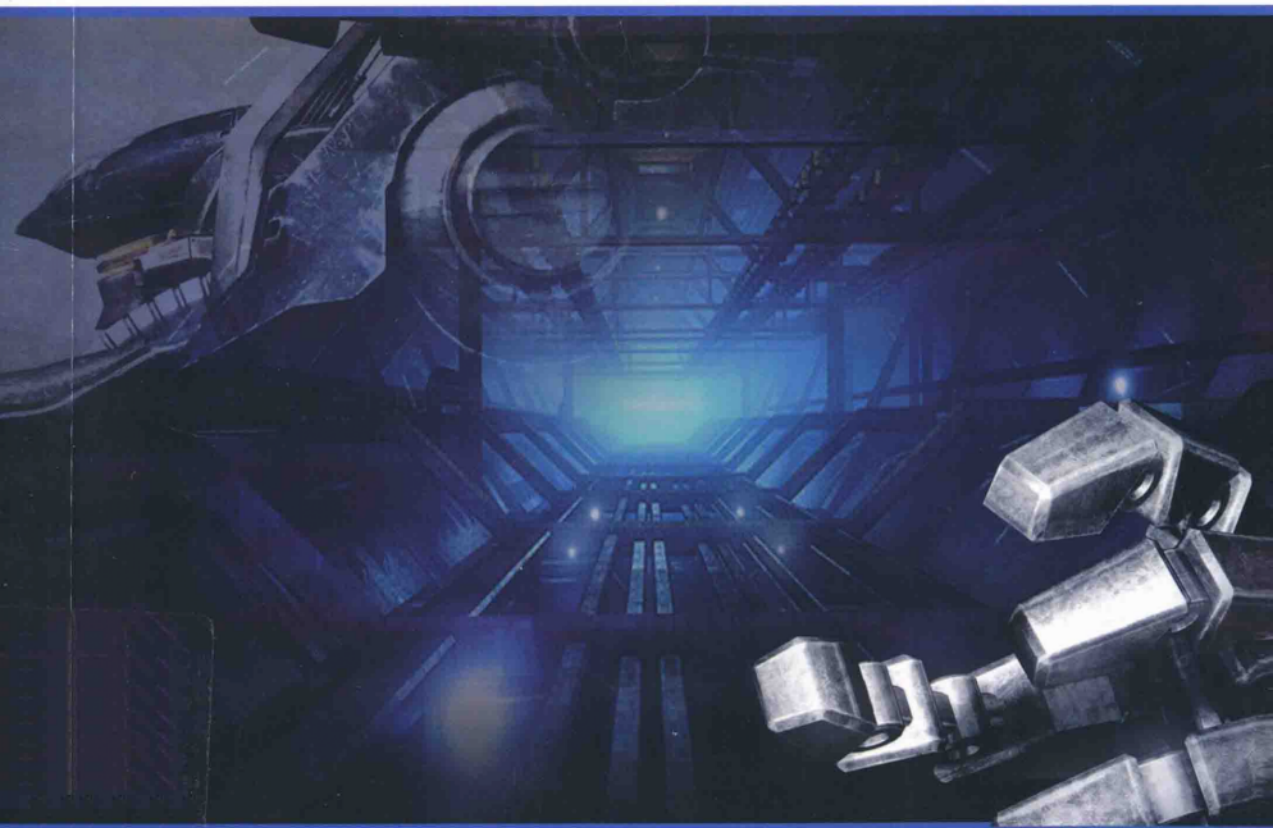


机器人学基础

Fundamentals of Robotics

蔡自兴 编著



机械工业出版社
China Machine Press



**为采用的教师
提供教辅资源**

下载网址: <http://www.hzbook.com>
教学支持: 010-68353079, 88378995

“智能科学基

及
材

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，主要内容包括：机器人学的起源与发展、机器人学的数学基础、机器人运动方程的表示与求解、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、机器人应用等。



蔡自兴

1962年毕业于西安交通大学电机工程系。现任中南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师、学位委员会主席。1983-1985年为美国普度大学和内华达大学访问学者，1988-1990年任中国科学院自动化研究所和北京大学信息科学中心客座研究员，1992-1993年任美国伦塞勒工业大学客座教授。2004年4-7月为俄罗斯科学院圣彼得堡信息学与自动化研究所客座研究员。2007年5-8月任丹麦技术大学客座教授。他曾被联合国工业发展组织(UNIDO)确认为联合国专家，是国际导航与运动控制科学院院士、纽约科学院院士、首届教育部高校国家级教学名师。

作者曾任第八届湖南省政协副主席，全国政协第九、十届委员会委员，并任中国人工智能学会副理事长及智能机器人专业委员会主任、中国自动化学会理事、中国计算机学会模式识别与人工智能专业委员会委员、《智能系统学报》编委会副主任，《机器人》等杂志编委，国防科技大学、北京航空航天大学、北京邮电大学等校兼职教授。

作者主要从事智能系统、人工智能、智能控制、智能机器人研究，是我国智能控制、人工智能、机器人学诸学科的学术带头人之一，被誉为“中国智能控制的奠基者”和“中国人工智能教学第一人”。已在国内外发表论文600余篇，出版教材和专著30多部。

投稿热线: (010) 88379604
购书热线: (010) 68995259, 68995264
读者信箱: hzjsj@hzbook.com

华章网站 <http://www.hzbook.com>

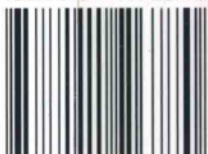
网上购书: www.china-pub.com

封面设计 范华明



上架指导: 机器人学

ISBN 978-7-111-26770-



9 787111 267706

定价: 23.00元

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

机器人学基础

Fundamentals of Robotics

蔡自兴 编著



机械工业出版社
China Machine Press

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应用。全书共 10 章，主要内容包括机器人学的起源与发展、机器人学的数学基础、机器人运动方程的表示与求解、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、机器人的程序设计、机器人的应用等。

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

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人学基础/蔡自兴编著. —北京: 机械工业出版社, 2009. 5
(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)

ISBN 978-7-111-26770-6

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 (2009) 第 068324 号

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: 王 璐

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2011 年 3 月第 1 版第 2 次印刷

184mm × 260mm 1/16 · 11.25 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-26770-6

定价: 23.00 元

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换
本社购书热线: (010) 68326294

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10000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年美国科学家们研制的探路者号（Pathfinder）小车胜利地完成了火星表面的实地探测，是本世纪自动化技术最高成就之一。

机器人学的进步和应用是本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年代出现过的恐惧和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

^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作学术报告的摘录（1999年7月5日，北京）。

(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之为智能控制系统。

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、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1万年。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，为下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夹中带一个机器人秘书，就像现在的电子笔记本一样。

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须的贡献，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，保证未来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 Gell-mann 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。

宇健

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,对其进行深入研究,并使其获得快速发展。自第一台电子编程工业机器人问世以来近 50 年间,机器人学已取得令人瞩目的成就。正如宋健教授 1999 年 7 月 5 日在国际自动控制联合会第十四届世界大会报告中所指出的:“机器人学的进步和应用是本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。”

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,讨论机器人学的意义,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、机器人学的研究领域和人工智能争论对机器人学的影响。第 2 章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。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,包括机器人的位置伺服控制、力和位置混合控制和智能控制等。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 章比较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,以及机器人的离线编程等。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、21 世纪机器人技术的发展趋势等。

本书适合作为本科生教材。本书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。

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。赖旭芝、唐璠、谢斌、陈白帆、魏世勇等参加了本书部分章节的讨论、编写及校对工作。全国政协副主席、中国工程院首任院长宋健院士在国际自动控制联合会第十四届世界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。这些都使作者深受鼓舞。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。

我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,他们是陈恳、J J Craig、封锡盛、K S Fu、霍伟、蒋新松、A J Kovio、罗公亮、N J Nilsson、G N Saridis、B. Niku Saeed、宋健、孙迪生、孙增圻、王田苗、王炎、熊有伦、张伯鹏、张启先、张钟俊等。

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

2009 年 5 月 17 日

于中南大学

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10000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年美国科学家们研制的探路者号（Pathfinder）小车胜利地完成了火星表面的实地探测，是本世纪自动化技术最高成就之一。

机器人学的进步和应用是本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年代出现过的恐惧和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

^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作学术报告的摘录（1999年7月5日，北京）。

(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之为智能控制系统。

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、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“整体大于组分之和”，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1万年。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，为下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中带一个机器人秘书，就像现在的电子笔记本一样。

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，保证未来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Murray Gell-mann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。

宇健

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	1
1.1.3 机器人学的进展	2
1.2 机器人的特点、结构与分类	3
1.2.1 机器人的主要特点	3
1.2.2 机器人系统的结构	3
1.2.3 机器人的自由度	4
1.2.4 机器人的分类	5
1.3 机器人学与人工智能	8
1.3.1 机器人学与人工智能的关系	8
1.3.2 机器人学的研究领域	9
1.3.3 智能机器人	9
1.3.4 人工智能的争论及其对机器人学的 影响	10
1.4 本书概要	12
1.5 小结	13
习题	13
第2章 数学基础	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	16
2.2.1 平移坐标变换	16
2.2.2 旋转坐标变换	17
2.3 齐次坐标变换	17
2.3.1 齐次变换	18
2.3.2 平移齐次坐标变换	19
2.3.3 旋转齐次坐标变换	19

2.4 物体的变换及逆变换	21
2.4.1 物体位置描述	21
2.4.2 齐次变换的逆变换	22
2.4.3 变换方程初步	23
2.5 通用旋转变换	24
2.5.1 通用旋转变换公式	24
2.5.2 等效转角与转轴	25
2.6 小结	26
习题	26
第3章 机器人运动学	29
3.1 机器人运动方程的表示	29
3.1.1 运动姿态和方向角	29
3.1.2 运动位置和坐标	31
3.1.3 连杆变换矩阵及其乘积	33
3.2 机械手运动方程的求解	36
3.2.1 欧拉变换解	36
3.2.2 滚、仰、偏变换解	39
3.2.3 球面变换解	39
3.3 PUMA 560 机器人运动方程	40
3.3.1 PUMA 560 运动分析	40
3.3.2 PUMA 560 运动综合	44
3.4 小结	46
习题	47
第4章 机器人动力学	51
4.1 刚体动力学	51
4.1.1 刚体的动能与位能	51
4.1.2 动力学方程的两种求法	53
4.2 机械手动力学方程	57
4.2.1 速度的计算	58
4.2.2 动能和位能的计算	59
4.2.3 动力学方程的推导	61
4.3 机械手动力学方程实例	62
4.4 小结	64
习题	65

第5章 机器人控制	67	7.2 关节轨迹的插值计算	125
5.1 机器人的基本控制原则	67	7.2.1 三次多项式插值	125
5.1.1 基本控制原则	67	7.2.2 过路径点的三次多项式插值	126
5.1.2 伺服控制系统举例	69	7.2.3 高阶多项式插值	127
5.2 机器人的位置控制	71	7.2.4 用抛物线过渡的线性插值	128
5.2.1 直流传动系统的建模	71	7.2.5 过路径点用抛物线过渡的线性插值	128
5.2.2 位置控制的基本结构	73	7.3 笛卡儿路径轨迹规划	130
5.2.3 单关节位置控制器	75	7.4 规划轨迹的实时生成	134
5.2.4 多关节位置控制器	81	7.5 小结	137
5.3 机器人的力和位置混合控制	83	习题	137
5.3.1 力和位置混合控制方案	83	第8章 机器人编程	139
5.3.2 力和位置混合控制系统控制规律的综合	85	8.1 机器人编程要求与语言类型	139
5.4 机器人的智能控制	88	8.1.1 对机器人编程的要求	139
5.4.1 智能控制系统的分类	88	8.1.2 机器人编程语言的类型	140
5.4.2 机器人自适应模糊控制	93	8.2 机器人语言系统结构和基本功能	141
5.4.3 多指灵巧手的神经控制	96	8.2.1 机器人语言系统的结构	141
5.5 小结	99	8.2.2 机器人编程语言的基本功能	142
习题	99	8.3 常用的机器人编程语言	143
第6章 机器人传感器	102	8.3.1 VAL语言	143
6.1 机器人传感器概述	102	8.3.2 SIGLA语言	144
6.1.1 机器人传感器的特点与分类	102	8.3.3 IML语言	145
6.1.2 应用传感器时应考虑的问题	103	8.3.4 AL语言	145
6.2 内传感器	104	8.4 机器人的离线编程	146
6.2.1 位移位置传感器	104	8.4.1 机器人离线编程的特点和主要内容	146
6.2.2 速度和加速度传感器	107	8.4.2 机器人离线编程系统的结构	147
6.2.3 力觉传感器	109	8.5 小结	150
6.3 外传感器	111	习题	150
6.3.1 触觉传感器	111	第9章 机器人应用	152
6.3.2 应力传感器	113	9.1 应用工业机器人必须考虑的因素	152
6.3.3 接近度传感器	114	9.1.1 机器人的任务估计	152
6.3.4 其他外传感器	116	9.1.2 应用机器人三要素	152
6.4 机器人视觉装置	117	9.1.3 使用机器人的经验准则	153
6.4.1 机器人眼	117	9.1.4 采用机器人的步骤	153
6.4.2 视频信号数字变换器	118	9.2 机器人的应用领域	154
6.4.3 固态视觉装置	120	9.2.1 工业机器人	154
6.5 小结	122	9.2.2 探索机器人	155
习题	122	9.2.3 服务机器人	156
第7章 机器人轨迹规划	124	9.2.4 军事机器人	156
7.1 轨迹规划应考虑的问题	124		

VIII

9.3 工业机器人应用举例	157	10.1.1 世界机器人发展现状	163
9.3.1 材料搬运机器人	157	10.1.2 国内机器人的发展现状	163
9.3.2 焊接机器人	158	10.2 21世纪机器人技术的发展趋势	165
9.3.3 喷漆机器人	160	10.3 应用机器人引起的社会问题	167
9.4 小结	161	10.4 小结	168
习题	162	习题	168
第10章 机器人学展望	163	参考文献	169
10.1 机器人技术和市场的现状	163		

第1章 绪 论

“机器人”已是家喻户晓的“大明星”，它迅速崛起，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，并不像普通人们想象的那样完美。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三千多年了，尽管直到40多年前，“机器人”才作为专有名词加以引用。

随着第一次工业和科学革命的进行，各种自动机器、动力机和动力系统的不断问世，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和为人们普遍同意的“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,通过可编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,能够借助于可编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”。

我国对于机器人尚无统一的定义。随着机器人技术的发展,我国也面临讨论和制定关于机器人技术的各项标准问题,其中包括对机器人的定义。我们可以参考各国的定义,结合我国情况,对机器人做出统一的定义。

上述各种定义有共同之处,即认为机器人是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,使国际机器人学研究和机器人产业出现不景气。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世纪以来,国际机器人产业处于比较稳定的发展阶段。

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。知识经济促进了对机器人的需求和机器人工业的迅速发展,为机器人学的建立奠定了基础。

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世纪的机器人智能水平,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。通用性指的是某种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。

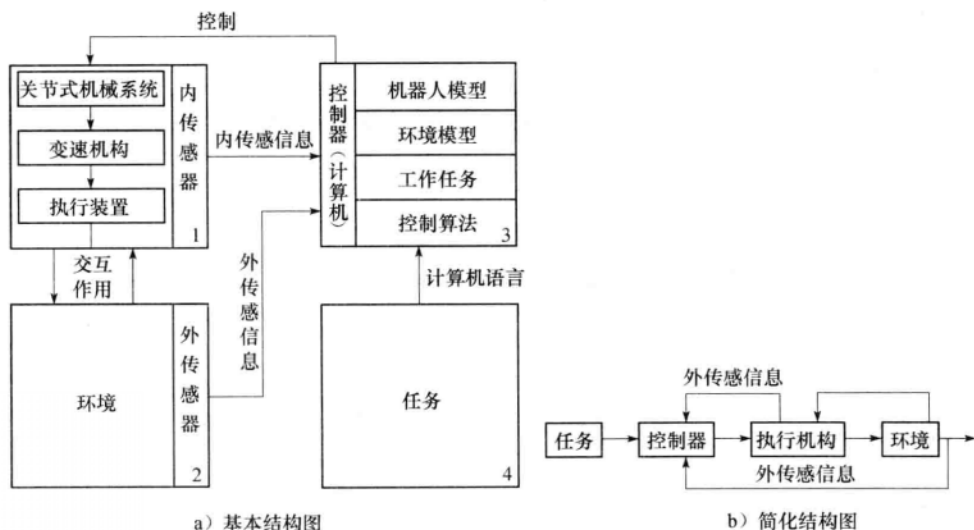


图 1-1 机器人系统的基本结构

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。

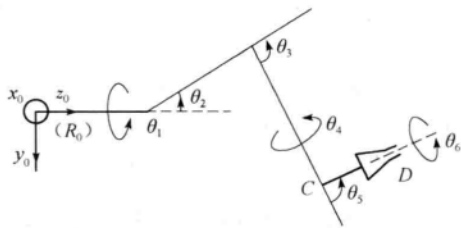


图 1-2 机械手的几何结构简图

环境即指机器人所处的周围环境。环境不仅由几何条件(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的。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见图 1-3，即：

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

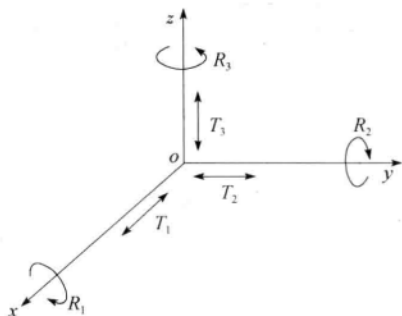


图 1-3 刚体的六个自由度

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，其他的自由度数为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。这里简单介绍柱面、球面和关节式球面坐标结构三种最常见的机器人。

(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，把这种机器人叫做柱面坐标机器人。

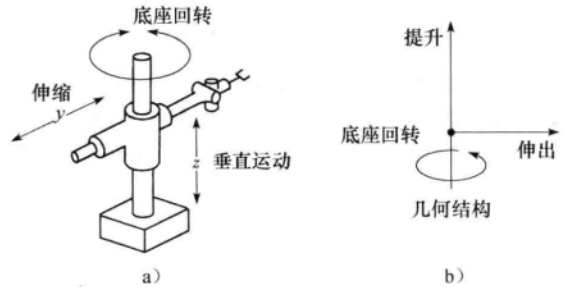


图 1-4 柱面坐标机器人

(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、在垂直平面上摆动以及在水平面上绕底座转动。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。

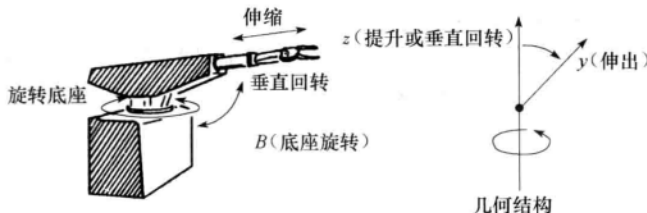


图 1-5 球面坐标机器人