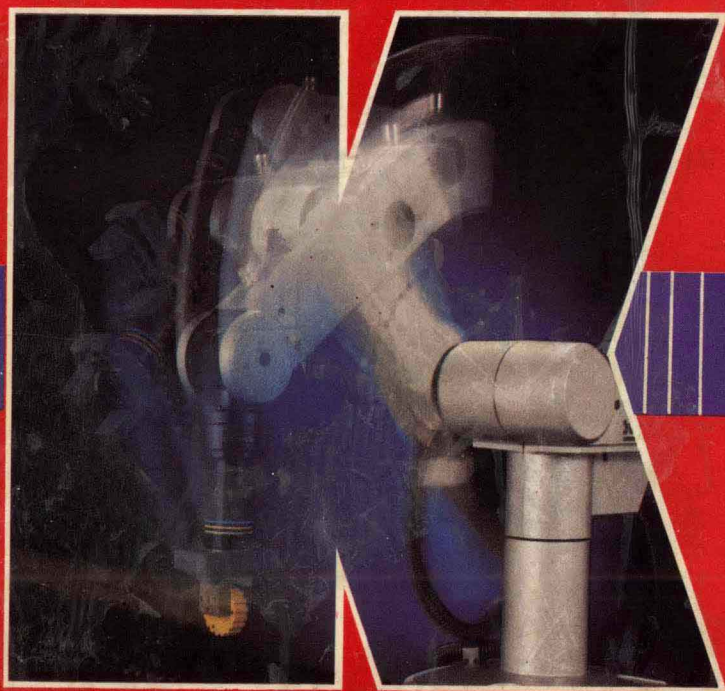




机器人智能控制

孙增圻 主编

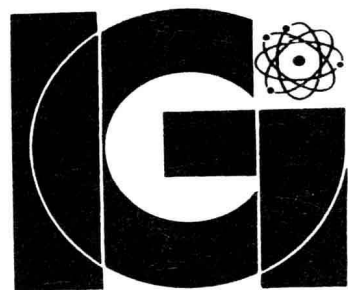


社 北 教 出 版
 社 河 北 教 育 出 版
 社 内 蒙 古 教 育 出 版
 社 山 西 教 育 出 版
 社 天 津 教 育 出 版
 社 联 合 出 版

机器人智能控制

孙增圻 严隽薇 钱宗华 编著

高科技教育丛书



gaokeji jiao
yu congshu

山西教育出版社

〔晋〕新登字 3 号

社 长 任兆文
总 编 左执中
责任编辑 张大同 彭琼梅
装帧设计 王引之
版式设计 荷 屏

书名 高科技教育丛书·机器人智能控制
编著 孙增圻 严隽薇 钱宗华
出版 山西教育出版社
发行 新华书店总店北京发行所
版次 1995 年 2 月第 1 版 1995 年 2 月山西第 1 次印刷
开本 大 32 印张 15.5 字数 381 千字
印刷 晋中地区印刷厂印刷 印数 1500 册
书号 ISBN7-5440-0554-2/G·555
定价 13.40 元

前 言

机器人是一项正在我国兴起的新技术。许多高等院校和研究部门正在从事该领域的研究工作。与此相适应,机器人学正在发展成为一门新兴的学科,它涉及到力学、机械学、自动控制、计算机及人工智能等多个领域。机器人力学和控制是最基础和核心的内容,智能控制是新兴的研究领域,它有着广泛的应用前景。该书系统介绍了机器人运动学、静力学、动力学、轨迹规划、驱动和测量部件、位姿控制、柔顺控制和智能控制等内容。位姿控制和柔顺控制部分不仅介绍了目前实用机器人中常用的控制方法,同时也介绍了许多目前正在研究且具有广泛应用前景的各种典型方法。智能控制部分重点介绍了神经元网络在机器人控制中的应用以及机器人分层递阶的智能控制方法。

该书内容自1986年起在清华大学有关专业的研究生和本科生中开始讲授,1988年将讲授内容编成了教材。本书是在原有教材的基础上进行修改和补充的结果。

该书主要参考了国外近几年机器人学方面的一些教材、著作和文章,例如第二、三、四、五章主要参考了文献〔1〕,第六章主要参考了文献〔4〕。同时结合我们的教学经验和体会,将有关内容进行了系统的整理。其中有些内容,也包括了我们研究工作的一些成果。

本书由孙增圻主编。第一、六、八、九、十章由孙增圻编写;第二、三、四、五章由严隽薇编写了大部分初稿,孙增圻

进行了修改和补充；第七章由钱宗华编写，她为书稿的整理和绘图等做了大量工作。

该书可作为计算机、自动化、电子、机械等有关专业的大
学生或研究生的教材。也可供有关教师及科研人员学习参考。

由于我们水平所限，书中尚存在许多不足之处，欢迎批评
指正。

孙增圻写于清华大学

1993年9月

目 录

前 言	(1)
第一章 绪论	(1)
1.1 机器人的发展	(1)
1.1.1 名称和定义	(1)
1.1.2 发展概况	(3)
1.2 机器人的基本组成	(7)
1.3 机器人的分类	(9)
1.3.1 按功能	(9)
1.3.2 按控制的类型	(10)
1.3.3 按动作机构	(11)
1.3.4 按用途	(13)
1.3.5 按负载能力及工作空间范围	(13)
1.3.6 按自由度的多少及类型	(14)
1.4 机器人的应用	(14)
1.4.1 应用机器人的益处	(14)
1.4.2 机器人在工业上的主要应用	(16)
1.4.3 机器人的非工业应用	(20)
1.5 机器人的技术指标	(22)
第二章 位姿运动学	(26)

2.1	齐次变换	(26)
2.1.1	刚体的位置和方位	(26)
2.1.2	坐标变换	(28)
2.1.3	欧拉角	(33)
2.1.4	齐次变换	(36)
2.1.5	变换的相对性	(39)
2.1.6	逆变换	(41)
2.2	正运动学	(42)
2.2.1	开环运动链	(42)
2.2.2	D-H 表示法	(44)
2.2.3	正运动学问题求解	(53)
2.3	逆运动学	(58)
2.3.1	概述	(58)
2.3.2	6R PUMA560 机械手的逆运动学解	(60)
2.3.3	5R1P 斯坦福机械手的逆运动学解	(66)
2.3.4	逆运动学问题求解方法讨论	(72)
2.4	计算方面的考虑	(73)
	练习	(75)

第三章 微分运动学 (81)

3.1	坐标系的线速度和角速度	(81)
3.1.1	刚体运动的描述	(81)
3.1.2	坐标变换的导数	(83)
3.1.3	微分旋转	(85)
3.1.4	工具速度与工具位姿导数的关系	(89)
3.2	速度正运动学方程	(92)
3.2.1	雅可比 (Jacobian) 矩阵	(92)

3.2.2 雅可比矩阵的计算	(96)
3.3 速度逆运动学	(102)
3.3.1 求逆雅可比矩阵法	(102)
3.3.2 冗余度	(105)
3.3.3 优化法	(108)
3.3.4 解析法	(109)
3.3.5 查表和插值法	(113)
3.4 加速度运动方程	(116)
3.4.1 刚体的加速度	(116)
3.4.2 机械手的加速度运动方程	(117)
3.5 小结	(120)
练习	(120)

第四章 静力学	(124)
4.1 力和力矩分析	(124)
4.1.1 力和力矩的平衡	(124)
4.1.2 等效关节力矩	(127)
4.1.3 对偶性	(131)
4.1.4 力和力矩的变换	(134)
4.2 刚性	(137)
4.2.1 机械手的刚性和变形	(137)
4.2.2 末端柔性分析	(138)
4.2.3 柔性矩阵的主轴变换	(140)
练习	(143)

第五章 动力学	(147)
5.1 牛顿-欧拉法建立动力学方程	(148)

5.1.1	单刚体的动力学方程	(148)
5.1.2	机械手动力学方程的封闭形式	(150)
5.1.3	动力学方程的物理解释	(154)
5.2	拉格朗日法建立动力学方程	(159)
5.2.1	拉格朗日动力学	(159)
5.2.2	机械手的惯性张量	(160)
5.2.3	拉格朗日运动方程的推导	(162)
5.2.4	广义坐标的变换	(167)
5.3	逆动力学计算	(172)
5.3.1	概述	(172)
5.3.2	基于牛顿-欧拉方程的递推算法	(174)
5.3.3	改进的递推算法	(180)
5.4	正动力学计算	(182)
5.5	小结	(189)
	练习	(190)

第六章	轨迹规划和生成	(196)
6.1	问题的描述	(196)
6.2	关节空间法	(198)
6.2.1	三次多项式函数插值	(198)
6.2.2	抛物线连接的线性函数插值	(205)
6.3	直角坐标空间法	(214)
6.3.1	线性函数插值	(214)
6.3.2	圆弧插值	(218)
6.3.3	与关节空间法的比较	(221)
6.4	轨迹的实时生成	(222)
6.4.1	采用关节空间法时的轨迹生成	(223)

6.4.2 采用直角坐标空间法时的轨迹生成	(225)
6.5 路径的描述	(226)
6.6 进一步的规划研究	(227)
6.6.1 利用动力学模型的轨迹规划	(227)
6.6.2 任务规划	(228)
练习	(230)

第七章 关节驱动与测量部件	(232)
7.1 驱动部件	(232)
7.1.1 液压驱动装置	(232)
7.1.2 电动驱动装置	(236)
7.2 测量部件	(257)
7.2.1 位置测量	(257)
7.2.2 速度测量	(263)
7.3 机器人关节控制系统举例	(266)

第八章 位姿控制	(269)
8.1 位姿控制问题的描述	(269)
8.1.1 两种基本的控制形式	(269)
8.1.2 机器人的动力学模型	(271)
8.1.3 控制问题描述	(274)
8.1.4 控制器的计算机实现	(275)
8.2 独立关节 PID 控制	(277)
8.2.1 控制规律设计	(277)
8.2.2 稳定性分析	(280)
8.3 分解运动速度控制	(282)
8.3.1 控制框图	(282)

8.3.2	控制规律设计及稳定性分析	(284)
8.3.3	$\hat{s}$ 的计算	(285)
8.4	分解运动加速度控制	(286)
8.4.1	控制方法	(286)
8.4.2	系统分析	(287)
8.4.3	鲁棒控制	(288)
8.5	计算力矩控制	(289)
8.5.1	控制方法	(290)
8.5.2	系统分析	(290)
8.5.3	鲁棒控制	(291)
8.6	变结构控制	(292)
8.6.1	变结构系统的基本概念	(293)
8.6.2	具有滑动态的变结构控制	(296)
8.6.3	一般非线性系统的变结构控制	(302)
8.6.4	平滑控制量的变结构控制	(309)
8.6.5	机器人的变结构控制	(316)
8.7	自适应控制	(320)
8.7.1	概述	(320)
8.7.2	基于参数优化的 MRAC	(323)
8.7.3	基于李雅普诺夫方法的 MRAC	(327)
8.7.4	基于超稳定性理论的 MRAC	(331)
8.7.5	基于直接离散模型的 STAC	(336)
8.7.6	基于摄动模型的 STAC	(341)
	练习	(345)

第九章 柔顺运动控制 (348)

9.1	力传感器	(349)
-----	------	-------

9.1.1	力传感器的不同类型	(349)
9.1.2	腕力传感器的工作原理	(351)
9.1.3	腕力传感器标定矩阵的确定	(354)
9.2	柔顺运动控制的基本概念和方法	(356)
9.2.1	柔顺坐标系的建立	(356)
9.2.2	自然约束和人为约束	(360)
9.2.3	被动柔顺和主动柔顺	(361)
9.2.4	柔顺控制任务描述	(362)
9.2.5	柔顺控制的基本方法	(366)
9.3	阻抗控制	(367)
9.3.1	控制方法	(367)
9.3.2	位置控制功能分析	(369)
9.3.3	柔顺控制功能分析	(371)
9.3.4	基于分解位置的阻抗控制	(374)
9.3.5	基于分解加速度的阻抗控制	(376)
9.4	混合控制	(378)
9.4.1	单纯的力控制	(378)
9.4.2	基于运动学的混合控制	(381)
9.4.3	基于计算力矩方法的混合控制	(384)
9.4.4	基于分解加速度的混合控制	(386)
	练习	(388)

第十章	智能控制	(391)
10.1	概述	(391)
10.1.1	智能控制的基本概念	(391)
10.1.2	智能控制的发展概况	(397)
10.1.3	智能控制理论的主要内容	(399)

10.2	神经网络在机器人控制中的应用	(409)
10.2.1	神经网络控制概述	(409)
10.2.2	神经网络运动学控制	(419)
10.2.3	神经网络动力学控制	(429)
10.2.4	神经网络路径规划	(433)
10.3	机器人分层递阶智能控制	(450)
10.3.1	一般结构原理	(450)
10.3.2	组织级	(454)
10.3.3	协调级	(462)
10.3.4	执行级	(477)
参考文献		(480)

第一章 绪 论

1.1 机器人的发展

1.1.1 名称和定义

机器人的英文名为 Robot。1921 年捷克斯洛伐克的剧作家卡雷尔·卡派克 (Karel Capek) 写了一个剧本, 名为 Rossum's Universal Robots。在斯拉夫语系 (像捷克、波兰等) 中, Robot 的意思与英语中的 Worker (劳工) 相似。例如现在在波兰等地有时还称劳工组织为 Organization for Robots。今天在捷克和波兰这些国家里, Robot 这个词具有人和机器的两层意思。

捷克剧作家卡派克所写的剧本描写了一个机械奴仆进行反抗的故事。在这个故事里 Robot 具有人的样子, 但不具备人的情感。其后出现了一系列的科学幻想小说, 它们都描写到了机器人。其中比较典型的有如世界著名的科学幻想小说家阿西摩夫 (Isaac Asimov) 1950 年所写的科学幻想小说 I Robot, 它不仅描写了 Robot 机械方面的具体内容, 而且描写了它在智能方面的内容。如它如何进行选择、决策等。当然这其中具有文学的夸张和想象。

在国外, 尽管不同的国家其语言文字不同, 但绝大多数国家对于机器人均采用 Robot 一词, 具体拼法可能不同, 但发音基本相同。在我国则采用意

译,从而翻译成为机器人。这个词有机器和人这两方面的意思,因而基本上反映了 Robot 的含义。但在机器人这个词中,人是主体,机器是修饰词,这里比较强调人,因而容易给人以误解,似乎机器人必须得像人。所以翻译为机器人也并不很确切。鉴于此,国内曾有人建议采用音义结合,将 Robot 翻译成“劳仆”,虽然这个主意不错,但是现已约定俗成,似难以更改。

关于什么是机器人,目前世界上尚无统一的定义。美国的机器人协会(RIA)对机器人的定义是:“所谓工业机器人,是为了完成不同的作业,根据种种程序化的运动来实现材料、零部件、工具或特殊装置的移动,并可重新编程的多功能操作机。”日本产业机器人协会(JIRA)的定义是:“所谓工业机器人,是在三维空间具有类似人体上肢动作机能及结构,并能完成复杂空间动作的多自由度的自动机械。”在中国,机械工业部在1986年对于机器人则给出了如下的定义:“工业机器人是一种能自动定位控制、可重复编程的、多功能、多自由度的操作机。它能搬运材料、零件或夹持工具,用以完成各种作业。”可以看出,中国所给出的机器人的定义与美国的定义基本类似,但是它们与日本的定义有一点本质的差别,即在中国和美国的定义中均要求机器人具有可重复编程的功能,而在日本的定义中则无此要求。因此对于那些只有固定动作序列的机械手,按照中国和美国的定义,它们不属于机器人;而按照日本的定义,它们也属于机器人。所以许多文献中关于各国机器人的生产和应用的统计资料,美国和日本的统计有很大的出入。国际标准化组织中的一个有关机器人的工作小组初步讨论通过的关于机器人的定义为:“工业机器人是具有自动控制操作功能或移动功能,并能通过编程进行工作的机械。”

关于智能机器人,各种文献中也给出了许多不完全相同的

定义,但是基本的意思是相同的。这里给出其中的一种定义:“能够根据感觉机能和认识机能而自行决定行动的机器人称为智能机器人。”^{〔3〕}

1.1.2 发展概况

1950年阿西摩夫的科学幻想小说比较具体地描述了机器人,同时提出了有名的“机器人三戒律”,它们是:

- (1) 机器人不可伤害人或眼看人将要遇害时而袖手旁观;
- (2) 机器人必须服从人给它的命令,除非这种命令与第一条戒律相抵触;
- (3) 机器人必须保护自身的存在,除非这种保护与第一、二条戒律相抵触。

尽管这三条戒律有一些模棱两可之处,许多人曾对它们进行过研究和修改,但是以上几条仍是设计机器人的指导方针,尤其是移动式机器人。

1954年,美国的D.C.戴沃尔(Devol)提出了机器人并不一定要像人的样子,而要能做人的工作。他具体地描述了如何建造能控制的机械手。他的这个设想在美国获得了专利。

经过了约7年的努力,美国的Unimation公司于1961年制成了世界上第一台往复式工业机器人。又过了6年,日本川崎重工业公司购买了美国的许可证,机器人远涉重洋来到日本。从此世界上掀起了制造工业机器人的热潮。1973年全世界共有3千台机器人,1976年达1.4万台,1977年达5万台,1979年达10万台以上。以上机器人数量均按日本的定义,即包括了固定动作序列的机械手。根据经济合作与发展组织1982年的统计数字,那时全世界共有可进行程序控制的机器人3.1万台,其中日本1.3万台,美国6250台,西德3500台,瑞典1300台,英国1352台,法国950台……。到1986年为止,工业机器人的

数量在西方国家中占世界第一位的是日本，有 7 万台，居第二位的是美国，有 2 万台，居第三位的是西德，有 8000 台，第四位是法国，有 6000 台，第五位是意大利，有 4000 台，第六位是英国，有 3017 台。

苏联在机器人方面也发展较快。1975 年共制造 120 台，到 1978 年增为 580 台，1980 年为 1579 台，1982 年达 5400 台，1984 年增至 1.1 万台，从而成为世界上制造和拥有机器人最多的几个国家之一。

在东欧，前捷克斯洛伐克和民主德国是较多使用机器人而且发展相当快的国家。在发展中国家，新加坡比较突出，至 1984 年全国有 70 家公司使用了 340 台多种用途的机器人。

我国研究和开发机器人始于 70 年代。1975 年日本川崎重工业公司首次在中国展出了工业机器人，从此在我国掀起了第一次研制机器人的浪潮。其中第一机械工业部北京自动化所、上海交大、中国科学院沈阳自动化所、大连组合机床研究所、广州机床研究所等十多个单位纷纷上马研制机器人。但由于当时对于我们这样一个具有 10 亿人口的大国是否有必要大力发展机器人的认识不统一，到 70 年代末和 80 年代初，这第一次浪潮低落下来。1984 年国家计委领导人批示：对于机器人应“给予重视，适当支持”，从此在国内掀起了第二次发展机器人的高潮，到 1984 年底，我国已研制出 100 多台工业机器人。但是这些机器人多数性能还比较差，成本也比较高，因而还未达到实用和推广的阶段。

现在我国对发展机器人技术也很重视，工业机器人已列为国家重点科技攻关项目之一，智能机器人也被列为国家的高科技的发展项目。因此可预料，我国也必将出现机器人蓬勃发展的局面。