

//

机器人的智能控制方法

Robot Intelligeng Control

王灏 毛宗源 著

國防工業出版社

机器人的智能控制方法

Robot Intelligeng Control

王 灏 毛宗源 著

國防工業出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

机器人的智能控制方法/王灏,毛宗源著. —北京:
国防工业出版社, 2002. 4
ISBN 7-118-02726-X

I. 机… II. ①王… ②毛… III. 机器人—智能控制 IV. TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 086755 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{1}{2}$ 224 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 21.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

本书在分析工业机器人执行级控制技术现状的基础上,阐述了机器人运动控制的智能方法,主要包括模糊控制、变结构控制和神经网络控制及其融合技术在多自由度刚性机器人轨迹跟踪方面应用的理论与实际问题。主要描述一类既能较好地利用多自由度刚性机器人微分方程形式的数学模型又能容纳以自然语言来描述的行为模型的模糊变结构控制系统。该系统具有为提高模糊规则库的抗破坏和自恢复能力而设计的模糊规则分散存储和为增强实时操作性而设计的有选择学习规则和控制参数的更新机制。

在依次研究了与模糊控制、神经网络控制和变结构控制相关的机器人运动控制技术问题的基础上,以削弱模糊控制与变结构控制中的抖振幅度和频率为突破口,全面总结了一类模糊监督控制与典型变结构控制的相似性,进而揭示了变结构控制中在削弱抖振方面行之有效的边界层方法的模糊本质,从而为全面铺开对此前单独论述的各智能控制方法间的融合问题的研究作了充分的理论准备。

在所提出的机器人智能控制方法中,模糊控制为其核心。因此,本书还以一般的模糊控制系统为背景,提出了一些新的概念和思路。如提出了最大隶属度原则,从而将现有模糊控制方法中诸如模糊关系的获得、模糊关系的合成、模糊集的投影等“零碎”模糊数学运算统一到一个共同的理论框架之中;针对一类模糊监督控制算法推导了其冗余设计参数的几何选取准则;为实现高效推理过程而定义了模糊规则间的距离当量等概念,在此基础上,提出了动态构造模糊控制器的策略和算法。这些新的策略和算法除在所提出的机器人高效模糊变结构控制器中得到应用之外,对一般模

糊控制的理论研究,亦有一定的参考价值。

所提出的智能控制方案,通过对一个二自由度具有远程驱动关节的机械臂进行计算机仿真试验来验证。在使用 Matlab/Simulink 完成仿真的过程中,对所遇到的较专门的关于仿真二次建模、分时段仿真、同时含离散和连续状态的多采样频率递阶控制系统仿真等技术问题也单独作为一章加以阐述(第六章),使全书内容更加全面、完整。

本书结合作者所完成的广东省自然科学基金项目“仿人脑信息处理与控制的人工系统的研究(960304)”、“可自学习与结构可自组织的分级递阶机器人智能控制研究(940004)”和“多关节平面型机器人交流伺服系统的研究(870166)”的内容,并在现有的各种智能控制方案的基础上,摸索高效实用的机器人智能控制方法。

由于机器人是一项正在我国兴起的新技术,智能控制又是1971年才提出的新概念,两者的理论与应用研究尚在发展之中,加之作者的水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者及同行批评指正。

最后,作者衷心感谢广东省自然科学基金委员会及华南理工大学在基金项目研究中给予的资助,同时也衷心感谢国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社在本书出版过程中所给予的大力支持与帮助。对硕士研究生杜祺漳同学在本书定稿时,仔细试读和校对全稿并负责整理和打印工作,付出了辛勤的劳动,在此深表谢意;对博士后、博士研究生和硕士研究生为本书提供研究成果表示衷心感谢!

作 者

写于华南理工大学



王灏 1964年5月24日生于湖北省黄石市，籍贯湖北应山。1986年7月毕业于华南工学院工业电气自动化专业，获工学学士。1988年12月毕业于华南理工大学自动控制理论与应用专业，获工学硕士；1999年4月毕业于华南理工大学控制理论与控制工程专业，获工学博士。1988年12月至2000年7月，在华南理工大学电子信息学院自动控制工程系从事智能控制与机器人的研究和教学。1997年9月晋升为副教授。现为西门子（中国）有限公司广州分公司自动化与驱动部高级系统工程师。



毛宗源 1936年2月18日生于浙江省江山市，籍贯浙江江山。1962年7月毕业于大连工学院船厂船舶电气自动化专业。1962年9月分配到华南工学院任教，现为华南理工大学电子信息学院自动控制工程系教授，博士生导师。主要研究领域为工业电气自动化，智能控制与机器人控制。出版著作8部，发表论文180余篇。1995年1月获国务院特殊贡献《证书》和特殊津贴。

责任编辑：朱秀芬
封面设计：彭建华

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人应用概貌及机器人学的主要研究领域	1
1.2 机器人控制技术的发展与现状	2
1.3 本书主要任务简介及内容安排	13
第 2 章 机器人的模糊控制方法	16
2.1 基于被控对象行为特性的模糊系统模型及其获取 方法	16
2.2 基于控制器行为特性的模糊系统模型及推理机制	27
2.3 基于高木-菅野规则模型的模糊系统及相关问题	40
2.4 标准 IF-THEN 语句原形及模糊系统整体工作 机制	53
2.5 结构自组织间接自适应模糊控制算法	58
2.6 模糊规则的一种图解方法	68
2.7 MIMO 间接自适应模糊控制器	74
2.8 机器人轨迹跟踪的间接自适应模糊控制	92
2.9 仿真试验研究	102
2.10 小结	121
第 3 章 适合机器人控制的神经网络方法	123
3.1 人工神经网络控制	123
3.2 适应性 CMAC 训练算法	127
3.3 机器人控制中的神经网络构造与训练之分析与策略	137

3.4 小结	141
第 4 章 机器人的模糊变结构控制	142
4.1 传统变结构控制与模糊控制在抖振方面的共同缺陷 ..	142
4.2 边界层方法模糊特性的本质起源与思考	155
4.3 模糊监督控制是一种广义的变结构控制	158
4.4 统一的模糊变结构控制框架	167
4.5 小结	169
第 5 章 机器人现代智能控制技术的融合	170
5.1 引言	170
5.2 一类模糊变结构控制器的分析与设计	177
5.3 模糊监督控制参数自适应律的算法特点及相关 问题	195
5.4 应用 CMAC 思想的模糊规则存储方法	212
5.5 融合 CMAC 机制的模糊控制器的分析与设计	215
5.6 小结	225
第 6 章 机器人智能控制方案仿真技术的有关问题	228
6.1 系统仿真方法及仿真语言	228
6.2 仿真失控现象及对策	230
6.3 使用 Matlab/Simulink 软件包时的一个问题	232
6.4 用 S 函数对复杂动力学系统的一种分时段仿真方法 ..	233
6.5 离散时间模型的仿真要点分析	239
6.6 高效动态模糊控制系统的仿真特点	242
6.7 递阶控制系统的仿真特点	243
6.8 仿真流程图构成的一般原则	244
6.9 小结	246
结束语	248
参考文献	254

CONTENTS

Chapter I Introduction	1
1.1 Robot application and main research fields for robotics	1
1.2 Development and current status of robot control techniques	2
1.3 Main tasks and layout of this book	13
Chapter II Robotic fuzzy control	16
2.1 Fuzzy system model based on plant behavioral characteristics and its acquisition	16
2.2 Fuzzy system based on controller behavioral characteristics and reasoning mechanism	27
2.3 Fuzzy system with Takagi-Sugeno rules and related issues	40
2.4 Standard IF-THEN proto-rules and overall functioning mechanism for fuzzy systems	53
2.5 Self-Organizing adaptive fuzzy control algorithm	58
2.6 Graphical interpretation of fuzzy rules	68
2.7 MIMO adaptive indirect fuzzy controller	74
2.8 Adaptive indirect fuzzy control for robot trajectory tracking	92
2.9 Simulation trials	102
2.10 Conclusion	121

Chapter III Robotic Neural Network Control	123
3.1 Artificial neural network control	123
3.2 Adaptive CMAC training algorithm	127
3.3 Analysis and strategy of neural network construction and training for robot control	137
3.4 Conclusion	141
Chapter IV Robotic Fuzzy variable Structure Control	142
4.1 A common defect of chattering in classical variable structure control and fuzzy control	142
4.2 Origin and fuzzy essence of boundary layer method and considerations	155
4.3 Fuzzy supervisory control is a generalized variable structure control	158
4.4 Unified framework for fuzzy variable structure control	167
4.5 Conclusion	169
Chapter V Integration of modern robot intelligent control techniquers	170
5.1 introduction	170
5.2 Analysis and design of a class of fuzzy variable structure controller	177
5.3 Algorithmic features and related topics of parameter adaptation laws in supervisory fuzzy control	195
5.4 CMAC-like fuzzy rule stroing mechanism	212
5.5 Analysis and design of fuzzy controller with embedded CMAC mechanism	215

5.6	Conclusion	225
Chapter VI	Simulation Issues of Robot Intelligent	228
6.1	System simulation method and simulation languages	228
6.2	A class of simulation failure	230
6.3	On using Matlab/Simulink software package	232
6.4	A time-segmented simulation through S-function for complex dynamic systems	233
6.5	Analysis of simulation essentials with discrete time models	239
6.6	Simulation features of high efficient dynamically- commissioned fuzzy control system	242
6.7	Simulation features of hierarchical control systems	243
6.8	General principles for simulation flow chart construction	244
6.9	Conclusion	246
CONCLUSIONS		248
REFERENCES		254

第 1 章 绪 论

1.1 机器人应用概貌及机器人学的主要研究领域

自 20 世纪 80 年代以来,在全球范围内,FMS(Flexible Manufacturing System,柔性制造系统)技术和 FA(Flexible Automation,柔性自动化)技术正蓬勃兴起。而其中具有操作功能多样性的工业机器人更是倍受关注,被公认为是新的自动化时代的核心技术^[1,2],它与可编程序控制器(PLC)、计算机数控(CNC)一起构成了现代产业的三大支柱。

近年来,随着我国改革开放政策的贯彻,经济建设有了长足的发展。在工业企业界,愈来愈多的厂家已经采用了机器人来充当生产过程中的重要角色。将机器人视作遥远的、为发达国家专有的先进生产设备的历史已经成为过去。我们再也不用仅仅通过电视或其它媒介来旁窥机器人的尊容了。事实上,在中国的一些大中型城市,要想亲眼目睹工作中的机器人,现在已不是一件十分困难的事情了。

机器人的应用相当广泛,如用于航空航天、水下作业、极端危险场所(如核电站、火灾、地震现场等)、工业生产、军事、医疗、日常生活、福利,直至娱乐等领域,所用的机器人名目繁多、应有尽有,不胜枚举^[3~9]。

机器人学(robotics)是一门高度综合和交叉的新兴学科,它涉及的领域很多,诸如机械、电气、工艺、力学、传动、控制、通信、决策、生物、伦理等诸多方面。但从控制的角度来看,其中最主要也

是最基本的是机器人的运动学(kinematics)和动力学(dynamics)问题及相应的控制策略研究^[10]。

机器人运动学包括前向运动学(forward kinematics)和逆运动学(inverse kinematics),或分别称为运动学的正问题和逆问题。其中,前向运动学研究以机器人的各关节参数(广义坐标)来决定终端操作器(end-effector)的位型(position and orientation);而逆运动学则是研究由期望的终端操作器位型来得到各关节变量的过程。显然,由于机器人这种空间连杆机构的复杂性,逆运动学问题比起其正问题来说要复杂得多。

机器人动力学问题主要包括两大类,即运动分析和力分析^[11]。前者研究由机器人连杆系的受力情况(外力和关节驱动力)决定各关节运动状况(位置、速度和加速度),进而通过运动学方法来最终获得终端操作器位型的过程和方法;而后者则是研究由期望的机器人各连杆的运动(位移、速度和加速度)得到需施加于各关节处的驱动力或力矩的方法和策略,即我们通常所说的控制综合问题^[11~16]。

本书就是从机器人的控制综合方面着手展开论述的。

1.2 机器人控制技术的发展与现状

众所周知,符合国际标准化组织 ISO 严格定义(ISO/TC184/SC2: TR8373: 1988)的第一台工业机器人 Unimate 在 20 世纪 60 年代初已在美国新泽西州的一家通用汽车制造厂(General Motors)安装使用^[4]。该产品在 60 年代中后期出口日本^[17,18],80 年代中期起,工业机器人的研究与应用在日本迅速发展并步入了黄金时代;进入 90 年代,日本国内的机器人装机数量约占全世界总装机台数的约 60%(截止 1991 年底,日本使用的机器人达 324895 台,而同期装机逾万台的国家还有:苏联 65000 台、美国 44000 台、德国 34140 台、意大利 14700 台),雄居全球机器人制造和使用大国的地位^[1]。另据联合国欧洲经济委员会的统计,1996 年现役机