第 3 类，具有预编工作周期的自动加工设备。

C 型：含第 4 类和第 5 类，程序可编和伺服机器人，具有点位或连续路径轨迹，称为第一代机器人。

D 型：第 6 类，能获取一定的环境数据，称为第二代机器人。

此外，还可以有其他的分类方法，如下所述。

4. 按机器人的智能程度分

1) 一般机器人，不具有智能，只具有一般编程能力和操作功能。

2) 智能机器人，具有不同程度的智能，又可分为：

- 传感型机器人，具有利用传感信息(包括视觉、听觉、触觉、接近觉、力觉和红外、超声及激光等)进行传感信息处理，实现控制与操作。
- 交互型机器人，机器人通过计算机系统与操作员或程序员进行人一机对话，实现对机器人的控制与操作。
- 自立型机器人，在设计制作之后，机器人无须人的干预，能够在各种环境下自动完成各项拟人任务。

5. 按机器人的用途分

1) 工业机器人或产业机器人，应用在工农业生产中，主要应用在制造业部门，进行焊接、喷漆、装配、搬运、检验、农产品加工等作业。

2) 探索机器人，用于进行太空和海洋探索，也可用于地面和地下探险和探索。

3) 服务机器人，一种半自主或全自主工作的机器人，其所从事的服务工作可使人类生存得更好，使制造业以外的设备工作得更好。

4) 军事机器人，用于进攻性或防御性的军事目的。它又可分为空中军用机器人、海洋军用机器人和地面军用机器人，或简称为空军机器人、海军机器人和陆军机器人。

6. 按机器人移动性分

1) 固定式机器人，固定在某个底座上，整台机器人(或机械手)不能移动，只能移动各个关节。

2) 移动机器人，整个机器人可沿某个方向或任意方向移动。这种机器人又可分为轮式机器人、履带式机器人和步行机器人，其中后者又有单足、双足、四足、六足和八足行走机器人之分。

1.3 机器人学与人工智能

机器人学，特别是智能机器人，与人工智能有十分密切的关系。人工智能的近期目标在于研究智能计算机及其系统，以模仿和执行人类的某些智力功能，如判断、推理、理解、识别、规划、学习和其他问题求解。这一研究抓住了创造力的首要问题——人类智能。

1.3.1 机器人学与人工智能的关系

大多数机器人学的研究目前还是以控制理论的反馈概念为基础的。也就是说,迄今为止,机器人上的“智能”是由于应用反馈控制而产生的。但是,反馈控制技术本身并不是建立在人工智能技术基础上的,而是属于古典工程控制理论范畴的。

反馈控制有其局限性,因为数学(模型)及其实现有众多的强烈约束。而人工智能则有许多对环境和周围相关事物产生灵活响应的方法。按照古典控制理论,对事物的响应取决于经过数学化处理的输入,而人工智能技术可采用诸如自然语言、知识、算法和其他非数学符号的输入等。

一方面,机器人学的进一步发展需要人工智能基本原理的指导,并采用各种人工智能技术;另一方面,机器人学的出现与发展又为人工智能的发展带来了新的生机,产生了新的推动力,并提供了一个很好的试验与应用场所。也就是说,人工智能想在机器人学上找到实际应用,并使问题求解、搜索规划、知识表示和智能系统等基本理论得到进一步发展。

从人工智能已在机器人学方面进行的一些研究可以看出两者的密切关系。

1. 传感器信息处理

机器人学今后能够从人工智能方面得到多大现实好处,人们能够使机器人技术发展到什么程度,其关键之一是在传感器信息处理方面。机器人具有越来越强的获取周围信息的能力,包括视觉、触觉、力觉、嗅觉、味觉、听觉、接近感和光滑觉等。

2. 机器人规划

机器人学的研究促进了许多人工智能思想的发展。它所导致的一些技术可用来模拟世界的状态,用来描述从一种世界状态转变为另一种世界状态的过程。它对于怎样产生动作序列的规划以及怎样监督这些规划的执行有了一种较好的理解。复杂的机器人控制问题迫使我们发展一些方法,先在抽象和忽略细节的高层进行规划,然后再逐步在细节越来越重要的低层进行规划,这就是所谓机器人规划问题。

3. 专家系统

专家系统是一种智能计算机系统,它处理问题的能力达到人类专家的水平。有些未来的机器人系统是专家系统,它们将掌握极其大量的有关某个主题的知识,并对这些知识不断修正、改进与完善,机器人规划专家系统就是一例。

4. 自然语言理解

自然语言理解是人工智能最困难的课题之一,十多年来已取得长足进展。人工智能工作者一直在进行机器理解自然语言的研究。能够理解自然语言的程序,其关键在于:计算机内存包含一个由计算机和程序设计员两者共用的世界模型。需要处理的语言涉及计算机内部模型具有某些明确表示的物体、动作和关系。

1.3.2 机器人学的研究领域

机器人学有着极其广泛的研究和应用领域。这些领域体现出广泛的学科交叉，涉及众多的课题，如机器人体系结构、机构、控制、智能、传感、机器人装配、恶劣环境下的机器人以及机器人语言等。机器人已在工业、农业、商业、旅游业、空中和海洋以及国防等各种领域获得越来越普遍的应用。下面是一些比较重要的研究领域。

- 1) 传感器与感知系统
- 2) 驱动、建模与控制
- 3) 自动规划与调度
- 4) 机器人用计算机系统
- 5) 机器人应用研究
- 6) 其他机器人课题

1.3.3 智能机器人

尽管目前在工业上运行的 90% 以上的机器人都谈不上有什么智能，机器人执行的许多任务也根本不需要运用传感器，但是，随着机器人技术的迅速发展和自动化程度的进一步提高，对机器人的功能提出了更高的要求，特别是需要各种具有不同智能程度的机器人和机器人化装置。

最近 30 年已生产出一批具有传感装置(如视觉、触觉和听觉等)的机器人以及少数能够与环境进行“对话”的交互机器人(interactive robot)。这些机器人都属于智能机器人，它们能够执行一些过去无法解决的工作任务。

图 1-9 给出一种智能机器人系统的典型方框图。

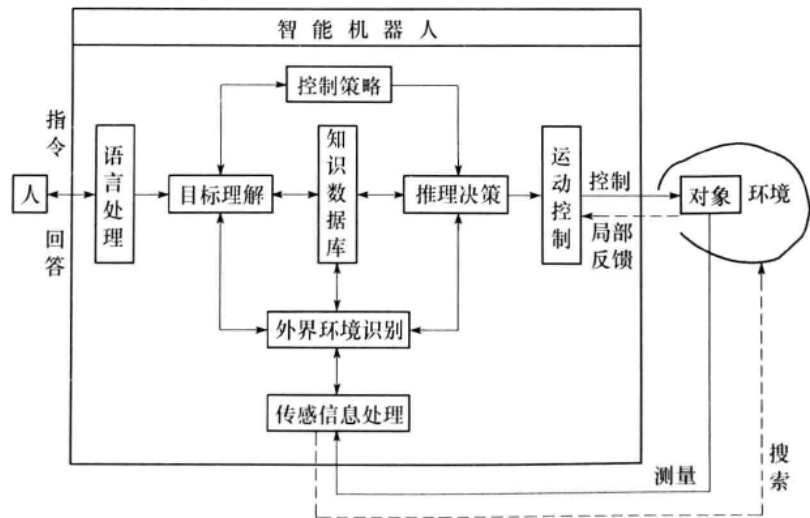


图 1-9 智能机器人系统的典型方框图

从图 1-9 可以看出,该智能机器人的控制系统主要由两部分组成,即以知识为基础的知识决策系统和信号识别与处理系统。前者涉及知识数据库与推理机,后者为各种信号的感测与处理器。这些信号可取自话筒的语音信号、来自压力传感器的触感信号、由电视摄像机拍下的景物图像,或环境中的其他信号,如光线、颜色、物体位置和运动速度等信息。

智能机器人已在自主系统和柔性加工系统等领域得到日益广泛的应用。自主机器人能够设定自己的目标,规划并执行自己的动作,使自己不断适应环境的变化。柔性加工系统由机器人工段(robotic work cell)或柔性工段组成。每个机器人工段能够完全自动地完成一系列操作、装卸、运输或加工。把机器人工段与其他工段相连接,就形成一个柔性组合式机器人生产系统,简称柔性加工系统。

1.4 本书概要

本书介绍机器人学的基本原理及其应用,是一部机器人学的导论性教材。除了讨论一般的原理外,还特别阐述一些新的方法与技术,并用一定篇幅叙述机器人学的应用以及发展趋势。本书包含下列具体内容:

1) 简述机器人学的起源与发展,讨论机器人学的定义,分析机器人的特点、结构与分类,探讨机器人学与人工智能的关系和机器人学的研究领域。这些内容将使读者对机器人学有个初步认识。

2) 讨论机器人学的数学基础,包括空间任意点的位置和姿态变换、坐标变换、齐次坐标变换、物体的变换和逆变换,以及通用旋转变换等。这些数学基础知识为后面有关各章研究机器人运动学、动力学和控制建模提供有力的数学工具。

3) 阐述机器人运动方程的表示与求解。包括机械手运动姿态、方向角、运动位置和坐标的表示,以及连杆变换矩阵的表示。对于运动方程的求解则讨论欧拉变换解、滚-仰-偏变换解和球面变换解等方法。这些内容是研究机器人动力学和控制所必不可少的基础。

4) 涉及机器人动力学方程、动态特性和静态特性,着重分析机械手动力学方程的两种求法,即拉格朗日功能平衡法和牛顿-欧拉动态平衡法,然后在分析二连杆机械手的基础上,总结出建立拉格朗日方程的步骤,并据之计算出机械手连杆上一点的速度、动能和位能,进而推导出四连杆机械手的动力学方程。机器人动力学问题的研究,对于快速运动的机器人及其控制具有特别重要的意义。

5) 研究机器人的控制原则和各种控制方法。这些方法包括机器人的位置伺服控制、力/混合控制和智能控制等。作为机器人智能控制的应用实例,介绍机器人自适应模糊控制和多指灵巧手的神经控制。这些例子提供了实际研究结果,说明各种相关智能控制方法

的有效性和适用性。

6) 分析机器人传感器的作用原理和应用。阐述机器人传感器的特点与分类以及机器人对环境自适应能力的要求。介绍机器人内传感器,包括位置(位移)传感器、速度传感器、加速度传感器和力觉传感器等。讨论机器人外传感器,涉及视觉传感器、触觉传感器、应力传感器和接近度传感器等。

7) 讨论机器人轨迹规划问题,它是在机械手运动学和动力学的基础上,研究关节空间和笛卡儿空间中机器人运动的轨迹规划和轨迹生成方法。在阐明轨迹规划应考虑的问题之后,着重讨论关节空间轨迹的插值计算方法和笛卡儿空间路径轨迹规划方法,并简单介绍规划轨迹的实时生成方法。

8) 比较概括地论述机器人的程序设计。机器人的程序设计即编程,是机器人运动和控制 的结合点,也是实现人与机器人通信的主要方法。首先研究对机器人编程的要求和分类;其次讨论机器人语言系统的结构和基本功能;接着介绍几种重要的专用机器人编程语言,如 VAL、SIGLA、IML 和 AL 语言等;然后讨论机器人离线编程的特点、主要内容和系统结构;最后介绍基于 MATLAB 的机器人学仿真工具。

9) 探讨机器人应用问题。首先论述应用机器人必须考虑的因素和采用机器人的步骤;然后分析机器人的应用领域,涉及工业机器人、探索机器人、服务机器人和军事机器人;最后介绍几个工业机器人的应用实例,包括材料搬运机器人、焊接机器人和喷漆机器人等。

10) 概括机器人学的现状,展望机器人学的未来,包括国际机器人技术和市场的发展现状及预测、国内机器人的发展现状、21 世纪机器人技术的发展趋势等。还探讨应用机器人引起的一些社会问题。这部分内容连贯过去、现在与未来,具有一定的探索性和前瞻性,值得探讨。

本书可作为本科生的机器人学教材,也可供从事机器人学研究、开发和应用的科技人员学习参考。

1.5 本章小结

作为本书的开篇,本章首先讨论机器人的由来、定义和发展。人类对机器人的幻想与追求已有 3000 多年历史,而第一台工业机器人的投产至今只有 50 多年。然而短短 50 年间,机器人从无到有,已经形成“百万大军”,成为人类社会的一个现实,并为经济发展和人类生活做出重要贡献。

至今对机器人尚无统一的定义。本章介绍了国际上关于机器人的几种主要定义,并归纳出这些定义的共同点。

机器人具有通用性和适应性的特点,这是它获得广泛应用的重要基础。我们可以把一

个机器人系统看作由机械手、环境、任务和控制器四个部分组成。

机器人的分类方法很多，我们分别按照机械手的几何结构、机器人的控制方式、机器人的信息输入方式、机器人的智能程度、机器人的用途以及机器人的移动性来讨论机器人的分类问题。

机器人学与人工智能有着十分密切的关系。机器人学的进一步发展需要人工智能基本原理和方法的指导；同时，机器人学的发展又为人工智能的发展带来新的生机，产生新的推动力，并提供一个良好的试验平台和应用场所。

机器人学有着十分广阔的研究领域，涉及传感器与感知系统、驱动与控制、自动规划、计算机系统以及应用研究等。

习 题

1. 国内外机器人技术的发展有何特点？
2. 请为工业机器人和智能机器人下个定义。
3. 什么是机器人的自由度？试举出一两种你知道的机器人的自由度数，并说明为什么需要这个数目。
4. 有哪几种机器人分类方法？是否还有其他的分类方法？
5. 试编写一个工业机器人大事年表(从1954年起，必要时可查阅有关文献)。
6. 机器人学与哪些学科有密切关系？机器人学及其发展将对这些学科产生什么影响？
7. 试编写一个图表，说明现有工业机器人的主要应用领域(如点焊、装配等)及其所占百分比。
8. 用一两句话定义下列术语：适应性、伺服控制、智能机器人、人工智能。
9. 什么叫做“机器人三守则”？它的重要意义是什么？
10. 人工智能与机器人学的关系是什么？有哪些人工智能技术已在机器人学上得到应用？哪些人工智能技术将在机器人学上获得应用？
11. 服务机器人已经得到日益广泛的应用。你对服务机器人的发展与应用有何建议？
12. 随着“智能制造”的逐步升级，工业机器人特别是智能机器人的应用受到了高度重视。你认为在制造业大量应用机器人应考虑和注意哪些问题？

数 理 基 础

机械手是机器人系统机械运动部分，它的执行机构是用来保证复杂空间运动的综合刚体，而且它自身也往往需要在机械加工或装配等过程中作为统一体进行运动。因此，需要一种描述单一刚体位移、速度和加速度以及动力学问题的有效而又方便的数学方法。本书将采用矩阵法来描述机器人机械手的运动学和动力学问题。这种数学描述是以四阶方阵变换三维空间点的齐次坐标为基础的，能够将运动、变换和映射与矩阵运算联系起来。

研究操作机器人的运动，不仅涉及机械手本身，而且涉及各物体间以及物体与机械手的关系。因此需要讨论的齐次坐标及其变换，用来表达这些关系。

2.1 位置和姿态的表示

需要用位置矢量、平面和坐标系等概念来描述物体(如零件、工具或机械手)间的关系。首先，让我们来建立这些概念及其表示法。

2.1.1 位置描述

一旦建立了一个坐标系，就能够用某个 3×1 位置矢量来确定该空间内任一点的位置。对于直角坐标系 $\{A\}$ ，空间任一点 p 的位置可用 3×1 的列矢量 ${}^A p$

$${}^A p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

表示。其中， p_x ， p_y ， p_z 是点 p 在坐标系 $\{A\}$ 中的三个坐标分量。 ${}^A p$ 的上标 A 代表参考坐标系 $\{A\}$ 。我们称 ${}^A p$ 为位置矢量，见图 2-1。

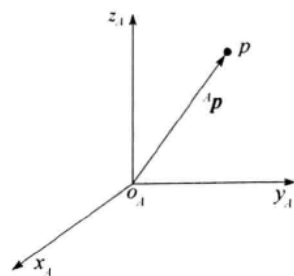


图 2-1 位置表示

2.1.2 方位描述

研究机器人的运动与操作，往往不仅要表示空间某个点的位置，而且需要表示物体的

方位(orientation)。物体的方位可由某个固接于此物体的坐标系描述。为了规定空间某刚体 B 的方位, 设置一直角坐标系 $\{B\}$ 与此刚体固接。用坐标系 $\{B\}$ 的三个单位主矢量 x_B, y_B, z_B 相对于参考坐标系 $\{A\}$ 的方向余弦组成的 3×3 矩阵。

$${}^A_B R = [{}^A x_B \quad {}^A y_B \quad {}^A z_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

来表示刚体 B 相对于坐标系 $\{A\}$ 的方位。 ${}^A_B R$ 称为旋转矩阵。式中, 上标 A 代表参考坐标系 $\{A\}$, 下标 B 代表被描述的坐标系 $\{B\}$ 。 ${}^A_B R$ 共有 9 个元素, 但只有 3 个是独立的。由于 ${}^A_B R$ 的三个列矢量 ${}^A x_B, {}^A y_B$ 和 ${}^A z_B$ 都是单位矢量, 且双双相互垂直, 因而它的 9 个元素满足 6 个约束条件(正交条件):

$${}^A x_B \cdot {}^A x_B = {}^A y_B \cdot {}^A y_B = {}^A z_B \cdot {}^A z_B = 1 \quad (2.3)$$

$${}^A x_B \cdot {}^A y_B = {}^A y_B \cdot {}^A z_B = {}^A z_B \cdot {}^A x_B = 0 \quad (2.4)$$

可见, 旋转矩阵 ${}^A_B R$ 是正交的, 并且满足条件

$${}^A_B R^{-1} = {}^A_B R^T; \quad |{}^A_B R| = 1 \quad (2.5)$$

式中, 上标 T 表示转置; $|\cdot|$ 为行列式符号。

对应于轴 x, y 或 z 作转角为 θ 的旋转变换, 其旋转矩阵分别为:

$$R(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

式中, s 表示 \sin , c 表示 \cos 。以后将一律采用此约定。

图 2-2 表示一物体(这里为抓手)的方位。此物体与坐标系 $\{B\}$ 固接, 并相对于参考坐标系 $\{A\}$ 运动。

2.1.3 位姿描述

上面我们已经讨论了采用位置矢量描述点的位置, 而用旋转矩阵描述物体的方位。要完全描述刚体 B 在空间的位姿(位置和姿态), 通常将物体 B 与某一坐标系 $\{B\}$ 相固接。 $\{B\}$ 的坐标原点一般选在物体 B 的特征点上, 如质心等。相对参考系

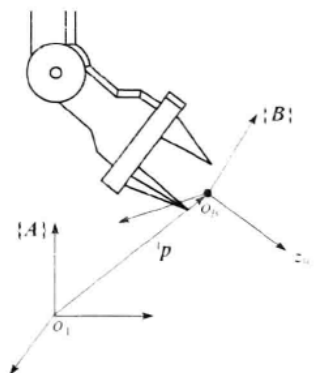


图 2-2 方位表示

$\{A\}$ ，坐标系 $\{B\}$ 的原点位置和坐标轴的方位，分别由位置矢量 ${}^A p_{B_0}$ 和旋转矩阵 ${}^A_B R$ 描述。这样，刚体 B 的位姿可由坐标系 $\{B\}$ 来描述，即有

$$\{B\} = \{{}^A_B R \quad {}^A p_{B_0}\} \quad (2.9)$$

当表示位置时，式(2.9)中的旋转矩阵 ${}^A_B R = I$ (单位矩阵)；当表示方位时，式(2.9)中的位置矢量 ${}^A p_{B_0} = o$ 。

2.2 坐标变换

空间中任意点 p 在不同坐标系中的描述是不同的。为了阐明从一个坐标系的描述到另一个坐标系的描述关系，需要讨论这种变换的数学问题。

2.2.1 平移坐标变换

设坐标系 $\{B\}$ 与 $\{A\}$ 具有相同的方位，但 $\{B\}$ 坐标系的原点与 $\{A\}$ 的原点不重合。用位置矢量 ${}^A p_{B_0}$ 描述它相对于 $\{A\}$ 的位置，如图 2-3 所示。称 ${}^A p_{B_0}$ 为 $\{B\}$ 相对于 $\{A\}$ 的平移矢量。如果点 p 在坐标系 $\{B\}$ 中的位置为 ${}^B p$ ，那么它相对于坐标系 $\{A\}$ 的位置矢量 ${}^A p$ 可由矢量相加得出，即

$${}^A p = {}^B p + {}^A p_{B_0} \quad (2.10)$$

上式称为坐标平移方程。

2.2.2 旋转坐标变换

设坐标系 $\{B\}$ 与 $\{A\}$ 有共同的坐标原点，但两者的方位不同，如图 2-4 所示。用旋转矩阵 ${}^A_B R$ 描述 $\{B\}$ 相对于 $\{A\}$ 的方位。同一点 p 在两个坐标系 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 中的描述 ${}^A p$ 和 ${}^B p$ 具有如下变换关系：

$${}^A p = {}^A_B R {}^B p \quad (2.11)$$

上式称为坐标旋转方程。

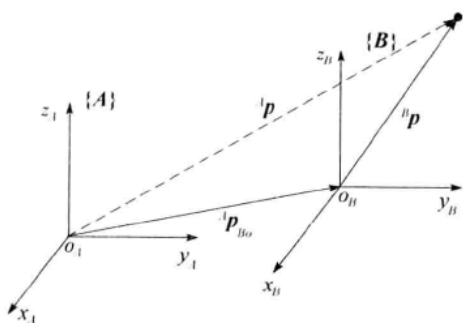


图 2-3 平移变换

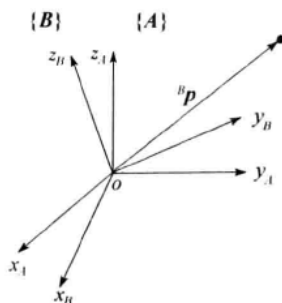


图 2-4 旋转变换

我们可以类似地用 ${}^B_A R$ 描述坐标系 $\{A\}$ 相对于 $\{B\}$ 的方位。 ${}^A_B R$ 和 ${}^B_A R$ 都是正交矩阵，两

者互逆。根据正交矩阵的性质(2.5)可得:

$${}^A_R = {}^A_B R^{-1} = {}^A_B R^T \quad (2.12)$$

对于最一般的情形:坐标系 $\{B\}$ 的原点与 $\{A\}$ 的原点既不重合, $\{B\}$ 的方位与 $\{A\}$ 的方位也不相同。用位置矢量 ${}^A p_{B_0}$ 描述 $\{B\}$ 的坐标原点相对于 $\{A\}$ 的位置;用旋转矩阵 ${}^A_B R$ 描述 $\{B\}$ 相对于 $\{A\}$ 的方位,如图2-5所示。对于任一点 p 在两坐标系 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 中的描述 ${}^A p$ 和 ${}^B p$ 具有以下变换关系:

$${}^A p = {}^A_B R {}^B p + {}^A p_{B_0} \quad (2.13)$$

可把上式看成坐标旋转和坐标平移的复合变换。实际上,规定一个过渡坐标系 $\{C\}$,使 $\{C\}$ 的坐标原点与 $\{B\}$ 的原点重合,而 $\{C\}$ 的方位与 $\{A\}$ 的相同。据式(2.11)可得向过渡坐标系的变换:

$${}^C p = {}^C_B R {}^B p = {}^A_B R {}^B p$$

再由式(2.10),可得复合变换:

$${}^A p = {}^C p + {}^A p_{C_0} = {}^A_B R {}^B p + {}^A p_{B_0}$$

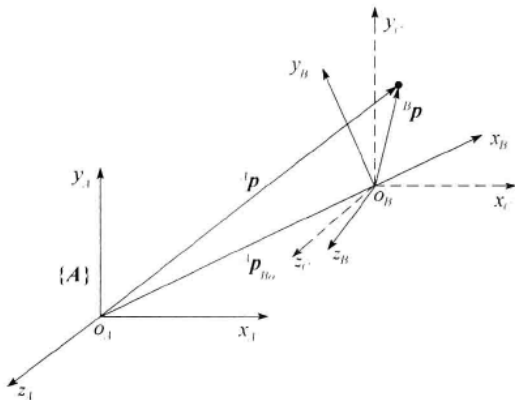


图2-5 复合变换

例2.1 已知坐标系 $\{B\}$ 的初始位姿与 $\{A\}$ 重合,首先 $\{B\}$ 相对于坐标系 $\{A\}$ 的 z_A 轴转 30° ,再沿 $\{A\}$ 的 x_A 轴移动12单位,并沿 $\{A\}$ 的 y_A 轴移动6单位。求位置矢量 ${}^A p_{B_0}$ 和旋转矩阵 ${}^A_B R$ 。假设点 p 在坐标系 $\{B\}$ 的描述为 ${}^B p = [3, 7, 0]^T$,求它在坐标系 $\{A\}$ 中的描述 ${}^A p$ 。

据式(2.8)和式(2.1),可得 ${}^A_B R$ 和 ${}^A p_{B_0}$ 分别为:

$${}^A_B R = R(z, 30^\circ) = \begin{bmatrix} c30^\circ & -s30^\circ & 0 \\ s30^\circ & c30^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.866 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^A p_{B_0} = \begin{bmatrix} 12 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

由式(2.13),则得:

$${}^A p = {}^A_B R {}^B p + {}^A p_{B_0} = \begin{bmatrix} -0.902 \\ 7.562 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 12 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.098 \\ 13.562 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.3 齐次坐标变换

已知一直角坐标系中的某点坐标,那么该点在另一直角坐标系中的坐标可通过齐次坐标变换求得。

2.3.1 齐次变换

变换式(2.13)对于点 ${}^B p$ 而言是非齐次的,但是可以将其表示成等价的齐次变换形式:

$$\begin{bmatrix} {}^A p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^A p_{B_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

其中, 4×1 的列向量表示三维空间的点, 称为点的齐次坐标, 仍然记为 ${}^A p$ 或 ${}^B p$ 。可把上式写成矩阵形式:

$${}^A p = {}^A_B T {}^B p \quad (2.15)$$

式中, 齐次坐标 ${}^A p$ 和 ${}^B p$ 是 4×1 的列矢量, 与式(2.13)中的维数不同, 加入了第 4 个元素 1。齐次变换矩阵 ${}^A_B T$ 是 4×4 的方阵, 具有如下形式:

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^A p_{B_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

${}^A_B T$ 综合地表示了平移变换和旋转变换。变换式(2.13)和式(2.14)是等价的, 实质上, 式(2.14)可写成:

$${}^A p = {}^A_B R {}^B p + {}^A p_{B_0}; \quad 1 = 1$$

位置矢量 ${}^A p$ 和 ${}^B p$ 到底是 3×1 的直角坐标还是 4×1 的齐次坐标, 要根据上下文关系而定。

例 2.2 试用齐次变换方法求解例 2.1 中的 ${}^A p$ 。

由例 2.1 求得的旋转矩阵 ${}^A_B R$ 和位置矢量 ${}^A p_{B_0}$, 可以得到齐次变换矩阵:

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^A p_{B_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0 & 12 \\ 0.5 & 0.866 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

代入齐次变换式(2.15)得:

$${}^A p = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0 & 12 \\ 0.5 & 0.866 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ 7 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.098 \\ 13.562 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

即为用齐次坐标描述的点 p 的位置。

至此, 我们可得空间某点 p 的直角坐标描述和齐次坐标描述分别为:

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ wz \\ w \end{bmatrix}$$

式中, w 为非零常数, 是一坐标比例系数。 ■

坐标原点的矢量, 即零矢量表示为 $[0, 0, 0, 1]^T$ 。矢量 $[0, 0, 0, 1]^T$ 是没有定义的。具有形如 $[a, b, c, 0]^T$ 的矢量表示无限远矢量, 用来表示方向, 即用 $[1, 0, 0, 0]$, $[0, 1, 0, 0]$, $[0, 0, 1, 0]$ 分别表示 x , y 和 z 轴的方向。