




控制科学与工程研究生系列教材

机器人智能控制工程

王耀南 著



 科学出版社
www.sciencep.com

控制科学与工程研究生系列教材

机器人智能控制工程

王耀南 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了机器人系统的智能控制理论方法、算法及应用。全书共分九章,内容包括机器人的基本控制方法、机器人的姿态与运动控制、机器人模糊神经网络控制、机器人小脑模型 CMAC 的智能控制、机器人模糊自适应控制、机器人力/位置跟踪智能控制、机器人智能鲁棒控制、移动机器人智能控制以及智能控制在水下机器人、视觉伺服机器人控制、智能移动机器人系统、多传感器融合智能检测机器人中的应用。本书内容新颖,注重理论与实际结合,理论阐述简明清楚、深入浅出,算法推导严谨,力求使读者能较快掌握和应用这门高新技术。

本书可作为高等院校自动化、计算机、机械工程、系统工程、信息工程、电子信息工程等专业研究生和高年级本科生教材,也可作为工程技术人员和科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机器人智能控制工程/王耀南著. —北京:科学出版社,2004

(控制科学与工程研究生系列教材)

ISBN 7-03-012823-0

I. 机… II. 王… III. 机器人-智能控制-研究生-教材 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005709 号

责任编辑:匡敏钟 谊 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:安春生 / 封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年6月第一版 开本:BS(720×1000)

2004年6月第一次印刷 印张:26 1/4

印数:1—3 000 字数:519 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

机器人学科是一门迅速发展的综合性前沿学科。它涉及机械工程学、运动学、数学、电气工程学、计算机、电子工程学、自动控制工程学、人工智能、传感器、机器视觉、模式识别与导航、仿生学和多种智能模拟技术,受到了工业界和学术界的高度重视。一些工业发达国家如美国、德国、日本的大学和研究所的有关专业都在讲授和研究机器人及其应用,我国也把机器人学科列入国家“863”高技术计划中。近年来,随着科学技术的发展,机器人技术已得到广泛应用,遍及工业、国防、农业、宇宙空间、海洋开发、抢险救灾、医疗康复、家庭服务、原子能电站的维护等领域。

今天,机器人不仅在工厂中获得了广泛应用,而且还渗透到人们的家庭生活中。然而机器人的核心是机器人的控制系统。机器人的先进程度与其控制系统的性能密切相关。从控制工程的角度来看,机器人是一个非线性和不确定性系统。为了获得理想的控制品质,应充分利用现代控制理论和人工智能技术研究的最新成果,开发有效的智能控制策略以解决机器人的控制问题。机器人智能控制是近几年机器人控制领域研究的前沿热门课题,已取得了相当丰富的成果。但是,国内尚没有系统地反映这些研究成果的教材和专著。本书在一定程度上弥补了这个不足,及时反映了机器人智能控制理论与应用的最新成果,试图从控制的角度,将机器人学科系统化。

本书是作者在多年来为控制科学与工程专业博士、硕士研究生讲授智能控制课程的讲稿基础上,结合作者近年来在德国布莱梅大学所从事的智能机器人、智能电动汽车工程研究取得的科研成果,并参考国内外最新文献编著而成,其目的在于向相关专业的研究生和广大科技人员系统地介绍机器人的智能控制理论方法、算法及其应用,希望能对我国机器人及智能控制技术的发展有所贡献。

全书分成九章。第1章阐述了机器人的基本概念、分类、控制方法;第2章介绍机器人的姿态与运动控制;第3、4章介绍基于模糊神经网络、小脑模型CMAC网络的机器人控制;第5章介绍基于模糊系统和神经网络的机器人自适应、自学习、自校正控制器的设计方法;第6章给出机器人力/位置跟踪智能控制的结构、原理、学习算法和稳定性分析;第7章介绍机器人的基本鲁棒控制方法与算法,基于神经网络的机器人鲁棒控制;第8章介绍移动机器人的主要技术和智能控制方法;第9章对智能控制技术在无人驾驶水下机器人、机器人协调控制、视觉伺服控制、

移动智能轮椅机器人、多传感器融合智能检测机器人等方面的工程应用作了详细的阐述。附录给出了本书的部分仿真程序。本书的第 2、3 章由孙炜博士撰写,其余各章由作者撰写并统编全书。

本书的研究工作和出版得到了国家“863”计划项目基金、国家自然科学基金、中德国际合作重大项目基金、德国科研联合会 DFG 基金、教育部优秀骨干教师基金等的资助。特别感谢德国布莱梅大学自动化技术研究所 Boris Lohmann 教授、Axel Graser 教授的科研合作,以及应用科学技术研究所(BIBA)Horst Selzer 教授、Ament 博士、刘恒彪博士、唐彦东博士、余群明博士等中德国际科研项目组成员给予的大力支持,他们提供了相关研究成果和参考文献。感谢国内外机器人控制专家同意作者引用他们的论文和专著。最后对段峰、余洪山、霍百林、徐华、陈洁平、刘焕军、贾涛、罗志强、彭金柱等研究生帮助校对和打印部分书稿表示衷心的感谢。

由于机器人与智能控制是一门正在发展中的学科,尚未形成完善的理论体系,很多理论方法与工程应用问题还有待进一步深入研究和发 展,加上作者学识水平和写作时间所限,书中难免存在错误及不当之处,敬请读者批评指正。

作 者
2003 年 6 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 机器人的发展进程	1
1.2 机器人的定义	3
1.3 机器人的分类	3
1.4 机器人的动态控制问题	6
1.5 机器人的动态控制方法	7
第 2 章 机器人的姿态与运动控制	17
2.1 刚体的位置和姿态描述	18
2.2 坐标变换	19
2.3 齐次坐标变换	21
2.4 机械手的运动学方程	22
2.5 机械手运动的速度分析	29
2.6 机械手的动力学方程	33
2.7 机器人的基本控制	38
2.8 机械手的力控制	41
小结	45
第 3 章 机器人的模糊神经网络控制	46
3.1 机器人的模糊高斯基神经网络控制	46
3.2 机器人的模糊 B 样条基神经网络控制	58
3.3 机器人的模糊小波神经网络控制	66
小结	82
第 4 章 机器人的脑模型 CMAC 控制	83
4.1 CMAC 技术	83
4.2 基于模糊 CMAC 的机器人控制	90
4.3 基于 CMAC 神经网络的机器人最优控制器	99
附录 4.3.A	109
附录 4.3.B	111
小结	112
第 5 章 机器人模糊自适应控制	113
5.1 机器人的递归模糊神经网络控制	113

5.2	基于模糊补偿器的机器人自适应控制	122
5.3	机器人的鲁棒自学习模糊控制器设计	142
5.4	机器人模糊自校正控制	155
第 6 章	机器人力/位置跟踪智能控制	167
6.1	机械手的神经网络阻抗控制	167
6.2	基于分解连接结构的高效机器人动态学习控制	183
6.3	机器人的神经网络逆模学习控制	193
6.4	刚性机器人的神经网络学习控制器设计	203
6.5	神经网络与 PID 控制器混合的机器人位置学习控制	212
6.6	模糊神经网络与 PD 控制集成的机器人位置学习控制	216
6.7	基于神经网络的机器人位置模型参考自适应控制	222
第 7 章	机器人的智能鲁棒控制	229
7.1	鲁棒控制的基本概念	230
7.2	机器人的鲁棒控制	232
7.3	改进的机器人鲁棒控制	239
7.4	机器人的鲁棒神经网络控制	244
7.5	机器人的鲁棒模糊控制	250
7.6	基于径向基神经网络的机器人鲁棒自适应容错控制	255
	小结	265
第 8 章	移动机器人的智能控制	267
8.1	移动机器人技术概述	267
8.2	基于模糊高斯神经网络的移动机器人控制	273
8.3	类似车辆的机器人神经网络预测控制	280
8.4	基于广义预测控制器的移动机器人路径跟踪控制	284
8.5	基于模糊逻辑推理的移动机器人导航控制	291
8.6	基于模糊神经网络的步行机器人控制	297
第 9 章	智能机器人工程应用实例	307
9.1	自主水下机器人的多变量智能控制	307
9.2	两台机器人抓起同一物体的协调控制	323
9.3	视觉伺服控制的智能机器人	328
9.4	智能移动机器人系统	347
9.5	多传感器融合智能检测机器人	354
	参考文献	362
	附录 基于 MATLAB 语言的机器人智能控制算法的部分仿真程序	372
1.	模糊小波基神经网络及其在机器人轨迹跟踪控制仿真程序	372
2.	模糊 B 样条基神经网络机器人轨迹跟踪控制仿真程序	379

3. 一种 CMAC 网络机器人控制仿真程序	387
4. 模糊 CMAC 机器人轨迹跟踪控制仿真程序	392
5. 机器人鲁棒轨迹跟踪控制仿真程序	397
6. 机器人的鲁棒神经网络控制仿真程序	402
7. 递归模糊神经网络的训练仿真程序	407

第 1 章 绪 论

机器人的诞生和机器人学的建立和发展是 20 世纪自动控制最具说服力的成就,是 20 世纪人类科学技术进步的重大成果。机器人从爬行到学会两腿直立行走,仅仅用了 20 年,而人类的这一过程则经历了上百万年。现在全世界已经有近 100 万台机器人,销售额每年增长 20% 以上,机器人技术和工业得到了前所未有的飞速发展。机器人已经能够使用工具,能看、能听、能说,并且开始能进行一些决策和思考的智能行为,其应用也从传统的加工制造业逐渐扩展到军事、海洋探测、宇宙探索等领域,并开始进入家庭和服务行业。作为一种先进的机电一体化产品,机器人技术的发展与自动控制技术的发展息息相关。自动控制系统是机器人的中枢神经,它控制着机器人的思维、决策和行为,几乎所有自动控制技术都在机器人的控制上得到了应用。近年来,智能控制的发展十分迅速,这必将促使机器人的智能化水平达到新的高度。越来越多的学者和专家已经致力于这个领域的研究并取得了丰硕的成果,本书也将在此方面进行一些探讨和研究。

1.1 机器人的发展进程

20 世纪 20 年代,“机器人(Robot)”作为专有名词第一次出现。1920 年,捷克作家卡雷尔·查培克(Karel Capek)编写了一部幻想剧:《罗沙姆的万能机器人》(Rossum's Universal Robots)。剧中描写了一家公司发明并制造了一大批能听命于人,能劳动且形状像人的机器,公司用这些机器从事各种日常劳动,甚至取代了各国工人的工作,后来的研究使这些机器有了感情,进而导致它们发动了反对主人的暴乱。剧中的人造机器取名为 Robota(捷克语),英语 Robot 由此衍生而来,在我国则被译为“机器人”。

在机器人从幻想世界走进现实世界的发展过程中,多连杆操纵器和数控机床的出现为机器人的产生准备了技术条件。

第二次世界大战期间,在生产放射性材料的过程中应用了一种遥控多连杆操纵器,这种六自由度的操纵器可以复现人手的动作和姿态,代替操作员的直接操作。

1953 年,为了满足生产先进飞机的需要,美国麻省理工学院辐射实验室将伺服技术和数字计算机技术结合起来,研制成功数控铣床。切削模型以数字形式通过纸带输入机器,然后铣床的伺服轴按照模型的轨迹做切削动作。1954 年,美国

的 George C. Devol 巧妙地将多连杆机构和数控机床的伺服轴连接在一起,设计了世界上第一台电子可编程机器人,并获得了专利。

1960 年美国的 Consolidated Control 公司根据 Devol 的技术专利研制出第一台机器人样机,并成立了 Unimation 公司,定型生产 Unimate 机器人。同时,美国 AMF 公司设计制造了另一种可编程机器人 Versatran。1961 年,美国麻省理工学院 Lincoln 实验室将接触传感器引入机器人,随后用电视摄像头作为输入传感器的研究工作也陆续展开。1968 年,美国斯坦福国际研究所研制了移动式机器人 Shakey。

1970 年在美国召开了第一届国际工业机器人学术会议。1970 年以后,机器人的研究得到迅速广泛的普及。1973 年,辛辛那提·米拉克隆公司的理查德·豪恩制造了第一台由小型计算机控制的工业机器人,它是液压驱动的,能提升的有效负载达 45kg。

到了 1980 年,工业机器人真正在日本普及,故称该年为“机器人元年”。随后,工业机器人在日本得到了巨大发展,日本也因此赢得了“机器人王国”的美称。之后,随着自动控制理论、电子计算机和航天技术的迅速发展,人工智能开始与机器人技术结合,机器人技术进入一个新的发展阶段。20 世纪 80 年代中期,机器人制造业成为发展最快和最好的经济部门之一。20 世纪 80 年代后期,由于工业机器人的应用趋于饱和,不少机器人厂家倒闭,机器人学的研究跌入低谷。1995 年,世界机器人产业得到了复苏和较快的发展。2000 年,世界上约有 100 万台机器人在工作。进入 21 世纪后,机器人产业维持了较好的发展势头。

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、国防以及国民经济和人民生活产生了重大影响。对机器人的需求和机器人工业的迅速发展,使机器人技术形成了一门综合性学科——机器人学。一般地说,机器人学的研究目标是以智能计算机为基础的机器人的基本组织和操作,它包括基础研究和应用研究两方面的内容,其涵盖的研究领域有:机械手设计;机器人运动学、动力学和控制;轨迹设计和路径规划;传感器;机器人视觉;机器人控制语言;装置与系统结构;机器智能等。近年来,关于智能机器人的研究得到了越来越多的重视。智能机器人具有学习、推理和决策的能力。为了提高智能机器人的这些能力,许多最新的智能技术在智能机器人中得到了应用,如临场感技术、虚拟现实技术、多智能体技术、人工神经网络技术、多传感器融合技术等。

现在机器人学这一新学科已从它的幼年时代转入朝气蓬勃的青年时代。许多国家已先后成立了机器人学会或协会。以机器人学科为中心的国际学术会议,如国际工业机器人会议 (ISIP)、国际工业机器人技术会议 (CIRT)、国际科学技术发展协会 (IASTED) 主办的国际机器人与自动化学术讨论会以及国际电工电子学会 (IEEE) 主办的国际机器人学与自动化会议 (ICR&A) 等,每年或隔年举行一次。同时,也出现了许多关于机器人研究的国际杂志,如 *Robotics Research*, *Robotics* 和

Robotics and Automation 等。

在我国,1985年已先后在几个学会内设立了机器人专业委员会。中国人工智能学会智能机器人学会也于1993年成立,并成功地举办了4次全国性的学术会议。从1987年起,由中国电子学会、中国自动化学会、中国人工智能学会等9家单位联合举办的全国机器人学术讨论会每两年举办一次。机器人专业刊物,如《机器人》、《机器人技术与应用》等,也已出版发行。在我国,机器人学这一新学科已形成一定规模。

1.2 机器人的定义

关于机器人的定义目前尚未统一。在国际上,关于机器人的定义主要有以下几种:

1) 国际标准化组织(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,以执行各种任务。

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各种任务的,并具有编程能力的多功能机械手。

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(NSB)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。

综合以上各家的定义,可以按以下的特点来描述机器人:

- 1) 机器人的动作机构类似于人或人的某些器官,如上肢。
- 2) 机器人具有一定程度的智能,如记忆、感知、推理、决策、学习等。
- 3) 机器人具有通用性,工作种类和工作程序灵活多变。
- 4) 机器人具有独立性,一旦工作程序设定,机器人在工作时不需要人的干预。
- 5) 机器人是人造的机械电子装置。

1.3 机器人的分类

关于机器人如何分类,国际上没有制定统一的标准,有的按负载重量分,有的按控制方式分,有的按自由度分,有的按结构分,有的按应用领域分。一般的分类方式为:

1) 操作型机器人:能自动控制,可重复编程,多功能,有几个自由度,可固定或运动,用于相关自动化系统中。

2) 程控型机器人:按预先要求的顺序及条件,依次控制机器人的机械动作。

3) 示教再现型机器人:通过引导或其他方式,先教会机器人动作,输入工作程序,机器人则自动重复进行作业。

4) 数控型机器人:不必使机器人动作,通过数值、语言等对机器人进行示教,机器人根据示教后的信息进行作业。

5) 感觉控制型机器人:利用传感器获取的信息控制机器人的动作。

6) 适应控制型机器人:机器人能适应环境的变化,控制其自身的行动。

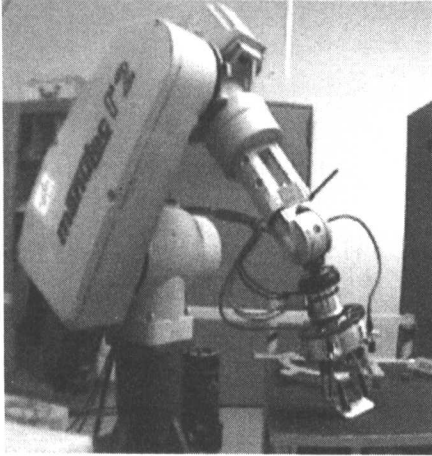


图 1.3.1 工业机器人

7) 学习控制型机器人:机器人能“体会”工作的经验,具有一定的学习功能,并将所“学”的经验用于工作中。

8) 智能机器人:以人工智能决定其行动的机器人。

我国的机器人专家从应用环境出发,将机器人分为两大类,即工业机器人和特种机器人。所谓工业机器人就是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人(图 1.3.1)。而特种机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人,包括:服务机器人(图 1.3.2)、水下机器人(图 1.3.3)、娱乐机器人(图 1.3.4)、检测机器人(图 1.3.5)、军用机器人(图 1.3.6)、太空机器人(图 1.3.7)和足球机器人(图 1.3.8)等。在特种机器人中,有些分支发展很快,有独立成体系的趋势,如服务机器人、水下机器人、军用机器人、微操作机器人等。目前,国际上的机器人学者,从应用环境出发也将机器人



图 1.3.2 智能轮椅

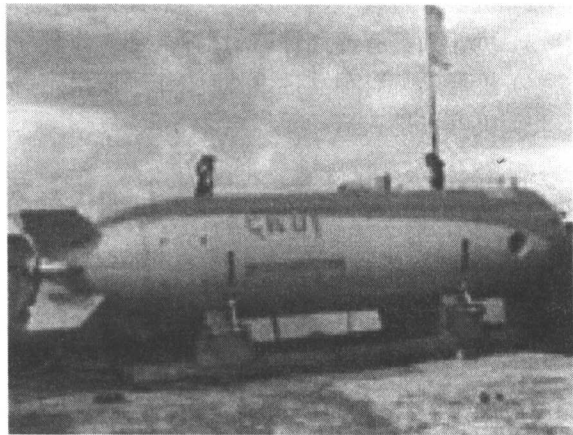


图 1.3.3 水下无缆自治机器人

分为两类:制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务与仿人型机器人,这和我国的分类是一致的。

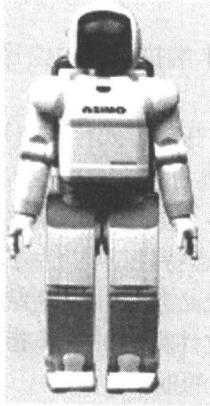


图 1.3.4 娱乐机器人

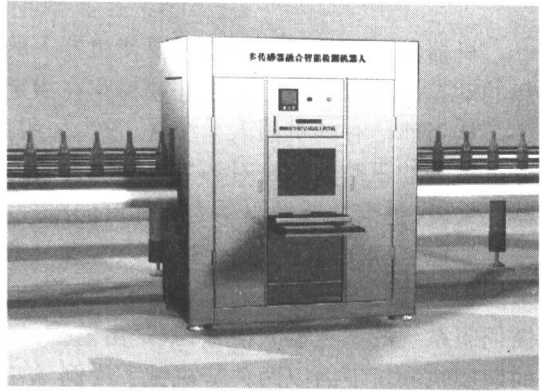


图 1.3.5 多传感器智能空瓶检测机器人

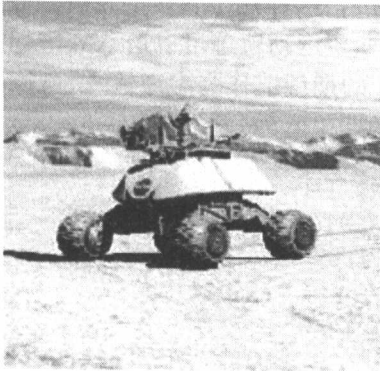


图 1.3.6 军用机器人

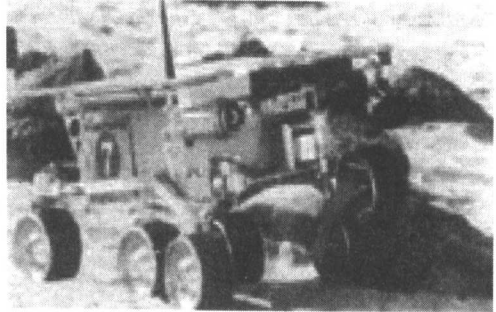


图 1.3.7 火星探测机器人

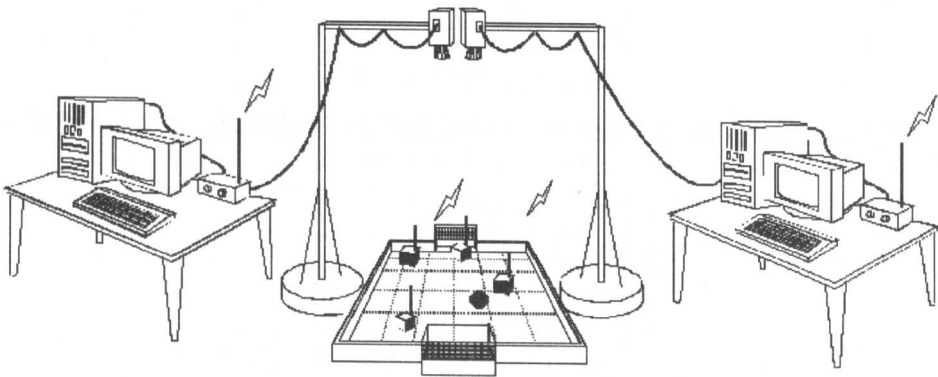


图 1.3.8 足球机器人

1.4 机器人的动态控制问题^[2,3]

机器人动态控制问题就是要使机器人的各关节或末端执行器的位置能够以理想的动态品质跟踪给定的轨迹或稳定在指定的位置上。

从当前已有的机器人系统看,很少采用步进电机等开环方式控制机械手,大部分机械手的驱动器都是对各关节施加力或力矩。对于具有多个自由度的多关节机器人来说,每个关节的驱动力矩都由伺服控制器根据各个关节的期望轨迹并按照一定的控制算法给定。由于机器人本身具有固有的动态特性,所以为了使各个关节能够以理想的动态性能跟踪期望轨迹,伺服控制系统必须采用反馈结构。而反馈伺服系统的参考输入信号,就是由监控系统根据上位计算机的操作指令而生成的期望轨迹。下面以两关节机械手为例,给出控制系统的框图。

图 1.4.1 是两关节机械手的示意图,由电机给出的驱动力矩 τ_1 、 τ_2 分别作用在杆 L_1 和杆 L_2 上, θ_1 、 θ_2 分别为 L_1 和 L_2 在 τ_1 、 τ_2 作用下转过的角度。假设要求机械手的末端沿曲线 AB 运动,那么端点的期望运动轨迹可以由 XY 坐标系中的 x_d 、 y_d 来表示。由于伺服系统需要以 θ_1 、 θ_2 的期望值作为参考输入,所以必须将期望轨迹的 XY 坐标换算为各个关节转角的期望值 θ_{d1} 、 θ_{d2} 。

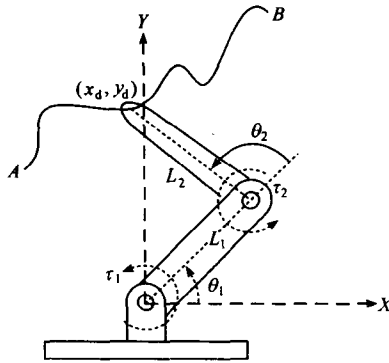


图 1.4.1 两关节机械手

图 1.4.2 给出了两关节机械手控制系统的框图。由图可见,各关节的控制环

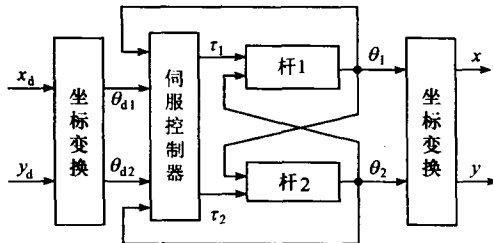


图 1.4.2 机械手控制系统框图

并不是完全独立的,相互之间存在耦合。这种耦合关系使得机器人呈严重的非线性特征,给机器人的动态控制带来了不便。

1.5 机器人的动态控制方法

机器人动态控制的目的是有两个,一个是如何实现闭环误差系统的稳定,使轨迹跟踪误差尽快趋于零;另一个是如何抑制干扰,尽可能地减小干扰信号对跟踪精度的影响。如果能够得到描述机器人动态的精确数学模型,并且干扰信号可以检测的话,那么运用线性伺服控制理论来设计控制器,进而达到这两个目的并不是很困难的事。但是对于实际系统来讲,很难得到精确的数学模型。在建模时所忽略的高频特性、机器人各关节的摩擦以及信号的检测误差等不确定因素,都是引起模型误差的原因。另外,机器人装置中存在的各种干扰信号往往不是单一的可检测信号,这也是一个重要的不确定因素。因此,在设计实际的机器人动态控制系统时,必须考虑这些不确定因素对控制品质的影响。

1.5.1 现代控制方法

在机器人技术 30 多年的发展过程中,现代控制理论所能提供的几乎所有的设计方法都在机器人上做过尝试。其中应用最普遍的是 PID 和 PD 控制器。PD 控制器结构简单,它是根据位置跟踪误差和速度跟踪误差乘以相应的静态增益来确定控制量。针对数学模型的不确定性,基于现代控制理论的机器人控制技术可分为三大类,即自适应控制、变结构控制、鲁棒控制。

1. 基本控制方法

(1) 机器人的力/位置混合控制

M. H. Raibert 和 J. J. Craig 提出了机器人的力/位置混合控制方案,根据机器人在进行接触运动时位置信号与力信号的正交性,分别对位置和力进行控制,即沿位置运动的非受限方向控制位置,而沿位置运动的受限方向控制力,其原理框图如图 1.5.1 所示。图中: S 为选择矩阵; I 为单位矩阵; J 为雅可比矩阵; T 为力变换矩阵; $P(q)$ 把关节空间变换为位置空间; X_d 、 \dot{X}_d 分别为位置和速度的期望值; F_d 为力的期望值; K_p 、 K_f 为比例控制增益。

该控制方法的缺点是自适应能力和鲁棒性较差,当机器人的参数或者外界工作环境发生变化时,系统的控制性变差。

(2) 机器人的阻抗控制

机器人的阻抗控制(impedance control)是把力控制器的输出信号加到位置控制器的输入端,以实现力的控制,其原理框图如图 1.5.2 所示。图中: K_p 、 K_v 为位置与速度控制回路的比例控制增益; K_{f1} 、 K_{f2} 为力控制部分的比例增益。这种控制

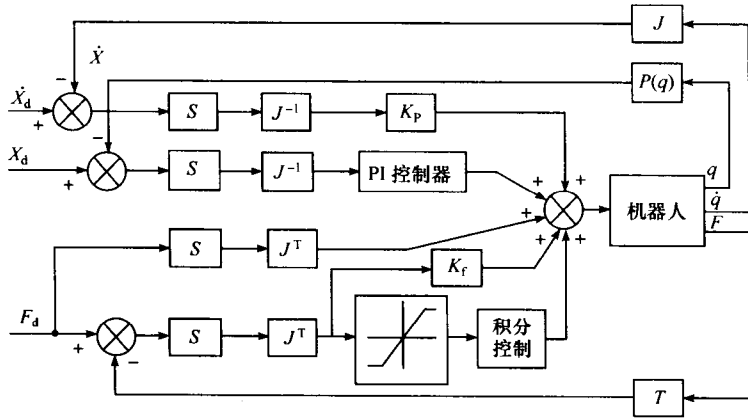


图 1.5.1 机器人的力/位置混合控制系统原理框图

方法的优点是可以方便地加入力控制信号。但由于在力控制部分只是采用简单的比例控制,因此,当外界工作环境的接触刚度变化时,控制性能就明显变差。另外,当机器人本身参数变化时,系统的自适应能力也显得较弱。

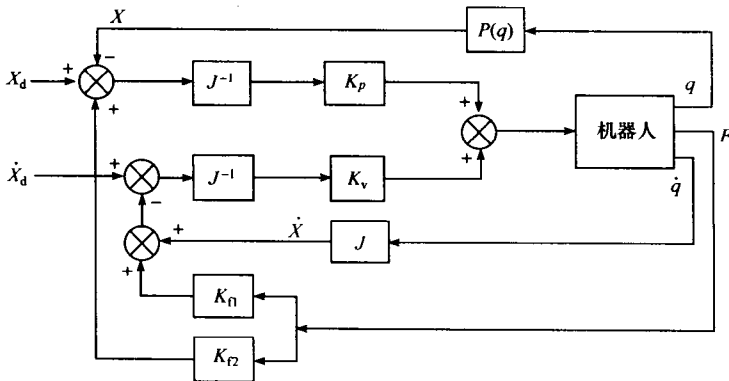


图 1.5.2 阻抗控制原理框图

2. 自适应控制(AC)

自适应控制先假设机器人的动态特性可以用一组未知参数的线性关系来表示,然后通过采用自适应算法来在线估计未知参数,并根据其估计值随时修改控制策略,从而使得实际的闭环控制系统满足性能要求。在以往的研究中^[4,5],应用于机器人动态控制的 AC 主要由一个 PD 调节器和一个基于模型的前馈补偿器组成。

AC 中的前馈项中采用了自适应算法,在参数不确定性严重的情况下,能够实现较好的跟踪性能。但精确的跟踪性能来自于对参数的准确估计和高增益的反馈,而对参数的估计需要进行冗繁的计算,这使得 AC 只能应用于参数变化缓慢、

机器人的关节数较少的情况。高增益逆反馈也有两个缺点：首先，它容易引起机械振荡；其次，增益的调节需要经验。

3. 变结构控制(VSC)

变结构控制理论自形成到现在短短几十年时间，已成为控制理论的一个重要分支。变结构控制方法已广泛地应用于机器人控制中。变结构控制的基本思想是先在误差系统的状态空间中，找到一个超平面，使得超平面内的所有状态轨迹都收敛于零。然后，通过不断切换控制器的结构，使得误差系统的状态能够到达该平面，进而沿该平面滑向原点。鲁棒性好是变结构控制的一个重要优点，这主要表现在滑模运动方程对于扰动的不变性，只要正确选择了足够大的控制信号，那么在任何扰动下，无论状态轨迹从哪一个初始状态出发，都能可靠地到达滑模。正是基于这个优点，滑模变结构控制的方法才可较好地用于机器人的控制。

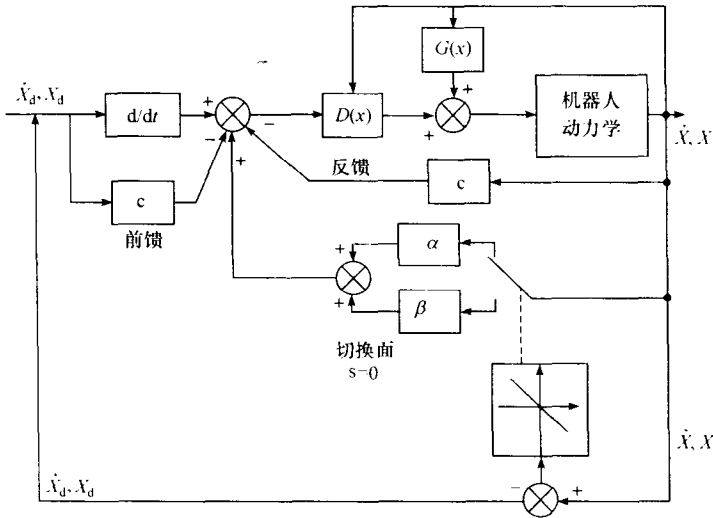


图 1.5.3 机器人的变结构控制系统原理框图

图 1.5.3 为一种机器人的变结构控制方法的原理框图。在该控制方法中，首先根据机器人的动力学模型建立其状态方程，选择切换函数，然后根据滑模可达性及存在性条件得到滑模变结构控制法则。该控制方法的优点是稳定性容易满足，但从机器人的动力学方面较难建立系统的状态方程。关于机器人的变结构控制可参见文献[6,7]。这种控制方法的缺陷是控制器频繁的切换动作有可能造成跟踪误差在零点附近产生抖动现象，这就增加了稳态误差，有时甚至还会引起寄生振荡。