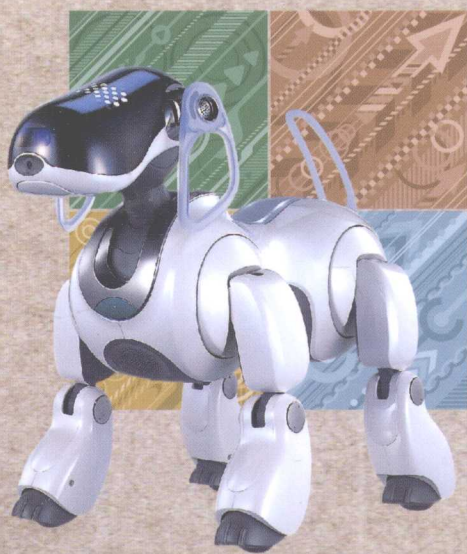


ROBOTICS

机器人学

第二版

蔡自兴 编著



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
第一版获全国普通高校优秀教材一等奖

清华大学出版社

ROBOTICS

机器人学

第二版

蔡自兴 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍机器人学的基本原理及其应用,全面反映出国内外机器人学研究和应用的最新进展,是一部系统和全面的机器人学著作和教材。本书共 12 章,内容涉及机器人学的概况、数理基础、运动学、动力学、位置和力控制、高级控制、传感器、高层规划、轨迹规划、程序设计、应用和展望等内容。

该书对第一版进行较大的修订与补充,特别是增加了“机器人传感器”一章,把两章“机器人控制(一、二)”改为“机器人位置和力控制”与“机器人高级控制”各一章,把“机器人规划”一章扩展为“机器人高层规划”和“机器人轨迹规划”两章。此外,增加了“机器人路径规划”等内容,着重介绍了作者在机器人路径规划领域的研究新成果。

本书特别适合作为本科生和研究生教材,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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机器人学/蔡自兴编著. —2 版. —北京:清华大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-302-20761-0

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 151233 号

责任编辑:薛 慧

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24 字 数:582 千字

版 次:2009 年 9 月第 2 版 印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:42.00 元

本书如存在文字不清、漏印、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)62770177 转 3103 产品编号:032864-01

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6000~10 000m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,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 and 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作出了重要贡献。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 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:

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。

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,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作出贡献。

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作出必需的贡献,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。

宇健

第一版序

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作出新的贡献。

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

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兴趣,进行深入研究,并获得快速发展。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 14 次大会报告中所指出的:“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。”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和教材。

本书共 12 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,讨论机器人学的意义,分析机器人的特点、结构与分类,探讨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短阵的表示,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,并以二连杆和三连杆机械手为例推导出机械手动力学方程。探讨机器人的动态特性和静态特性。第五章研究机器人的位置和力控制,包括机器人的控制原则和控制方法、传动系统结构、位置伺服控制、位置和力混合控制、柔顺控制和分解运动控制等。第六章探讨机器人的高级控制,涉及机器人的变结构控制、自适应控制和智能控制等。第七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。第八章讨论机器人高层规划问题。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及基于专家系统的规划等。在机器人路径规划方面,在阐明机器人路径规划的主要方法和发展趋势之后,着重介绍了作者的一些研究新成果,如基于近似 Voronoi 图的机器人路径规划、基于模拟退火算法的机器人局部路径规划、基于免疫进化和示例学习的机器人路径规划和基于蚁群算法的机器人路径规划等。第九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。第十章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。第十一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。第十二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,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。邹小兵,李枚毅,郑敏捷,黄明登和赵慧等参加了第八章第五节的编写,陈白帆,余伶俐,魏世勇,谢斌等参加了本书部分章节的讨论和校对工作。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、中国工程首任院长宋健院士在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。中国工程院院士张启先教授在他重病时,不辞劳苦为本书第一版作序。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, 黄心汉, 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, 席裕庚, 熊有伦, 张伯鹏, 张钟俊等。

本书是在《机器人学》第一版基础上经过全面改编和补充而成。虽然已对第一版做了较大修改,但由于编写时间仓促,因而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8月17日

于长沙中南大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 机器人学的起源与发展	1
1.1.1 机器人学的起源	1
1.1.2 机器人学的发展	2
1.2 机器人的定义和特点	4
1.2.1 机器人的定义	4
1.2.2 机器人的主要特点	5
1.3 机器人的构成与分类	6
1.3.1 机器人系统的构成	6
1.3.2 机器人的自由度	7
1.3.3 机器人的分类	9
1.4 机器人学的研究领域	13
1.5 本书概要	15
1.6 小结	17
习题	17
第二章 机器人的空间描述和坐标变换	18
2.1 位姿和坐标系描述	18
2.2 平移和旋转坐标系映射	20
2.3 平移和旋转齐次坐标变换	21
2.4 物体的变换和变换方程	25
2.5 通用旋转变换	28
2.6 小结	31
习题	31
第三章 机器人运动学	34
3.1 机械手运动方程的表示	34
3.1.1 机械手运动姿态和方向角的表示	35
3.1.2 平移变换的不同坐标系表示	37
3.1.3 A 矩阵和 T 矩阵的表示	38
3.2 机械手运动方程的求解	41
3.2.1 欧拉变换解	42
3.2.2 RPY 变换解	45
3.2.3 球面变换解	45

3.3	机器人运动的分析与综合举例	46
3.3.1	机器人运动分析举例	47
3.3.2	机器人运动综合举例	50
3.4	机器人的雅可比公式	53
3.4.1	机器人的微分运动	53
3.4.2	雅可比矩阵的定义与求解	61
3.4.3	机器人雅可比矩阵计算举例	64
3.5	小结	67
	习题	68

第四章 机器人动力学 73

4.1	刚体的动力学方程	73
4.1.1	刚体的动能与位能	74
4.1.2	拉格朗日方程和牛顿-欧拉方程	75
4.2	机械手动力学方程的计算与简化	80
4.2.1	质点速度的计算	81
4.2.2	质点动能和位能的计算	82
4.2.3	机械手动力学方程的推导	84
4.2.4	机械手动力学方程的简化	85
4.3	机械手动力学方程举例	88
4.3.1	二连杆机械手动力学方程	88
4.3.2	三连杆机械手的速度和加速度方程	91
4.4	机器人的动态特性	97
4.4.1	动态特性概述	97
4.4.2	稳定性	97
4.4.3	空间分辨率	98
4.4.4	精度	99
4.4.5	重复性	101
4.5	机械手的静态特性	102
4.5.1	静力和静力矩的表示	102
4.5.2	不同坐标系间静力的变换	103
4.5.3	关节力矩的确定	105
4.5.4	负荷质量的确定	105
4.6	小结	106
	习题	107

第五章 机器人位置和力控制 111

5.1	机器人控制与传动概述	111
5.1.1	机器人控制的分类、变量与层次	111

5.1.2	机器人传动系统	114
5.2	机器人的位置控制	118
5.2.1	直流控制系统原理与数学模型	119
5.2.2	机器人位置控制的一般结构	122
5.2.3	单关节位置控制器的结构与模型	123
5.2.4	多关节位置控制器的耦合与补偿	130
5.3	机器人的力和位置混合控制	133
5.3.1	柔顺运动与柔顺控制	133
5.3.2	主动阻力控制	137
5.3.3	力和位置混合控制方案和规律	140
5.3.4	柔顺运动位移和力混合控制的计算	146
5.4	机器人的分解运动控制	147
5.4.1	分解运动控制原理	147
5.4.2	分解运动速度控制	150
5.4.3	分解运动加速度控制	151
5.4.4	分解运动力控制	153
5.5	小结	154
	习题	155
第六章	机器人高级控制	158
6.1	机器人的变结构控制	158
6.1.1	变结构控制的特点和原理	158
6.1.2	机器人的滑模变结构控制	160
6.1.3	机器人轨迹跟踪滑模变结构控制	163
6.2	机器人的自适应控制	166
6.2.1	自适应控制器的状态模型和结构	167
6.2.2	机器人模型参考自适应控制器	168
6.2.3	机器人自校正自适应控制器	171
6.2.4	机器人线性摄动自适应控制器	173
6.3	机器人的智能控制	175
6.3.1	智能控制与智能控制系统概述	175
6.3.2	主要智能控制系统简介	180
6.3.3	机器人自适应模糊控制	185
6.3.4	多指灵巧手的神经控制	188
6.4	小结	192
	习题	193
第七章	机器人传感器	194
7.1	机器人传感器概述	194

7.1.1	机器人传感器的特点与分类	194
7.1.2	应用传感器时应考虑的问题	195
7.2	内传感器	197
7.2.1	位移(位置)传感器	197
7.2.2	速度和加速度传感器	200
7.2.3	力觉传感器	202
7.3	外传感器	205
7.3.1	触觉传感器	205
7.3.2	应力传感器	208
7.3.3	接近度传感器	209
7.3.4	其他外传感器	211
7.4	机器人视觉装置	212
7.4.1	机器人眼	212
7.4.2	视频信号数字变换器	214
7.4.3	固态视觉装置	216
7.5	小结	218
	习题	218

第八章	机器人高层规划	220
8.1	机器人规划概述	220
8.1.1	规划的作用与问题分解途径	220
8.1.2	机器人规划系统的任务与方法	223
8.2	积木世界的机器人规划	226
8.2.1	积木世界的机器人问题	227
8.2.2	积木世界机器人规划的求解	228
8.3	基于消解原理的机器人规划系统	230
8.3.1	STRIPS 系统的组成	230
8.3.2	STRIPS 系统规划过程	231
8.3.3	含有多重解答的规划	234
8.4	基于专家系统的机器人规划	236
8.4.1	规划系统的结构和机理	237
8.4.2	ROPES 机器人规划系统	238
8.5	机器人路径规划	245
8.5.1	机器人路径规划的主要方法和发展趋势	245
8.5.2	基于近似 Voronoi 图的机器人路径规划	247
8.5.3	基于模拟退火算法的机器人局部路径规划	249
8.5.4	基于免疫进化和示例学习的机器人路径规划	254
8.5.5	基于蚁群算法的机器人路径规划	256
8.6	小结	261

习题	261
第九章 机器人轨迹规划	264
9.1 轨迹规划应考虑的问题	264
9.2 关节轨迹的插值计算	265
9.3 笛卡儿路径轨迹规划	271
9.4 规划轨迹的实时生成	276
9.5 小结	278
习题	278
第十章 机器人程序设计	281
10.1 机器人编程要求与语言类型	281
10.1.1 对机器人编程的要求	282
10.1.2 机器人编程语言的类型	285
10.2 机器人语言系统结构和基本功能	288
10.2.1 机器人语言系统的结构	288
10.2.2 机器人编程语言的基本功能	289
10.3 常用的机器人编程语言	291
10.3.1 VAL 语言	292
10.3.2 SIGLA 语言	292
10.3.3 IML 语言	293
10.3.4 AL 语言	294
10.4 机器人的离线编程	294
10.4.1 机器人离线编程的特点和主要内容	295
10.4.2 机器人离线编程系统的结构	296
10.4.3 机器人离线编程仿真系统 HOLPSS	300
10.5 小结	302
习题	303
第十一章 机器人应用	306
11.1 应用工业机器人必须考虑的因素	306
11.1.1 机器人的任务估计	306
11.1.2 应用机器人三要素	307
11.1.3 使用机器人的经验准则	307
11.1.4 采用机器人的步骤	308
11.2 机器人的应用领域	309
11.2.1 工业机器人	309
11.2.2 探索机器人	310
11.2.3 服务机器人	311

11.2.4	军事机器人	312
11.3	工业机器人应用举例	313
11.3.1	材料搬运机器人	313
11.3.2	焊接机器人	314
11.3.3	喷漆机器人	317
11.4	小结	318
	习题	319
第十二章	机器人学展望	320
12.1	机器人技术和市场的现状与预测	320
12.2	21 世纪机器人技术的发展趋势	323
12.3	应用机器人引起的社会问题	325
12.4	克隆技术对智能机器人的挑战	326
12.5	小结	329
	习题	330
	参考文献	331
	英汉对照术语表	340

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Origin and Development of Robotics	1
1.1.1 Origin of the Robotics	1
1.1.2 Advances in Robotics	2
1.2 Definition and Characteristics of Robots	4
1.2.1 Definition of Robots	4
1.2.2 Main Characteristics of Robots	5
1.3 Structure and Classification of Robots	6
1.3.1 Structure of a Robot System	6
1.3.2 Degrees of Freedom of Robots	7
1.3.3 Classification of Robots	9
1.4 Research Topics for Robots	13
1.5 Outline of the Book	15
1.6 Summary	17
Exercises	17
Chapter 2 Space Description and Coordinate Transformation	18
2.1 Representation of Position, Attitude and Coordinate Frames	18
2.2 Mapping of Transfer and Rotation Coordinate Systems	20
2.3 Homogeneous Transformation of Transfer and Rotation	21
2.4 Transformation of Object and Its Equations	25
2.5 General Rotation Transformation	28
2.6 Summary	31
Exercises	31
Chapter 3 Kinematics of Robots	34
3.1 Representation of the Kinematical Equation of Manipulators	34
3.1.1 Representation of Pose and Oriented Angle of Manipulator	35
3.1.2 Coordinate Representations of Transfer Transformation	37
3.1.3 Matrix T and Matrix A	38
3.2 Solving Kinematical Equations of Robot Manipulators	41
3.2.1 Solution of the Euler Transformation	42
3.2.2 Solution of RPY Transformations	45
3.2.3 Solution of Spherical Coordinate Transformation	45

3.3	Examples of Analysis and Synthesis for Robot Motion	46
3.3.1	Motion Analysis of Robot Manipulator	47
3.3.2	Motion Synthesis of Robot Manipulator	50
3.4	Jacobian of Robot Manipulator	53
3.4.1	Differential Motion of Robot	53
3.4.2	Definition and Solving of Jacobian Matrix	61
3.4.3	Computational Example of Robot Jacobian	64
3.5	Summary	67
	Exercises	68
Chapter 4	Dynamics of Robot Robots	73
4.1	Dynamics of a Rigid Body	73
4.1.1	Kinetic and Potential Energy of a Rigid Body	74
4.1.2	Lagrange Equation and Newton-Euler Equation	75
4.2	Computation and Simplification of Dynamic Equation of Robot Manipulator	80
4.2.1	Computing the Particle Velocity	81
4.2.2	Computing the Kinetic and Potential Energy of Particle	82
4.2.3	Derivation of Dynamic Equation of Manipulator	84
4.2.4	Simplifying the Dynamic Equation of Manipulator	85
4.3	Examples of Dynamic Equation of Manipulators	88
4.3.1	Dynamic Equation of Two-Link Manipulator	88
4.3.2	Velocity and Acceleration Dynamic Equations of Three-Link Manipulator	91
4.4	Dynamic Properties of Robots	97
4.4.1	Introduction to Dynamic Performance	97
4.4.2	Stability	97
4.4.3	Spatial Resolution	98
4.4.4	Accuracy	99
4.4.5	Repeatability	101
4.5	Static Characteristics of Manipulators	102
4.5.1	Representation of Static Forces and Moments	102
4.5.2	Transformation of Forces Between Coordinate Frames	103
4.5.3	Determination of Joint Torques	105
4.5.4	Determination of Load Quantity	105
4.6	Summary	106
	Exercises	107
Chapter 5	Position/Force Control of Robots	111
5.1	Basic Principles of Robotic Control	111