

蔡自兴

# 机器人学

ROBOTICS

# ROBOTICS



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



00024924

TP24  
19

# 机 器 人 学

## ROBOTICS

蔡 自 兴

清 华 大 学 出 版 社

(京)新登字 158 号

### 内 容 提 要

本书介绍机器人学的基本原理及其应用,是一部机器人学的通用教材和系统著作,全面反映出国内外机器人学研究应用的最新进展。全书共10章:第一章叙述机器人学的概况;第二章讨论机器人学的数学基础;第三章阐述机器人运动方程的表示与求解;第四章涉及机器人动力学方程、动态特性和静态特性;第五章和第六章研究机器人的控制原则和控制方法;第七章讨论机器人规划问题;第八章概述机器人的程序设计;第九章探讨机器人的应用问题;第十章分析机器人学的现状,并展望机器人学的未来。

本书特别适合作为本科生和研究生的机器人学教材,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。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

#### 图书在版编目(CIP)数据

机器人学/蔡自兴. —北京:清华大学出版社,2000  
ISBN 7-302-03950-X

I. 机… II. 蔡… III. 机器人学 IV. TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 34500 号

2236/01

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:787×1092 1/16 印张:27 字数:621千字

版次:2000年9月第1版 2000年9月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-03950-X/TP·2312

印数:0001~6000

定价:49.00元(精装)

38.00元(平装)

# 机器人学——自动化的辉煌篇章

## 代 序

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6000m~10000m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,能听,能用多种语言说话。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月击败世界冠军卡斯帕罗夫(Gary Kasparov)那样,使国际象棋大师们望而生畏。阿西莫夫(Isaac Asimov)曾设想的“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”,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,有利于提高人民的生活质量,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,智能自动化国际联合会(IFIA, International

---

这是国际自动控制联合会(IFAC)第14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《智能控制——超越世纪的目标》(1999年7月5日,北京)的摘录。

Federation on Intelligent Automation),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,只有发现新的原理,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届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。正如物理学家格尔曼(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

# 序

机器人的诞生和机器人学的建立,无疑是20世纪人类科学技术的重大成就。不到40年时间,机器人从无到有,现在已拥有“百万大军”,在世界经济各个领域和人民生活的众多方面忠诚地为人类服务,作出不可磨灭的贡献。展望21世纪,人类更需要机器人的和谐共处,更离不开机器人这类得力助手和可靠朋友。

早在机器人学孕育于它的社会和经济母胎时,人类在期待机器人诞生的同时就存有几分不安。随着机器人技术的巨大进步,人们已适应了与机器人的共处。然而,仍然有些人对智能机器人的发展表示担忧。实践将再次证明,这种担心也是不必要的。无论机器人的智能如何发展,它都是人类创造出来的成果,人类是这些智能机器人的真正主人。我们一定有办法让机器人继续为人类造福,而不是造反,服务于人类,而不是统治人类。这就是我们进入21世纪时对待机器人的应有心态。

我国的机器人学研究开发工作虽然起步较晚,但在国家有关部门的支持和广大机器人学科技和教育工作者的努力下,进展较快,已在工业机器人、特种机器人和智能机器人各个方面取得明显成绩,为我国机器人学的进一步发展奠定良好的基础。其中,国家高技术发展计划智能机器人主题的研究更是令人瞩目,成果层出。国内已在一些学会内成立了机器人或智能机器人的二级学会,经常召开全国性的机器人学研讨会或学术会议,而且出版了一批机器人学的专著、教材和参考书。尤其值得一提的是,由中国自动化学会、中国机械工程学会、中国汽车工程学会、中国电子学会、中国宇航学会、中国人工智能学会、国家863计划智能机器人主题专家组、国家863计划空间机器人主题专家组以及中国机器人工程协会等9个单位主办的中国机器人学术大会,自1987年以来,每2~3年召开一次,已进行5次,并即将在今年10月举行第六届盛会——中国2000年机器人学大会。我衷心地预祝大会圆满成功,为推动我国机器人学的发展做出新的贡献。

在21世纪,中国的机器人学必将有更大的发展和更广泛的应用。中国的机器人市场必将走向世界,与国际市场实现一体化,在国际上占有一席之地。

随着国内外机器人学的快速发展,国内许多大学开设了机器人学课程,一些关于机器人学的教材、著作也应运而生。12年前,在国内急需机器人学教材的时候,一本名为《机器人原理及其应用》的著作出版了;这是国内第一部智能机器人基础的系统著作与教材。此书后被选入《中国优秀科技图书要览》。这本书曾被国内广泛采用,成为许多从事机器人学研究、教学和应用的科教工作者的教材或重要参考书。此书也给我留下深刻而良好的印象。十分巧合的是,此书的作者和中国2000年机器人学大会主席正好是一个人,而且也是《机器人学》这部新著的作者、中国智能机器人学会理事长、中南工业大学教授、我校兼职教授蔡自兴先生。他的勤奋、敬业、开拓和奉献精神令人钦佩,20年来一直热恋着他钟爱

的中国机器人事业,并为之作出公认的显著贡献。

《机器人学》包括机器人学的概况、数学基础、运动学、动力学、控制、规划、编程、应用和展望等,内容非常丰富,系统安排确当,理论联系实际,反映出国内外机器人学研究和应用的最新进展,可读性好,是一部不可多得的高水平机器人学著作。书中有不少内容是作者自己的研究成果和他对机器人学发展的创见。例如,机器人控制、机器人规划、机器人应用和机器人展望等章的内容都颇有新意。我相信,本书的出版必将为我国机器人学的教育和发展、机器人技术的推广和应用发挥重要的促进作用。

张启先

2000年5月16日于北京

# 前 言

面对 21 世纪知识经济时代的机遇与挑战,人类(地球人)正在以非凡的智慧构思新世纪的蓝图。世界的明天将更加美好。但是,地球人在发展中也面临着环境、人口、资源、战争和贫困等普遍问题,同时还要学会与机器人共处,探索外星人的踪迹,以及担忧克隆人的降临。无论是机器人,外星人还是克隆人问题,无疑都是 21 世纪地球人必须正视和处理的紧要问题,都是影响地球人生存和发展的休戚与共的重大事件。

本书既不谈论外星人是否存在,也不涉及地球人改天换地,只在最后略谈克隆人对智能机器人的挑战问题。本书专门讨论机器人问题,一个与地球人的物质文明生活和精神文明生活有密切关系的问题。

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(包括机械学、生物学、人类学、计算机科学与工程、控制论与控制工程学、电子工程学、人工智能、社会学等)人们的广泛兴趣,进行深入研究,并获快速发展。自第一台电子编程工业机器人问世以来的近 40 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 14 届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。”在新千年伊始和世纪之交的时候,希望本书能够对我国机器人学的进一步发展有所促进,并以此书献给所有为中国机器人学的发展作出贡献的炎黄子孙,献给一切关心机器人学和对机器人学感兴趣的朋友们,献给中国 2000 年机器人学大会。

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著作。除了讨论机器人学的一般原理外,还特别阐述一些新的机器人技术与方法,并用不少篇幅叙述机器人学的应用以及发展趋势和对策。全书共 10 章,涉及机器人学的概况、数理基础、运动学、动力学、控制、规划、编程、应用和展望等内容。第一章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、机器人学的研究领域和人工智能争论对机器人学的影响。第二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。第三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,机器人微分运动及其雅可比矩阵等。第四章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;然后总结出建立拉格朗日方程的步骤。第五章和第六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、柔顺控制、分解运动控制、变结构控制、自适应控制和智能控制等。第七章讨论机器人规划问题,在说明机器人规划的作用和任务之后,从积木世界的机器人规划入手,逐步深入开展对机器人规划的讨论,包括规则演绎法、逻辑演算和通用搜索法、具有学习能力的规划和基于专家系统的规划



等;还介绍了机器人轨迹规划问题。第八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。第九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。第十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、我国新世纪机器人学的发展战略等,并提出克隆技术对智能机器人的挑战问题。每章均附有习题,供教师选用和学生练习。书末附有英汉术语对照,有助于学生阅读机器人学的英文文献。

本书特别适合作为本科生和研究生教材。当作为本科生教材时,建议删去部分章节。当作为研究生教材时,教师可补充一些反映最新研究进展的学术论文和专题研究资料。本书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。

由于机器人的传动、传感和视觉等内容已有专著介绍,加上篇幅所限,本书对这些内容不作介绍,请予理解。

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。不少大学的有关教授来函,希望能够编写一部比较通用的机器人学教材;许多学生因得不到比较合适的机器人学教材而着急和期待。特别值得提到的是,清华大学出版社领导为本书开了绿灯,迅速立项;全国政协副主席、中国工程院院长宋健教授在百忙中来信勉励把《机器人学》写好,并同意将他在国际自动控制联合会(IFAC)第14届世界大会上的报告摘录,作为本书的代序;中国工程院院士、北京航空航天大学张启先教授不辞辛劳为本书作序。这些都使作者深受鼓舞。在此特向有关领导、专家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,他们是陈佩云, J J Craig, A A Desrecher, K S Fu, 龚振邦, 洪炳熔, T C Hsia, A J Kovio, C S G Lee, 李卫平, J L Y Luh, 卢桂章, 罗公亮, 马香峰, R M Murray, R P Paul, G N Saridis, 宋健, 孙迪生, 孙增圻, 谈大龙, 王炎, 熊有伦, 张伯鹏, 张良起, 张启先, 张钟俊, 赵锡芳, 周远清和宗光华等。他们的作品或与他们的讨论为本书提供了一些新观点和新材料,使本书作者得到启发,能够集机器人学各家之长,比较全面地反映国内外机器人学各个领域研究的最新进展。

由于作者知识与见识有限,加上成稿时间仓促,因而书中难免存在不当之处,诚望各位专家和广大读者批评指正。

秦自兴

2000年8月18日

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	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.....	3
1.2 机器人的特点、结构与分类.....	7
1.2.1 机器人的主要特点.....	7
1.2.2 机器人系统的结构.....	8
1.2.3 机器人的自由度 .....	10
1.2.4 机器人的分类 .....	12
1.3 机器人学与人工智能.....	16
1.3.1 机器人学与人工智能的关系 .....	16
1.3.2 机器人学的研究领域 .....	18
1.3.3 智能机器人 .....	20
1.3.4 人工智能的争论及其对机器人学的影响 .....	21
1.4 本书概要.....	26
1.5 小结.....	27
习题 .....	28
<b>第二章 数学基础</b> .....	29
2.1 位置和姿态的表示.....	29
2.2 坐标变换.....	31
2.3 齐次坐标变换.....	32
2.4 物体的变换及逆变换.....	37
2.5 通用旋转变换.....	40
2.6 小结.....	42
习题 .....	43
<b>第三章 机器人运动学</b> .....	46
3.1 机器人运动方程的表示.....	46
3.1.1 运动姿态和方向角 .....	47
3.1.2 运动位置和坐标 .....	49
3.1.3 连杆变换矩阵及其乘积 .....	51

3.2	机械手运动方程的求解	54
3.2.1	欧拉变换解	54
3.2.2	滚、仰、偏变换解	57
3.2.3	球面变换解	58
3.3	PUMA 560 机器人运动方程	59
3.3.1	PUMA 560 运动分析	59
3.3.2	PUMA 560 运动综合	63
3.4	机器人的雅可比公式	66
3.4.1	机器人的微分运动	66
3.4.2	机器人的雅可比矩阵	74
3.4.3	机器人雅可比矩阵计算实例	78
3.5	小结	82
	习题	83
<b>第四章 机器人动力学</b>		<b>89</b>
4.1	刚体动力学	89
4.1.1	刚体的动能与位能	90
4.1.2	动力学方程的两种求法	92
4.2	机械手动力学方程	97
4.2.1	速度的计算	97
4.2.2	动能和位能的计算	98
4.2.3	动力学方程的推导	101
4.2.4	动力学方程的简化	103
4.3	机械手动力学方程实例	106
4.3.1	二连杆机械手动力学方程	106
4.3.2	三连杆机械手的速度和加速度方程	108
4.4	机器人的动态特性	115
4.4.1	动态特性概述	115
4.4.2	稳定性	116
4.4.3	空间分辨率	117
4.4.4	精度	118
4.4.5	重复性	120
4.5	机械手的稳态负荷	121
4.5.1	静力和静力矩的表示	122
4.5.2	不同坐标系间静力的变换	122
4.5.3	关节力矩的确定	124
4.5.4	负荷质量的确定	125
4.6	小结	126

习题	126
<b>第五章 机器人控制(一)</b>	<b>131</b>
5.1 机器人的基本控制原则	131
5.1.1 基本控制原则	131
5.1.2 伺服控制系统举例	135
5.2 机器人的位置控制	139
5.2.1 直流传动系统的建模	139
5.2.2 位置控制的基本结构	143
5.2.3 单关节位置控制器	144
5.2.4 多关节位置控制器	151
5.3 机器人的柔顺控制	154
5.3.1 柔顺运动的基本概念	154
5.3.2 主动阻抗控制	158
5.3.3 力和位置混合控制	162
5.3.4 柔顺运动的位移和力混合控制	168
5.4 机器人的分解运动控制	170
5.4.1 分解运动控制原理	170
5.4.2 分解运动速度控制	173
5.4.3 分解运动加速度控制	174
5.4.4 分解运动动力控制	176
5.5 小结	178
习题	178
<b>第六章 机器人控制(二)</b>	<b>181</b>
6.1 机器人的变结构控制	181
6.1.1 变结构控制的基本原理	181
6.1.2 机器人的滑模变结构控制	183
6.1.3 机器人滑模变结构控制示例	186
6.2 机器人的自适应控制	189
6.2.1 控制系统的状态模型和主要结构	190
6.2.2 机器人模型参考自适应控制器	192
6.2.3 机器人自校正自适应控制器	194
6.2.4 机器人线性摄动自适应控制器	196
6.3 机器人的智能控制	197
6.3.1 智能控制的基本概念	198
6.3.2 智能控制系统的分类	204
6.3.3 智能机器人递阶装配系统	211

6.3.4	机器人自适应模糊控制	214
6.3.5	多指灵巧手的神经控制	218
6.3.6	移动机器人自主导航的进化控制	222
6.4	小结	227
	习题	228
<b>第七章</b>	<b>机器人规划</b>	<b>230</b>
7.1	机器人规划的作用与任务	230
7.1.1	规划的作用与问题分解途径	230
7.1.2	机器人规划系统的任务与方法	233
7.2	积木世界的机器人规划	237
7.2.1	积木世界的机器人问题	237
7.2.2	用F规则求解规划序列	238
7.3	STRIPS规划系统	241
7.3.1	STRIPS系统的组成	241
7.3.2	STRIPS系统规划过程	241
7.3.3	含有多重解答的规划	244
7.4	具有学习能力的规划系统	247
7.4.1	PULP-I系统的结构与操作方式	248
7.4.2	PULP-I的世界模型和规划结果	249
7.5	基于专家系统的机器人规划	251
7.5.1	系统结构和规划机理	251
7.5.2	ROPES机器人规划系统	253
7.6	太空构件装配顺序分层规划系统	260
7.6.1	太空构件装配及其分层顺序规划	260
7.6.2	三维结构装配顺序规划示例	264
7.7	机器人轨迹规划	265
7.7.1	轨迹规划应考虑的问题	265
7.7.2	关节轨迹的插值计算	266
7.7.3	笛卡儿路径轨迹规划	272
7.7.4	规划轨迹的实时生成	277
7.8	小结	280
	习题	280
<b>第八章</b>	<b>机器人编程</b>	<b>283</b>
8.1	机器人编程要求与语言类型	283
8.1.1	对机器人编程的要求	284
8.1.2	机器人编程语言的类型	288

8.2	机器人语言系统结构和基本功能 .....	291
8.2.1	机器人语言系统的结构 .....	291
8.2.2	机器人编程语言的基本功能 .....	292
8.3	常用的机器人编程语言 .....	294
8.3.1	VAL 语言 .....	295
8.3.2	SIGLA 语言 .....	298
8.3.3	IML 语言 .....	299
8.3.4	AL 语言 .....	301
8.4	机器人的离线编程 .....	301
8.4.1	机器人离线编程的特点和主要内容 .....	302
8.4.2	机器人离线编程系统的结构 .....	303
8.4.3	机器人离线编程仿真系统 HOLLSS .....	307
8.5	小结 .....	310
	习题 .....	311
<b>第九章</b>	<b>机器人应用 .....</b>	<b>314</b>
9.1	应用工业机器人必须考虑的因素 .....	314
9.1.1	机器人的任务估计 .....	314
9.1.2	应用机器人三要素 .....	315
9.1.3	使用机器人的经验准则 .....	318
9.1.4	采用机器人的步骤 .....	319
9.2	机器人的应用领域 .....	320
9.2.1	工业机器人 .....	320
9.2.2	探索机器人 .....	322
9.2.3	服务机器人 .....	327
9.2.4	军事机器人 .....	329
9.3	工业机器人应用举例 .....	333
9.3.1	材料搬运机器人 .....	333
9.3.2	焊接机器人 .....	335
9.3.3	喷漆机器人 .....	337
9.3.4	装配机器人 .....	340
9.4	小结 .....	344
	习题 .....	345
<b>第十章</b>	<b>机器人学展望 .....</b>	<b>346</b>
10.1	机器人技术和市场的现状 .....	346
10.1.1	国际机器人的发展现状及预测 .....	346
10.1.2	国内机器人的发展现状 .....	351

10.2	21 世纪机器人技术的发展趋势 .....	357
10.3	我国机器人学的发展战略 .....	362
10.4	应用机器人引起的社会问题 .....	366
10.5	克隆技术对智能机器人的挑战 .....	368
10.6	小结 .....	371
	习题 .....	373
	<b>参考文献</b> .....	<b>374</b>
	<b>英汉对照术语表</b> .....	<b>391</b>

# CONTENTS

**Foreword**

**Preface**

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Robotics Development .....	1
1.1.1 Origin of the Robot .....	1
1.1.2 Definition of the Robot .....	2
1.1.3 Advances in Robotics .....	3
1.2 Characteristic Properties, Structure and Classification of Robots .....	7
1.2.1 Basic Characteristics of Robots .....	7
1.2.2 Structure of a Robot System .....	8
1.2.3 Degrees of Freedom of Robots .....	10
1.2.4 Classification of Robots .....	12
1.3 Robotics and Artificial Intelligence .....	16
1.3.1 Relationship between Robotics and AI .....	16
1.3.2 Major Research Topics for Robots .....	18
1.3.3 Intelligent Robots .....	20
1.3.4 Argument of AI and Its Effects on Robotics .....	21
1.4 Outline of the Book .....	26
1.5 Summary .....	27
Exercises .....	28
<b>Chapter 2 Mathematical Fundamentals</b> .....	29
2.1 Representation of Position and Attitude .....	29
2.2 Coordinate Transformation .....	31
2.3 Homogeneous Transformation of the Coordinate Frames .....	32
2.4 Transformation and Inverse Transformation of Object .....	37
2.5 General Rotation Transformation .....	40
2.6 Summary .....	42
Exercises .....	43
<b>Chapter 3 Kinematics of Robots</b> .....	46
3.1 Representation of the Kinematic Equation of Robot Manipulator .....	46
3.1.1 Kinematic Pose and Oriented Angle .....	47
3.1.2 Kinematic Position and Coordinate .....	49
3.1.3 T-Matrix and A-Matrix .....	51



3.2	Solving Kinematic Equations of Robot Manipulators .....	54
3.2.1	Solution of the Euler Transformation .....	54
3.2.2	Solution of Roll, Pitch and Yaw .....	57
3.2.3	Solution of Spherical Coordinate Transformation .....	58
3.3	Kinematic Equation of PUMA 560 .....	59
3.3.1	Motion Analysis of PUMA 560 .....	59
3.3.2	Motion Synthesis of PUMA 560 .....	63
3.4	Jacobian of Robot Manipulator .....	66
3.4.1	Differential Motion of Robot .....	66
3.4.2	Jacobian Matrix of Robot .....	74
3.4.3	Computational Example of Robot Jacobian .....	78
3.5	Summary .....	82
	Exercises .....	83
 <b>Chapter 4 Dynamics of Robot Manipulator .....</b>		<b>89</b>
4.1	Dynamics of a Rigid Body .....	89
4.1.1	Kinetic and Potential Energy of a Rigid Body .....	90
4.1.2	Two Solutions for Dynamic Equation .....	92
4.2	Dynamic Equation of Robot Manipulator .....	97
4.2.1	Computing the Velocity .....	97
4.2.2	Computing the Kinetic and Potential Energy .....	98
4.2.3	Forming the Dynamic Equation .....	101
4.2.4	Simplifying the Dynamic Equation .....	103
4.3	Examples of Dynamic Equation of Manipulators .....	106
4.3.1	Dynamic Equation of Two-Link Manipulator .....	106
4.3.2	Dynamic Equation of Three-Link Manipulator .....	108
4.4	Dynamic Properties of Robots .....	115
4.4.1	Introduction to Dynamic Performance .....	115
4.4.2	Stability .....	116
4.4.3	Spatial Resolution .....	117
4.4.4	Accuracy .....	118
4.4.5	Repeatability .....	120
4.5	Statics of Manipulators .....	121
4.5.1	Representation of Static Forces and Moments .....	122
4.5.2	Transformation of Forces between Coordinate Frames .....	122
4.5.3	Determination of Joint Torques .....	124
4.5.4	Determination of Load Mass .....	125
4.6	Summary .....	126