

操作机器人的控制

理论与应用

〔南斯拉夫〕 M. 武科布拉托维奇 著
D. 斯托基奇



科学出版社

操作机器人的控制

理论与应用

〔南斯拉夫〕 M. 武科布拉托维奇 著
D. 斯托基奇

叶庆凯 译

科学出版社

1991

内 容 简 介

本书是“机器人学的科学原理”丛书的第二卷,它对操作机器人的控制进行了系统的研究。本书的研究表明,单纯从运动学角度来设计操作机器人往往是不够的。为了使操作机器人具有满意的性能,在进行控制综合时,必须考虑操作机构的动态性质。

本书采用大系统理论中分层控制与分散控制的方法处理操作机器人的控制综合问题,并讨论了利用力反馈的可能性。

本书可供从事机器人控制研究的科技人员和高等院校有关专业的师生参考。

M. Vukobratović D. Stokić

CONTROL OF MANIPULATION ROBOTS

Theory and Application

Springer-Verlag, 1982

操作机器人的控制

理论与应用

[南斯拉夫] M. 武科布拉托维奇 著
D. 斯托基奇

叶庆凯 译

责任编辑 王春晖 那莉莉

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年6月第一版

开本: 787×1092 1/32

1991年6月第一次印刷

印张: 12 1/8

印数: 0001—13 00

字数: 273 000

ISBN 7-03-002269-6/TP·164

定价: 11.30 元

译 者 的 话

目前，国内外均已开始重视机器人在工业中的应用。我国也必将在各个现代化项目中广泛使用机器人，否则，产品质量很难保证，劳动生产率很难提高，四个现代化很难实现。

操作机器人是一个大型机械控制系统，机器人的理论研究涉及到控制理论中的一些十分困难的课题，例如：严重的非线性，强耦合效应等等。目前对操作机器人的研究有两种倾向：或者只重视制造，最多作一些运动学分析；或者以机器人为控制对象，在控制理论领域中作一些纯理论的研究。本书的第一部分内容指出，对操作机器人只作运动学分析是不够的，为保证工作质量必须考虑操作机构的动态性质。本书的第二部分内容指出，如果一味追求理论上的严密性，那么考虑机构的动态性质将导致极其复杂的控制综合而失去实际意义。最后，本书提出了一套完整的基于简化动态性质的设计方法。对于搞纯理论的人来说，这种方法是不严格的。但它确实是一种动态设计操作机器人的可行方法，因而受到国内外机器人学界的重视。

本书采用大系统理论中分层控制与分散控制的方法处理操作机器人的控制综合问题。用分两阶段（标称动力学阶段和扰动动力学阶段）进行综合的方法处理操作机器人的严重非线性。对于子系统之间具有强耦合的情况，本书根据操作机器人的具体特点，考虑了利用力反馈的可能性。

通过阅读本书，对机器人感兴趣的读者可以了解机器人的控制问题的重要性；对控制感兴趣的读者可以把机器人作

为一个十分有意义的控制对象；对动力学感兴趣的读者可以知道在机构上加控制时应注意些什么问题。

在翻译过程中，译者得到黄琳同志、朱照宣同志的热情关心和指导，孟志华同志参加了第二章的翻译工作。谨向他们表示感谢。对原书中不妥和错误之处，译者作了订正。由于机器人学是一门新兴学科，加之译者水平所限，译文中有些名词术语的提法可以商榷，译文中也难免有错误和不当之处，诚恳地希望读者批评指正。

叶庆凯

1985年10月于北京大学

机器人学的科学原理

丛 书 介 绍

当代是机器人的时代。研究机器人学本质上要求多学科的知识。这使得机器人学本身变成了一门特殊的学科。特别地，操作手和机器人系统在机械和控制方面都有一些特殊的性质。在机械方面，操作机器人的特点在于所有自由度都是“主动的”，亦即由它们本身的执行机构所驱动，这同传统的机构不一样，在传统机构中运动主要由所谓运动学上的自由度来产生。这种机构的另一个特点是它们的可变结构，从开式结构变为闭式结构，从一种边界条件变为另一种边界条件。空间机构的第三个特点是冗余性，这反映在它的自由度多于为产生机器人和操作手的某个具体运动所需要的自由度。

从控制的观点来说，机器人和操作手系统是冗余的、多变量的，本质上为非线性的自动控制系统。操作机器人也是一个动力学上耦合的系统的例子，它的控制任务本身就是动态的任务。

编写本丛书的主要动机在于想要清楚地解释这类系统的动力学规则和动态控制规则。参与本丛书工作的同事们首先推导了这些机构的动力学的数学模型。他们的工作为系统地研究机器人和操作手的动力学性质和从动态品质的观点来综合这些机构的最优特性打下了坚实的基础。考虑到机器人系统的特点，与操作机器人的控制问题有关的结果是本丛书的一个主要贡献。为了建立理论机器人学与它的实际应用之间

的联系,或至少缩小它们之间的距离,作者们作了很大努力去综合便于实现的算法,并将它们放在足够精确的系统动力学模型的基础上。

本丛书的主要设想是:首先,为机器人学方面的工程师和从事“创造”的专家们提供内容广泛的书籍,进而涉及实际设计操作机构的内容,并在动力学模型的基础上,用今天的微电子学与计算机技术来实现综合控制算法的各种方案。

本丛书的编著者们相信,他们将在广泛的意义上为系统地进行机器人学的研究与应用建立坚实的基础。

M. 武科布拉托维奇

南斯拉夫 贝尔格莱德

1982年2月

序 言

本书是“机器人学的科学原理”丛书的第二卷。本丛书的第一卷讨论了空间机构的动力学及其在设计这些机构时的应用。本书则集中讨论基于动力学模型(详细地给出在第一卷中)的控制综合问题。这样形成了逻辑上的连续性,使人们较容易了解操作机器人设计的“动态”方法,较容易了解基于开式空间机构动力学的精确数学模型的控制算法的综合。

作者写本书有这样一些目的:证明有必要研究操作机构的动态性质;在综合控制算法时利用动态性质;根据操作任务的类型、运行的速度、操作机构本身的型式和不同的情况确定合适的动态量度。作者们相信,这种旨在综合动态控制算法的动力学研究抛弃了不必要的学究气,让读者在更广泛的意义上把本书给出的全部结果应用于操作手的设计实践。为此,作者愿意给出本书准备过程中作为指导思想的一些概念。

第一个概念是,实际应用要求存在的那些综合与设计操作手和机器人的方法通常应该是系统的设计者能够接受并可实际应用的方法。首先,我们从一类所谓非冗余的操作手,即六自由度的操作手开始,因为所有在工业中遇到的实际任务都可以用一个具有这样复杂度的操作机构来完成。从某个方面来说,这个概念包含着对操作系统,甚至对机器人的控制的基本原理。也就是说,上面提到的理由,以及大多数工业上的操作任务的高度确定的性质产生了对这些系统(广义上说,是大规模的机械系统)的控制按两个阶段进行综合的概念。这种次最优综合过程的第一阶段是组成标称运动或程序的轨

迹, 这是在所考虑的主动机构动力学的不完全精确和集中的模型基础上综合出来的。借助于用计算机组成机构动力学的数学模型和综合唯一的位置与方位所进行的控制综合, 计及了子系统之间真实的动态耦合。在综合的第二阶段采用解耦控制, 在此基础上综合了局部控制, 而在扰动动力学阶段上, 动态耦合问题由全局控制来解决。这样一个简单的控制概念使得综合可以在足够精确的动态模型的基础上来完成, 因而可认为这是对一般大规模动力学系统, 特别是对机器人的次最优控制的一种新方法。我们坚信, 这样的控制概念使数学模型与实际应用和工程实践紧密地结合起来。由于目前在机器人学, 特别是在工业机器人学的实践中, 缺乏现代设计方法和对这种控制系统进行综合的方法, 这个概念就更为重要。

正是由于这个原因, 本书的作者尽了最大的努力, 在上面建立的控制概念的基础上, 严格地把全部理论成果应用于各种典型的操作任务和适当的操作机构。

本书由绪论、三章正文和四个附录组成。

引言中给出了对机器人和操作手控制进行综合的要求, 并简要叙述了综合操作机器人的控制至今所得到的成果。

第一章在力学的一般理论的基础上给出了用计算机来构造主动空间机构动力学的数学模型的方法, 以及把由此方法组成的动力学模型进行线性化的计算机程序。本书中加进这一章是由于作者想使本书关于所考虑的这类系统的动力学模型独立且完整。

第二章给出了综合大规模机械系统控制的一般方法, 分析了分散控制的最优综合的可能性并描述了次最优二阶段综合的一个方案。研究了分散控制的稳定性与次最优性, 处理了用各种方法实现全局控制的次最优性问题, 给出了利用渐近调节器特性的操作机器人的解耦控制以及在离散时间域内

综合的控制.为了将所提出的分散控制与集中控制进行比较,本章还简要地给出了关于操作系统的经典的集中最优线性调节器的综合。

第三章中用几个六自由度的操作手来说明所提出的综合过程。这些例子用来说明把系统分解为功能子系统以综合标称控制与轨迹的方法,并分析所选的控制特性。这一章中包含用力反馈来解两个具有特色的操作任务的结果。这两个任务是移动一个装满液体的器皿和装配任务。这是一个操作手由于边界条件的改变在外力作用下作为一个可变结构系统来行动的典型任务。这一章中还考虑了用并行处理方法对机器人与操作手实现所提议的控制形式,并给出了为操作系统综合一个分散观测器的结果。

各个附录中提供的内容对于顺利阅读所给出的结果并不特别重要,但对于深入理解某些概念却是有意义的。在附录 2. A 中,推导了分散的和全局的控制的次最优性估计。在附录 2. B 中,从控制的次最优性的观点来分析一个系统模型分解为子系统和耦合的例子。在附录 2. C 中,给出了具有分散调节器和观测器的系统稳定性的分析方法。在附录 3. A 中,给出了由操作系统实现装配过程的仿真算法。

本书适用于所有从事机器人学应用与理论研究的工作者、机器人的设计者以及机器人学方面的研究生。为理解本书内容所要求的基础包括由线性与非线性系统理论所导出的基本结果以及机构动力学的基础知识。虽然本书应用并发展了从大规模非线性系统现代理论中所得到的方法,但本书的安排使不十分熟悉这一理论的读者也能容易地理解本书的内容并应用其结果。作者还尽了最大努力使那些对所提出的综合控制的算法的详细理论说明不感兴趣的读者也能使用第三章中操作系统的控制综合的例子中所给出的结果。

作者相信，本丛书的第一卷和本卷给出的结果提供了设计操作系统和综合控制系统的方法及其实现的可能性，这种方法能充分表达工业机器人学方面的实际工作的需要。

本丛书以后各卷更加重视应用直至涉及广义机器人学。

作者感谢 D. Hristić 博士、理科硕士 R. Nikolić 夫人和 G. Aleksić 小姐在准备本书英文版时所给予的帮助。

我们还感谢 T. Flannagan 博士修改了译稿。最后，我们特别感激 V. Ćosić 小姐细心而出色地打印了全部书稿。

作者

南斯拉夫 贝尔格莱德

1982 年 2 月

目 录

绪论 机器人与操作手的控制综合的一般原理	1
引言——系统类别的定义	1
机器人的分类	2
对机器人控制综合的要求	5
机器人控制综合领域的成果简述	11
机器人控制综合的原理	19
第一章 操作手动力学	25
1.1 在基本力学定理的基础上构成动力学方程的方法.....	25
1.2 操作系统完整的动力学模型	47
1.3 用计算机将开式运动链的动力学模型线性化的方法 ...	50
第二章 操作手控制的综合	61
2.1 引言	61
2.2 控制任务的确定	62
2.3 标称动力学阶段	76
2.4 扰动动力学阶段	86
2.5 线性最优调节器	87
2.6 分散和全面控制的综合——扰动动力学阶段	92
2.7 离散时间控制的综合	117
2.8 一个用于控制综合的人机对话式的计算机算法	129
2.9 结论	136
附录2.A 全局控制的次最优性.....	138
附录2.B 对在子系统与耦合之间进行“模型分配”的分析...	140
附录2.C 具有分散调节器和观测器的系统的稳定性分析...	144
第三章 典型操作任务的控制的综合	155
3.1 引言	155

3.2 沿要求的轨迹移动操作手末梢的任务	165
3.3 沿指定轨迹具有要求方位地移动工件	216
3.4 用负载反馈控制夹具在空间中的方位	282
3.5 装配过程	295
3.6 用多个处理器实现分散的和全局的控制	321
3.7 结论	337
附录 3. A 装配用的仿真算法	339
参考文献	359
索引	371

绪论 机器人与操作手的控制

综合的一般原理

引言——系统类别的定义

机器人与操作手属于多输入多输出的非线性多变量的机械系统。如果不考虑环境的影响(或者环境的影响是已知的、确定的),则它们通常是一个具有可变结构的确定性的动力学系统。至于力学性质,机器人与操作手属于大规模空间机构类,且由于某些自由度由适当的执行机构所驱动,它属于开的或闭的主动运动链。

机器人和操作手可用于人类活动的各个方面,从工业、农业、交通、水下与空间研究直到医疗事业中用它们来恢复或增强人的肌肉的能力都有广泛的用途。所以无论从技术和经济的观点还是从人道主义的观点来说机器人学的研究都是十分重要的。考虑到这些系统本身的性质以及它们的各种可能的应用,机器人和操作手的研究与设计必然涉及到许多领域,机器人学综合了诸如应用数学、工程力学、控制与系统理论、电子学、信息与计算机技术、大机构理论与一般机械工程、医学、经济学、社会学等等许多科学与工程学科的结果。

本书研究机器人和操作手的控制综合问题,着重研究工业操作手的控制综合。不过,所有结果可以没有困难地应用于其它类型的机器人和操作手。而且,这些研究还可容易地推广到其它大系统中去,例如飞行器、液压系统等,甚至可推广到经济、交通等其它类型的系统中去。

本书先对机器人和操作手进行大体上的分类，以便了解机器人学的大致范围及实际应用本书结果的可能性。然后考虑机器人和操作手的控制系统所遵循的主要原则，以及对控制综合所提出的要求。本节还简要地综述了机器人及操作手的控制综合方面至今所得到的成果。最后，给出了对机器人和操作手进行控制综合的主要思想。

机器人的分类

由于机器人学是一门发展极其迅速、其领域不断扩大的新兴学科，在许多文献中对机器人的定义有很大差别，这就是每一种机器人的定义与分类很容易成为不完全的或太狭窄的原因。一般来说，机器人是一种技术系统，它模仿或代替人的运动和智能^[1]。机器人的这样一个广泛的定义不仅能够概括各种型式的操作和运动系统，而且也包含了各种类型的执行某些智能功能的计算及逻辑机，诸如下象棋的机器，自动翻译机等，甚至一个自动驾驶仪也可以被认为是一个机器人。然而，本书只讨论那些需要执行某些机械运动的机器人，即讨论执行某些实际的运动，同时又有能力完成某些智能功能的机器人。

有许多方法对这种机器人进行分类。最一般的是分成操作的机器人、运动的机器人以及复杂的(既运动又操作的)机器人。广义机器人还包括所谓的信息机器人以及另外一些复杂的机器人。

按其功能，运动的机器人又可分成有腿的运动机构，“自移动”系统和骨骼机构。按控制方式，行走机构可分为运动按事先给定程序进行的程控(自动的)机构；操作员参与控制的半自动或生物型机构；具有自动识别障碍物并在未知或可

变的外界条件下决定自身运动的某些人工智能元件的智能机构。“自移动”系统包括在水下和在其它星球上运动的机器人,它们具有不同的运动方式(轮子的或有腿的机构,履带拖拉机等)。它们又可分为程控的,自适应的和智能的机器人。骨骼机构是运动机器人的一种特殊形式,它用来代替或放大人的骨骼的运动机能(它们被广泛地应用于整形手术中,有时也用于空间和水下研究或类似的其它工程中)。按其结构(腿的数目),运动机构分为静态稳定的和静态不稳定的(两腿的和四腿的系统)。

主要特征为模仿人臂机能的操作机器人按控制原则分为三类:自动的、生物型的和交互式的。

自动机器人-操作手在人直接参与控制的情况下完成它们的功能。人在这里只起监督、起动、中断等作用。从它们对外界运行条件的适应能力看,自动机器人-操作手可以分成三代。

第一代是具有“固定程序”的机器人,或称为程序机器人。它们在事先完全确定的条件下,在无外界扰动时,能够重复一组严格指定的操作。它们不能适应环境的改变,通常被用于工业上刻板重复的操作。实际上,这样的机器人无外界环境的信息。然而,应该指出,即使这样的机器人也允许按它们的运行情况,方便地修改程序。这样的机器人应该是可重新编程的,并且应可容易地切换,按另一个“固定程序”去执行另一组操作(如果不是这样,这种机器人就与非常死板、只会执行严格指定的一组操作的各种机械臂没有区别了)。

第二代是能在可变的或部分未知的条件下运行,且能适应由于环境改变所产生的扰动的“适应的”机器人-操作手。这种机器人装有能提供有关外界条件变化信息的敏感元件。它们也完成一组事先规定的操作,但在运行条件变化时能实

现同样的操作。

第三代是“智能”机器人，它拥有某些人工智能的特点。在设计及有关运行环境的有效信息之后，它们能确定当时的任务，能解决特殊的问题，并能按照运行条件的变化来改变它们自己的动作。一句话，这种机器人可以是完全自主的，其智能程度按所要完成的功能而有所不同。

属于第三代的机器人的数目还很少，它们的成本相当高且要求复杂的控制系统，这就是这类机器人通常由所谓的混合系统来代替的原因。在混合系统中，人直接在线地参与控制过程。前两代的机器人也要求人的参与，但是，在第一代机器人中，人只限于在相当短的时期内教会机器人完成一组特定的操作，而在第二代机器人中，人只是编制了一个机器人能在瞬时改变的外界条件下完成的特定任务。简言之，人不直接在线地参与这些机器人的控制过程。在外界条件改变时（只是对第一代机器人），亦即机器人要完成的任务有变化时，才要求人的参与。

“智能”机器人目前还很少，也很昂贵，实际中通常使用生物型和交互式的操作机器人。应该指出，控制过程中人的参与有时是由机器人本身的目的所要求的（例如整形机器人或类似的机构）。通常所说的生物型机器人在控制过程中始终要求操作员的参与，这类机器人包括通常所说的遥控机器人、主从机器人和半自动机器人。与此相反，交互式操作机器人在控制过程中只要求操作员周期性地参与操作。操作员与控制机器人的计算机之间的交互可以采用各种不同的形式。这些交互式操作机器人包括监督式控制(Supervisory control)的机器人或对话式控制的机器人。它们被广泛地用于整形、海洋与空间研究和工业上的复杂操作中。