



RESEARCH
ON ROBOT CONTROL

机器人控制研究

◆ 丁学恭 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

TP24

14

2006

机器人控制研究

丁学恭 著

浙江大學出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人控制研究 / 丁学恭著. —杭州: 浙江大学出版社, 2006. 9

ISBN 7-308-04878-0

I. 机... II. 丁... III. 机器人控制—研究
IV. TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 095321 号

机器人控制研究

丁学恭 著

责任编辑 樊晓燕

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.25

字 数 377 千

版 印 次 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

印 数 0001—2000

书 号 ISBN 7-308-04878-0/TP·304

定 价 34.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88072522

内 容 提 要

《机器人控制研究》是作者多年来对机器人控制研究的一些思考及主要机器人控制研究领域的一些重要内容,按照自己设计的体系构成的一本著作。本书从机器人控制的基础概念入手,介绍机器人控制理论及基本问题,尤其从机器人基本控制方法到现代控制技术方面,涵盖了目前机器人控制理论研究上所形成的主要内容和控制方法,最后着重讨论和研究了目前机器人控制领域的一些主要研究成果和控制策略。

序

机器人控制系统的核心是控制理论和方法。机器人控制是一项跨多学科的综合技术,涉及自动控制、计算机技术、人工智能等多种学科的内容,是极其重要的高技术领域之一。

随着科学技术的发展,机器人的应用范围也日益扩大,遍及工业、国防、宇宙空间、海洋开发,医疗康复等各个领域。在发达国家,工业机器人的开发和研究成果已得到广泛应用,尤其是在机器人控制研究中,随着计算机科学和人工智能等控制理论的发展,使得早期的基于机器人动力学模型的计算实时控制方案得以进一步拓展和重视。在机器人控制理论研究中,控制方法的设计已显得越来越重要,成为提高机器人性能的关键问题之一。由于机器人控制涉及机器人学、现代控制理论、力学和计算机控制等多方面的知识,其综合控制策略和方法显现出越来越重要的价值,特别是在目前受到广泛关注的智能机器人控制研究领域,经典的控制方案,诸如自适应控制、变结构控制等正由于人工智能理论技术的发展而得到更深入的研究和发展,大量相关控制策略研究文献不断涌现。

本书收集了最近几年自己对机器人控制的思考、体会和部分研究成果,试图形成一个关于机器人控制的基础研究体系,使工程技术人员能对机器人控制有一个较完整的整体概念,对机器人控制涉及的基本内容、方法和理论有个基本的了解和掌握,并对进一步的深入思考和研究有启发性的引导和参考作用,同时旨在向读者提供机器人控制面临的最新的、比较系统的控制策略和方法、研究成果,与读者共同探讨。

由于机器人控制研究涉及的学科领域很广,其系统知识和理论正在迅速发展和形成中,因此本书对机器人控制的研究也不可能是全面和系统的,也不一定能准确反映所涉及领域研究的真谛,只有尽可能简要的

反映机器人控制方法上相关方面的主要研究内容和形成的主要理论控制问题,同时将自己一些研究成果贯穿于其中。如果读者能从中了解机器人控制的研究进展、开扩视野,并从中得到感兴趣的思路和认为恰当的控制方法,此也就实现了写作本书的初衷。机器人研究领域本身是一个不断发展、研究和深入的过程,很难在一本小小的专著中介绍得令人满意,我诚恳期待读者的批评和建设性意见。

值此本书出版之际,十分感谢指导我进入机器人控制领域的各位教授和导师,以及研究生期间的各位同事。也要感谢书中参阅和引用的大量文献的作者及其研究成果,这里凝聚着许多他们共同的心血。

感谢本书的责任编辑樊晓燕博士在本书的出版过程中所付出的辛勤工作和努力。

由于本人学识和水平有限,书中难免存在错误和缺点,敬请读者批评指正。

丁学恭

2006年9月于杭州

目 录

第 1 章 机器人控制概论	1
1.1 机器人概述	1
1.1.1 工业机器人	1
1.1.2 先进机器人	1
1.1.3 机器人技术等级分类	4
1.2 机器人研究概述	4
1.2.1 机器人学的研究领域	4
1.2.2 机器人的研究方向	5
1.3 机器人控制问题	7
1.3.1 刚性机器人控制	7
1.3.2 柔性机器人控制	13
第 2 章 机器人控制基础	16
2.1 机器人控制系统概述	16
2.2 机器人运动学问题	19
2.2.1 引言	19
2.2.2 机器人位置与姿态的描述	19
2.2.3 机器人运动学正问题	30
2.2.4 机器人运动学逆问题	32
2.2.5 机器人的雅可比矩阵	35
2.3 机器人动力学问题	41
2.3.1 机器人静力学	42
2.3.2 机器人动力学正问题	43
2.3.3 机器人动力学逆问题	48
2.3.4 机器人惯量张量	51
2.4 机器人基本控制方法	53
2.4.1 机器人关节伺服控制	53
2.4.2 机器人轨迹控制	55

2.4.3 机器人的力控制	58
第3章 机器人现代控制技术	64
3.1 机器人变结构控制	64
3.1.1 变结构控制系统的基本原理	65
3.1.2 机器人滑模变结构控制	68
3.2 机器人自适应控制	70
3.2.1 机器人模型参考自适应控制	70
3.2.2 机器人自校正自适应控制	73
3.2.3 基于机器人特性的自适应控制	74
3.3 机器人鲁棒控制	75
3.3.1 机器人鲁棒控制基本方法	76
3.3.2 机器人 H^∞ 鲁棒控制	80
3.4 机器人最优控制	84
3.4.1 动态规划与 Hamilton-Jacobi 方程	84
3.4.2 基于自由运动机器人最优控制	86
3.5 机器人自学习控制	89
3.5.1 基于感知器的学习控制方法	89
3.5.2 机器人自学习控制法	90
3.5.3 学习控制在机器人中的应用	91
第4章 机器人智能控制技术	93
4.1 机器人智能控制概述	93
4.1.1 机器人智能控制系统导论	93
4.1.2 机器人智能控制问题	108
4.2 机器人智能控制基础	117
4.2.1 机器人智能控制理论概述	117
4.2.2 智能机器人行为规划	120
4.3 机器人智能控制技术	126
4.3.1 机器人模糊控制	126
4.3.2 机器人神经网络控制	139
第5章 移动机器人控制技术	155
5.1 移动机器人概述	155
5.1.1 移动机器人系统	155
5.1.2 移动机器人的引导	164

5.1.3 移动机器人的控制问题	166
5.2 移动机器人运动控制技术	171
5.2.1 移动机器人运动学模型	171
5.2.2 移动机器人运动控制	172
5.3 移动机器人路径规划	175
5.3.1 移动机器人路径规划问题	175
5.3.2 轮式移动机器人运动规划的解析方法	176
5.3.3 基于神经网络的移动机器人路径规划	180
5.3.4 基于人工势场理论的机器人模糊运动规划	190
5.4 移动机器人控制策略	202
5.4.1 移动机器人轨迹跟踪模糊控制方法	202
5.4.2 移动机器人H [∞] 鲁棒控制研究	208
5.4.3 移动机器人的时变自适应镇定控制	215
第6章 机器人控制策略研究	221
6.1 机器人轨迹跟踪控制研究	221
6.1.1 机器人的自适应轨迹跟踪控制	221
6.1.2 基于观测器的机器人鲁棒跟踪控制	225
6.1.3 机器人滑模轨迹跟踪控制研究	228
6.1.4 基于神经网络的机器人轨迹跟踪鲁棒控制	234
6.1.5 基于 n 个关节机器人轨道跟踪迭代学习控制	239
6.2 机器人相关控制策略研究	245
6.2.1 基于机器人多模型自适应控制	245
6.2.2 全局稳定机器人鲁棒自适应控制	250
6.2.3 机器人鲁棒最优控制	258
6.2.4 机器人关节加速度反馈解耦控制	264
6.2.5 机械手的鲁棒学习控制	271
6.3 柔性机器人控制研究	275
6.3.1 柔性机器人操作臂的动力学运动方程与模糊控制	276
6.3.2 柔性机器人协调操作系统控制	281
参考文献	286

第 1 章 机器人控制概论

1.1 机器人概述

机器人由操作机(机械本体)、控制器、伺服驱动系统和检测传感装置构成,是一种仿人操作、自动控制、可重复编程、能在三维空间完成各种作业的机电一体化的自动化生产设备。它特别适合于多品种、变批量的柔性生产,对稳定、提高产品质量,提高生产效率,改善劳动条件和产品的快速更新换代起着十分重要的作用。

机器人技术是综合了计算机、控制论、机构学、信息和传感技术、人工智能、仿生学等多学科而形成的高新技术,是当代研究十分活跃、应用日益广泛的领域。对机器人研究和应用的水平,是一个国家工业自动化水平的重要标志。

机器人并不是在简单意义上代替人工的劳动,而是综合了人的特长和机器特长的一种拟人的电子机械装置。它既有人对环境状态的快速反应和分析判断能力,又有机器可长时间持续工作、精确度高、抗恶劣环境的能力。从某种意义上说它也是机器的进化过程产物,它是工业以及非产业界的重要生产和服务性设备,也是先进制造技术领域不可缺少的自动化设备。从机器人诞生到 20 世纪 80 年代初,机器人技术经历了一个长期缓慢的发展过程。到了 90 年代,随着计算机技术、微电子技术、网络技术等的快速发展,机器人技术也得到了飞速发展。除了工业机器人水平不断提高之外,各种用于非制造业的先进机器人系统也有了长足的发展。我们大致可以按工业机器人和先进机器人及其技术发展路线分述机器人的最新进展情况。

1.1.1 工业机器人

在工业机器人领域有以下最新进展。

(1) 机器人操作机

通过有限元分析、模态分析及仿真设计等现代设计方法的运用,机器人操作机已实现了优化设计。以德国 KUKA 公司为代表的机器人公司已将机器人并联平行四边形结构改为开链结构,拓展了机器人的工作范围。加之轻质铝合金材料的应用,大大提高了机器人的性能。此外采用先进的 RV 减速器及交流伺服电机,使机器人操作机几乎成为免维护系统。

(2) 并联机器人

采用并联机构,利用机器人技术,实现高精度测量及加工,这是机器人技术向数控技术的拓展,为将来实现机器人和数控技术一体化奠定了基础。意大利 COMAU 公司、日本 FANUC 等公司已开发出了此类产品。

(3) 控制系统

控制系统的性能进一步提高,已由过去控制标准的 6 轴机器人发展到现在能够控制 21 轴甚至 27 轴,并且实现了软件伺服和全数字控制。人机界面更加友好,基于图形操作的界面也已问世。编程方式仍以示教编程为主,但在某些领域的离线编程已达到实用化。

(4) 传感系统

激光传感器、视觉传感器和力传感器在机器人系统中已得到成功应用,并实现了焊缝自动跟踪和自动化生产线上物体的自动定位以及精密装配作业等,大大提高了机器人的作业性能和对环境的适应性。日本 KAWASAKI、YASKAWA、FANUC 和瑞典 ABB、德国 KUKA、REIS 等公司皆推出了此类产品。

(5) 网络通信功能

日本 YASKAWA 和德国 KUKA 公司的最新机器人控制器已实现了与 Canbus、Profibus 总线及一些网络的连接,使机器人由过去的独立应用向网络化应用迈进了一大步,也使机器人由过去的专用设备向标准化设备发展。

(6) 可靠性

由于微电子技术的快速发展和大规模集成电路的应用,使机器人系统的可靠性有了很大提高。过去机器人系统的可靠性 MTBF 一般为几千小时,而现在已达到 5 万小时,可以满足任何场合的需求。

1.1.2 先进机器人

近年来,人类的活动领域不断扩大,机器人应用也从制造领域向非制造领域发展。像海洋开发、宇宙探测、采掘、建筑、医疗、农林业、服务、娱乐等行业都提出了自动化和机器人化的要求。这些行业与制造业相比,其主要特点是工作环境的非结构化和不确定性,因面对机器人的要求更高,需要机器人具有行走功能、对外感知能力以及局部的自主规划能力等,是机器人技术的一个重要发展方向。

(1) 水下机器人

美国的 AUSS、俄罗斯的 MT-88、法国的 EPAVLARD 等水下机器人已用于海洋石油开采、海底勘查、救捞作业、管道敷设和检查、电缆敷设和维护、以及大坝检查等方面,形成了有缆水下机器人(remote operated vehicle)和无缆水下机器人(autonomous under water vehicle)两大类。

(2) 空间机器人

空间机器人一直是先进机器人的重要研究领域。目前美国、俄罗斯、加拿大等

国已研制出各种空间机器人。如美国 NASA 的空间机器人 Sojanor 等。Sojanor 是一辆自主移动车,重量为 11.5kg,尺寸 48~630mm,有 6 个车轮,它在火星上的成功应用,引起了全球的广泛关注。

(3)核工业用机器人

国外对于核工业用机器人的研究主要集中于研究机构灵巧、动作准确可靠、反应快、重量轻、刚度好、便于装卸与维修的高性能伺服手以及半自主和自主移动机器人。已完成的典型系统如美国 ORML 基于机器人的放射性储罐清理系统、反应堆用双臂操作器,加拿大研制成功的辐射监测与故障诊断系统,德国的 C7 灵巧手等。

(4)地下机器人

地下机器人主要包括采掘机器人和地下管道检修机器人两大类。主要研究内容为机械结构、行走系统、传感器及定位系统、控制系统、通信及遥控技术。目前日本、美国、德国等发达国家已研制出了地下管道和石油、天然气等大型管道检修用的机器人,各种采煤机器人及自动化系统正在研制中。

(5)医用机器人

医用机器人的主要研究内容包括医疗外科手术的规划与仿真、机器人辅助外科手术、最小损伤外科、临场感外科手术等。美国已开展临场感外科(telepresence surgery)的研究,用于临场模拟、手术培训、解剖教学等。法国、英国、意大利、德国等国家联合开展了图像引导型矫形外科(telematics)计划、袖珍机器人(biomed)计划以及用于外科手术的机电手术工具等项目的研究,并已取得一些卓有成效的结果。

(6)建筑机器人

日本已研制出 20 多种建筑机器人。如高层建筑抹灰机器人、预制件安装机器人、室内装修机器人、地面抛光机器人、擦玻璃机器人等,并已有实际应用。美国卡内基梅隆大学、麻省理工学院等都在进行管道挖掘和埋设机器人、内墙安装机器人等型号的研制,并开展了传感器、移动技术和系统自动化施工方法等基础研究。英、德、法等国也在开展这方面的研究。

(7)军用机器人

近年来,美国、英国、法国、德国等已研制出第二代军用智能机器人。其特点是采用自主控制方式,能完成侦察、作战和后勤支援等任务,在战场上具有看、嗅和摸能力,能够自动跟踪地形和选择道路,并且具有自动搜索、识别和消灭敌方目标的功能。如美国的 Navplab 自主导航车、SSV 半自主地面战车,法国的自主式快速运动侦察车(DARDS),德国 MV4 爆炸物处理机器人等。目前美国 ORNL 正在研制和开发 Abrams 坦克、爱国者导弹装电池用机器人等各种用途的军用机器人。

可以预见,在 21 世纪各种先进的机器人系统将会进入人类生活的各个领域,成为人类良好的助手和亲密的伙伴。

1.1.3 机器人技术等级分类

(1) 第一代机器人

第一代机器人主要以“示教—再现”的方式工作。目前已商品化、实用化的工作机器人大都属于第一代机器人。“示教”是工作人员通过“示教盒”将机器人开到某些希望的位置上,按“示教盒”上的“记忆键”,并定义这些位置的名字,让机器人记忆这些位置。工作人员利用机器人编程语言编制机器人工作程序时,就可利用这些已定义的位置。在机器人运行工作程序时,可再现这些位置。第一代机器人具有完备的内部传感器,用以检测机器人各关节的位置及速度,并反馈这些信息,控制机器人的运动。

(2) 第二代机器人

第二代机器人拥有外部传感器,对工作对象、外界环境具有一定的感知能力。感知的信息参加控制运算。例如,装备几个摄像机的机器人可以确定散放在工作台上的零件位置,准确地将它们拿起并放到规定的位置上去。第二代机器人正在越来越多地用在工业生产中。

(3) 第三代机器人

第三代机器人拥有多种高级传感器,对工作对象、外界环境具有高度适应性和自治能力,可以进行复杂的逻辑思维和决策,是一种高度智能化的机器人。目前,第三代机器人正处于研究及发展阶段。

1.2 机器人研究概述

1.2.1 机器人学的研究领域

机器人学的研究领域极其广泛,这些领域体现出广泛的学科交叉,涉及机器人的体系结构、机构理论、控制理论与策略、人工智能、传感技术、通讯技术、机器人语言等。机器人学研究的目的是开发适用各种工作要求的机器人。

(1) 传感器与感知系统

传感器与感知系统包括视觉、触觉、听觉、接近感、力觉、临场感等各种新型传感器的开发;多传感系统与传感器融合;传感数据集成;主动视觉与高速运动视觉的研发;传感器硬件模块化;恶劣工况下的传感技术;连续语言理解与处理;传感系统软件;虚拟现实技术等。

(2) 驱动、建模与控制

驱动技术的研究包括超低惯性驱动马达、直接驱动的开发;驱动系统的建模、控制与性能评价等。

控制机理(理论)包括分级递阶控制、专家控制、学习控制、模糊控制、基于人的

神经网络的控制、基于 Petri Nets 的控制、感知控制以及这些控制与最优、自适应、自学习校正、预测控制和反馈控制等组成的混合控制；控制系统结构；控制算法；分组协调控制与群控；控制系统动力学分析；控制器接口；在线控制和实时控制；自主操作和自主控制；声音控制和语音控制等。

(3) 自动规划与调度

自动规划与调度包括环境模型的描述；控制知识的表示；路径规划；任务规划；非结构环境下的规划；含有不确定性时的规划；协调操作（运动）规划；装配规划；基于传感信息的规划；任务协商与调度；制造（加工）系统中机器人的调度等。

(4) 计算机系统

机器人学中研究的计算机系统包括智能机器人控制计算机系统的体系结构；通用与专用计算机语言；标准化接口；神经计算机与并行处理；人机通讯；多智能体系统等。

(5) 应用研究

应用研究包括机器人在工业、农业、建筑、采矿、军事、服务业等领域和核能、高空、水下灾难救援和其他危险环境中应用等。

1.2.2 机器人的研究方向

1. 机器人的研究内容

目前国际机器人界都在加大科研力度，进行机器人共性技术的研究，并朝着智能化和多样化方向发展。主要研究内容集中在以下 10 个方面：

(1) 工业机器人操作机结构的优化设计技术

探索新的高强度轻质材料，进一步提高负载/自重比，同时机构向着模块化、可重构方向发展。

(2) 机器人控制技术

重点研究开放式、模块化控制系统，人机界面更加友好，语言、图形编程界面正在研制之中。机器人控制器的标准化和网络化以及基于 PC 机网络式控制器已成为研究热点。编程技术除进一步提高在线编程的可操作性之外，离线编程的实用化将成为研究重点。

(3) 多传感系统

为了进一步提高机器人的智能和适应性，多种传感器的使用是其问题解决的关键。其研究热点在于有效可行的多传感器融合算法，特别是在非线性及非平稳、非正态分布的情形下的多传感器融合算法。另一问题就是传感系统的实用化。

(4) 结构和控制系统一体化

机器人的结构灵巧，控制系统愈来愈小，二者正朝着一体化方向发展。

(5) 机器人遥控及监控技术

机器人半自主和自主技术,多机器人和操作者之间的协调控制,通过网络建立大范围内的机器人遥控系统,在有时延的情况下,建立预先显示进行遥控等。

(6) 虚拟机器人技术

基于多传感器、多媒体和虚拟现实以及临场感技术,实现机器人的虚拟遥操作和人机交互。

(7) 多智能体(multi-agent)调控制技术

这是目前机器人研究的一个崭新领域,主要对多智能体的群体体系结构、相互间的通信与磋商机理、感知与学习方法、建模和规划、群体行为控制等方面进行研究。

(8) 微型和微小机器人技术(micro/miniatuure robotics)

这是机器人研究的一个新的领域和重点发展方向。过去的研究在该领域几乎是空白,因此该领域研究的进展将会引起机器人技术的一场革命,并且对社会进步和人类活动的各个方面产生不可估量的影响。微小型机器人技术的研究主要集中在系统结构、运动方式、控制方法、传感技术、通信技术以及行走技术等方面。

(9) 软机器人技术(soft robotics)

该技术主要用于医疗、护理、休闲和娱乐场合。传统机器人设计未考虑与人紧密共处,因此其结构材料多为金属或硬性材料。软机器人技术要求其结构、控制方式和所用传感系统在机器人意外地与环境或人碰撞时是安全的,机器人对人是友好的。

(10) 仿人和仿生技术

这是机器人技术发展的最高境界,目前仅在某些方面进行一些基础研究。

2. 机器人的研究趋势

机器人应用领域的不断扩大,推动着机器人技术的蓬勃发展。人们认识到高级机器人应当是具有灵活的可操作性和移动性、丰富的传感器及其处理系统、全面的智能行为和友好的协调人一机器人交互能力,因此对机器人控制器的要求日益提高。

随着工业机器人应用规模的扩大,特别是在机器人生产线应用时,要求机器人控制器的高层系统中应具备联网通信能力。在这样的系统中,要解决规划和调度的控制问题。

高级的机器人控制器将以工程工作站为基础,利用工作站的资源对机器人作业进行离线编程和仿真。机器人离线编程技术和仿真系统可有效地提高机器人应用的效率,对其研究正日益受到重视。

机器人控制器发展的一个重要方面是具有多传感器信息融合(fusion)能力。既要研究真正适合机器人应用的多样的传感器系统,又要研究它们的信息处理与综合,并将感知、规划和运动控制有效地集成和协调。在目前的技术条件下,要使机

机器人达到完全自治是困难的。因此,在机器人和人的关系上,机器人系统不应完全把人排斥在外。只有人与机器人的完美结合才能充分发挥机器人的作用。这就要求机器人控制器有一个友好的、相互理解和协调、灵活方便的人机界面。还要研究人机交互准则,充分发挥各自的特点。

到目前为止,多数商品化工业机器人控制器下级机的控制策略基本上是独立关节PID伺服算法。这种控制方法的主要缺点是,反馈增益是预先确定的常量,它不能在有效载荷变化的情况下改变反馈增益。机器人高速运动时,其动力学效应十分显著。因此,用各关节独立控制,并设以恒定反馈增益的方式去控制一个非线性系统,在速度和有效载荷变化的情况下性能难以满足要求。这也就是目前大多数工业机器人速度和精度都不是很高的主要原因。为解决这一问题,就要根据机器人手臂的动态模型求出施加于机器人手臂的力矩。在提出了诸如计算力矩法、非线性解耦反馈控制、前馈补偿算法等方案后,又发现这些算法大多过于复杂,难以实时计算。因此,人们一方面研究简化模型、简化计算方法,提出一些有效的并行算法、递推算法等;另一方面又研究对系统参数变化及扰动不敏感,或不过分依赖准确的系统动态模型的控制方法。但是,这些算法及控制策略大都需要强有力的计算机处理能力,因此限制了这些方法的实际应用。

随着微电子技术的发展,高级的机器人控制对计算机处理能力的要求正逐渐被满足。一些研究人员开始基于新出现的计算机硬件和信息处理技术研究机器人动态控制的可实现性。高性能的CPU芯片发展速度极快,价格不断降低,已使一些算法的实现成为可能。已发表了许多利用新型的VLSI芯片,如DSP, Transputer, RISC芯片等构造机器人控制器的文章。还有利用ASIC技术进行全定制或半定制的专用算法芯片的开发研制。研究人员还结合机器人控制的特点和要求,研究各种新的计算机结构的适用性,如流水线(pipelining)、精简指令集(RISC)、阵列处理(systolic array)、多处理器(multi processors)等。可以说实现高级的机器人控制方法的物质基础已经具备,重要的是如何实现,并充分发挥芯片的效率。因此需要人们一方面研究新的算法和实现方式,同时也研究机器人控制系统的体系结构问题。

1.3 机器人控制问题

1.3.1 刚性机器人控制

机器人是一个十分复杂的多输入多输出非线性系统,它具有时变、强耦合和非线性的动力学特征,其控制是十分复杂的。由于测量和建模的不精确,再加上负载的变化以及外部扰动的影响,实际上无法得到机器人精确、完整的运动模型,我们必须面对机器人大量不确定性因素的存在。现代工业的快速发展需要高品质的机

器人为之服务,而高品质的机器人控制必须综合考虑各种不确定性因素的影响,因此研究不确定性机器人的鲁棒控制问题具有十分重要的理论和实践意义。

1. 不确定性机器人系统控制

机器人是一类高度非线性、强耦合性、时变性的动力学系统,很难建立其准确的动力学模型。为了满足对高精度运动控制的要求,提出了许多新的控制方法,如计算力矩法、自适应控制、变结构控制、迭代学习控制等。然而,一般情况下,复杂的工业对象(如工业机器人)不仅具有高度非线性特性,而且工作在不确定外部扰动环境中。因此,研究非线性系统在不确定扰动情况下的鲁棒学习控制问题具有重要意义。

如何对具有不确定性的机器人系统进行有效的跟踪控制一直是当前机器人控制研究的热点,并已取得很多成果。已有的许多结果大多是建立在位置、速度、加速度等状态向量可测的基础之上的,对仅有位置矢量可量测的机器人控制研究结果相对偏少。有研究人员分别基于反推方法,针对不含干扰项的机器人系统提出一种带观测器的输出反馈自适应机器人跟踪控制方案(但其观测器中含有不可测量项,因而控制过程是不连续的);基于机器人动力学的精确模型设计了具有观测器的控制方案(可保证跟踪误差渐近收敛);基于滑模控制原理,针对具有不确定的机器人系统,在设计滑模观测器的基础上,提出一种基于反推策略的机器人鲁棒控制方案,但跟踪误差只能收敛到一个界闭区域。另外,迭代学习控制也引起了人们的广泛兴趣。它利用控制系统先前的控制经验,结合系统输出信号和期望信号来构造新的控制输入,使被控对象产生期望的运动。特别在一类具有较强的非线性耦合和要求较高的位置重复精度的动力学系统(如工业机器人、数控机床等)中,迭代学习控制方法已经获得了一些有益的应用结果。

针对机器人的不确定性有两种基本控制策略:自适应控制和鲁棒控制。当受控制系统参数发生变化时,自适应控制通过及时的辨识、学习和调整控制规律,可以达到一定的性能指标,但实时性要求严格,实现比较复杂,特别是存在非参数不确定性时,自适应控制难以保证系统的稳定性。在机械手自适应控制当中,参数突变经常会破坏总体系统的稳定性。常规的自适应控制对于时不变或慢时变被控对象都能取得很好的控制效果,但当被控对象模型参数发生突变时(如工作环境突变、元件发生损坏等),自适应控制器的参数需要很长的时间才能收敛,造成过渡过程很差,甚至被控对象输出失控。机器人手臂的自适应控制是一个比较复杂的控制过程,当开动学习过程时机械手的性能基本上依赖于辨识模型参数初始化的精度。这个精度决定于工作起动时“不规则”运动的程度。另外,机器人手臂控制问题还与参数估计的收敛有关。在运动发生的有限时间内可能得不到参数估计的收敛,尤其是当参数突然改变时(例如,当抓一个质量大的工件时)总体系统的稳定性可能破坏。近几年来,基于指标切换函数的间接多模型自适应控制在机器人手臂的自适应控