

操作机器人的 实时动力学

〔南斯拉夫〕 M. 武科布拉托维奇 著
N. 基尔强斯基



科学出版社

操作机器人的实时动力学

〔南斯拉夫〕 M. 武科布拉托维奇 著
N. 基尔强斯基

郭尚来 张弘志 译

科 学 出 版 社

1 9 9 2

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是《机器人学的科学原理》系列丛书的第四册,是一本论述机器人实时动力学的专著。书中在总结一般常用数值法和符号法的基础上,全面阐述了数值-符号法的基本概念和各种模型、多项式矩阵的表示及其优化算法以及在计算机上的实现方法。书中通过实例给出了各类实用机器人对不同模型的计算结果。数值-符号法与数值法和符号法相比,运算次数可减少一个甚至两个数量级,大大提高了运算速度,从而增强了这种方法的实用性。

本书可供从事机器人、自动控制和计算机仿真等领域工作的科研和设计人员、高等院校有关专业的师生学习和参考。

M. Vukobratović N. Kirčanski

REAL-TIME DYNAMICS OF MANIPULATION ROBOTS

Springer-Verlag, 1985

操作机器人的实时动力学

M. 武科布拉托维奇 著
〔南斯拉夫〕 N. 基尔强斯基

郭尚来 张弘志 译

责任编辑 鞠丽娜

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

*

1992 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1992 年 3 月第一次印刷 印张: 8 1/4

印数: 1—1 570 字数: 174 000

ISBN 7-03-002703-5/TP·204

定 价: 7.10 元

译 者 的 话

目前,在世界各个领域有三十多万台机器人在执行任务。在工业生产流水线上,在恶劣工作环境中,在人类难于或不能到达的工作地点,机器人可代替人的劳动,从而可提高劳动生产率,增加人类活动范围并节省和保护劳动力。在我国,不少科研单位和高等院校都设有专门研究机器人的机构,虽然在这方面的研究工作起步较晚,但其研究范围涉及机器人的各个方面。目前我国已制造了或正在研制喷漆、焊接、浇注、搬运和装配等各种用途的机器人,开展了水下作业、六足步行、双足步行和智能等机器人的研究,所有这些工作大大促进了我国机器人工业的不断发展。毋庸置疑,在我国经济建设中,机器人将会发挥越来越大的作用。

由于机器人自身结构的复杂性,在机器人动力学建模和自动控制研究中,如何提高计算和运行速度始终是一个重要的研究课题。本书全面系统地论述了这一问题,并取得了可喜的成果。作者在本书中首先分析了(基于拉格朗日方程、牛顿-欧拉方程,以及阿佩尔方程的)各种数值建模法和符号建模法的优缺点,指出由于这两种建模方法运算次数过多,难于满足实时计算和控制的要求。然后在总结这两种方法的基础上,把两者结合起来,即对关节坐标进行符号处理,把参数作为数值处理,这样就构成了数值-符号法。书中阐述了数值-符号法的基本概念,多项式矩阵表示及其优化算法,如何构造各种模型(包括非线性、线性化、灵敏度和近似等模型),以及

利用专家系统在计算机上实现的方法。最后作者以圆柱型、拟人型和节肢型等实用机器人为例，给出各种模型的计算结果。结果表明，数值-符号法与以前方法相比，计算机运算次数减少了一个甚至两个数量级。

本书作者 M. 武科布拉托维奇教授是世界著名学者，现任南斯拉夫塞尔维亚共和国科学院院士、米哈依洛·布宾研究所机器人研究室主任。他长期从事机器人动力学建模、机器人控制、计算机仿真等项科研工作，并取得了显著成果。作者及其同事们出版的《机器人学的科学原理》系列丛书全面论述了机器人学的各个方面，每个分册都独立成书，有各自的主题。我们希望这套系列丛书对我国广大读者会有所帮助和启发。

本书前三章由郭尚来翻译，后两章由张弘志翻译，最后由郭尚来统校。在翻译过程中，得到张启先教授的热情帮助，特在此表示感谢。由于译者水平有限，错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

译 者

1990 年 12 月 15 日

中译本序言

在本系列丛书前六本书的英译本和一部分俄译本出版几年后,现在又出版了我和我的同事撰写的这套丛书的中译本。我要写的这篇序言与英译本序言十分相近。几年来这套丛书在一定范围内已成为普通学校和研究生进行机器人学学习的实用教材。到目前为止,这套丛书在 Springer-Verlag 出版的英文版书有: M. 武科布拉托维奇和 V. 波特柯涅克著《操作机器人动力学》, M. 武科布拉托维奇和 D. 斯托基奇著《操作机器人的控制》, M. 武科布拉托维奇和 M. 基尔强斯基著《操作机器人的运动学和轨道合成》, M. 武科布拉托维奇和 N. 基尔强斯基著《操作机器人的实时动力学》, M. 武科布拉托维奇、D. 斯托基奇和 N. 基尔强斯基著《操作机器人非自适应和自适应控制》, M. 武科布拉托维奇和 V. 波特柯涅克著《操作机器人的应用动力学和计算机辅助设计》, M. 武科布拉托维奇、B. 鲍洛瓦茨、D. 苏尔莱和 D. 斯托基奇著《双足步行机器人: 动力学、稳定性、控制和应用》, M. 武科布拉托维奇和 D. 苏尔迪洛维奇著《操作机器人的动力学及其控制》一书,也将列入这套丛书之内。

本系列丛书的作者认为,书中所介绍的材料能充分完整地反映基础机器人学的论题。

第一本书论述操作机器人的动力学,即介绍建立机器人机构数学模型的计算机方法,

第二本书介绍根据机器人动力学模型来综合非自适应控制律的各种方法,并在各种复杂的综合控制律基础上分析它的稳定性。

第三本书论述建立任意复杂的机器人机构运动学模型的计算机方法。同时还根据机器人运动学和动力学模型,介绍了操作机器人非冗余度和冗余度的轨道合成方法。

第四本书研究在建立操作机器人动力学模型时的实时问题。为此目的,介绍了在建立用符号型表示动力学模型时的原始计算机方法。

第五本书介绍操作机器人的自适应控制算法及其计算机实现。

第六本书讨论如何对操作机器人进行动力学分析,并根据其动力学模型来介绍操作机器人的设计和维数计算方法。书中还同时介绍了在研究操作机器人闭式运动学构形方面的第一批研究成果。

第七本书介绍双足步行机器人和拟人机构方面的成果,并给出了建立双足步行机器人动力学模型的全过程。同时还介绍了双足步行机器人动力学控制的综合方法,并根据系统的动力学平衡分析了综合运动的稳定性。

自从本系列丛书第一本书的英译本出版以来已过去8年了。然而,我高兴地指出,这套丛书中所论述的成果,基本上反映了贝尔格莱德机器人学校当时所取得的研究成果,这些成果大都保持了研究传统机器人学方面的实用性。因此,这套科学书籍当时主要用作研究生学习机器人学的专门教材。今天,我们已拥有大量机器人学方面的书籍,机器人学的理论及应用有了很大发展,在这种情况下,这套丛书越来越多地被采用作为普通学校学习机器人学的教材。

这套系列丛书在机器人学的产生阶段和目前所起的作用就是在机器人力学和控制的研究中，以全新的和现代的方法系统地进行了科学的和专业性的探讨，因此，在机器人学作为科学技术领域中的一门学科而最后形成的体系中，这套丛书做出了自己的贡献。

我希望这套丛书将有益于在各方面为发展机器人学做出自己贡献的尊敬的中国读者和同事们。

我仅以全体作者和我个人的名义向关裕森先生和张弘志副教授致以深切谢意。感谢他们为这套丛书的顺利出版所做出的突出贡献。同时也向在翻译和出版这套丛书过程中付出重大专业性劳动的中国同仁们致以谢意。

M. 武科布拉托维奇教授

1991年3月于贝尔格莱德

机器人学的科学原理

丛书介绍

当代是机器人的时代。研究机器人学要求具有多学科的知识。这使得机器人学本身变成了一门特殊的学科。特别是，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，这和传统的机构不一样，在那里，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结构是可变的，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。这种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。一个操作机器人也是一个动力学耦合的系统的例子，且它的控制本身就是解决动力学问题。

编写本丛书的主要意图在于想要清楚地解释这类系统的动力学和动力学控制规律。参与这一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以及从动力学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而获得的与操作机器人的控制问题有关的结果是本丛书的主要贡献之一。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,作者力图在足够精确的系统动力学模型的基础上,来综合那些便于实现的算法。

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,进而将涉及实际设计操作手机构的内容,并在动力学模型的基础上,用现代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

1982年2月于贝尔格莱德

前 言

本书是《机器人学的科学原理》系列丛书的第四本书。前两本书确立了研究机器人动力学和控制的基础知识。其中第一本书是专门研究可动空间机构的动力学，第二本书是论述操作机器人的动力学控制问题。

在前两本书中，我们描述了用来求解设定的机器人动力学方程的计算机辅助递推方法，在这本专著中介绍了建立机器人动力学的新方法。编写本书的目的是利用现代微型计算机来完成实时模型的计算。本书介绍的新方法称为机器人建模的数值-符号法或解析法。我们将要表明，生成机器人的解析模型将为机器人的实时应用开辟极好的新途径。我们还综合了操作机器人自适应和非自适应控制的算法，这是一件极有意义的工作。

应当指出，通过对机器人方程进行离线的计算机辅助预处理可提高计算效率。计算时，规定的机器人参数必须预先给定。因此，机器人结构（几何和动力学参数）发生每一显著变化后，必须重复离线步骤。这就是数值方法在研究机器人系统动力学特性时总占有一定地位的原因。

这本专著共包括五章。

在第一章中对机器人系统开式机械构形数学建模的、面向实时性发展的计算机辅助方法做了评述。我们介绍了由Hollerbach, Renaud, Kahn, Kane 和其它作者完成的各种方法，这些方法或以拉格朗日二阶方程，或以牛顿-欧拉方程，或

际应用之间的联系,或至少缩小它们之间的距离,作者力图在足够精确的系统动力学模型的基础上,来综合那些便于实现的算法。

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,进而将涉及实际设计操作手机构的内容,并在动力学模型的基础上,用现代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

1982 年 2 月于贝尔格莱德

以 Appel 方程为依据,都属于一类数值方法。

在第二章中介绍一种用闭式表示开环机构运动方程的新公式。可以证明,这种模型具有很紧凑的形式,能清晰透彻地了解机器人几何学、运动学和动力学参数的变化情况。另外,还介绍了构造线性化闭式模型的算法,这些算法对机器人稳定性检验,以及对围绕规定轨线运动的系统施加小摄动时的控制综合都有重要意义。

在第三章中描述了机器人数值-符号建模的新方法。引入了有关概念和定义,给出了系统变量的数值-符号表示法,还引入了描述任意系统变量的联合矩阵(“多项式矩阵”)的概念。

在第三章中还介绍了多项式矩阵的完备代数,并着重研究了多项式矩阵的优化问题。这些研究成果可用来建立生成机器人数值-符号模型的算法,还可用来构造机器人线性化的、灵敏度的和近似的模型。

在第四章中描述了解析模型的优化计算和生成实时运算程序码的方法。详细说明了多项式矩阵的计算,并介绍了使数值运算次数最小的算法。另外还介绍了利用“专家程序”求解问题的最新方法。专家程序的任务是用所需程序设计语言“书写”机器人模型。

第五章是以实际机器人为例具体说明上述所有结果,实例中的机器人是在工业工艺过程中执行任务的实际机器人。机器人的选择是按其机构的结构进行的。第一种机器人具有拟人结构,第二种机器人具有圆柱型结构,而第三种机器人具有节肢构形。选择这些结构说明,数学模型的复杂程度取决于机器人结构的复杂程度。在每个例子的结尾,我们都说明了数值-符号模型优化计算的方法,这包括对第四章引入的

所有概念,例如优化计算序列、基本计算图、计算图的矩阵表示等所做的说明。利用专家程序生成程序码要给予特别注意。从得到的程序码可准确确定浮点乘法和加法运算的次数。这对微型计算机实现来说是非常重要的。

和这部系列丛书的前两本书相同,本书是为研究生学习机器人课程准备的;也是为从事应用机器人学,尤其是从事研究机器人系统动力学,综合控制算法,以及从事用微型计算机实现工业机器人实际和复杂任务的工程师们准备的。作者还认为,将这本机器人专著用于进入机器人领域课题研究阶段的研究生的学习则不会有太大困难。

作者感谢 G. Aleksić 小姐帮助把本书译为英文。这里还要特别感谢 V. Ćosić 小姐,她仔细并出色地打印了全文。

作 者

1984 年 10 月

南斯拉夫

贝尔格莱德

目 录

绪论	1
第一章 机器人计算机辅助建模方法综述	8
1.1 引言	8
1.2 基于拉格朗日方程的方法	9
1.2.1 Uicker-Kahn 法	10
1.2.2 S. Mahil, S. Megahed 和 M. Renaud 算法	16
1.2.3 R. Waters 和 J. Hollerbach 算法	22
1.2.4 Vukobratovič-Potkoniak 递推法	24
1.3 基于牛顿-欧拉方程的方法	26
1.3.1 Vukobratovič-Stepanenko 法	27
1.3.2 Huston-Kane 法	33
1.3.3 一种新的递推法	35
1.4 基于 Appel 方程的方法	39
1.5 符号法	42
1.6 数值-符号法	44
第二章 建立机器人闭式动力学模型的计算机辅助法	56
2.1 引言	56
2.2 基于牛顿-欧拉方程的模型	60
2.3 闭式动力学模型	73
2.4 动力学模型矩阵特性: 对称性、正定性和反对称性	84
2.5 闭式线性化模型	89

2.6 闭式灵敏度模型	96
附录 2.1	102
附录 2.2	107
第三章 计算机辅助生成机器人数值-符号模型	110
3.1 引言	110
3.2 变量的数值-符号法	113
3.3 多项式矩阵代数	119
3.4 多项式矩阵的优化	123
3.5 非线性模型	127
3.6 线性化和灵敏度模型	131
3.7 近似模型	136
附录 3.1	141
第四章 模型优化与实时程序码的生成	146
4.1 引言	146
4.2 多项式矩阵的优化计算	147
4.3 实时程序码的生成	159
附录 4.1	164
第五章 实例	167
5.1 引言	167
5.2 圆柱型机器人	168
5.3 节肢机器人	183
5.4 拟人机器人	207
5.5 机器人解析模型的微型计算机实现, 运算时间 和存储器的要求	220
附录 5.1	237
参考文献	242
名词索引	247

绪 论

由于机器人、飞行器和复杂液压系统等大规模机械系统的数学模型具有显著的非线性和复杂性,因此应用控制理论研究这类系统是极为困难的。本书研究的对象是工业机器人系统,为达到位置的高精度要求和提高运动速度,不可避免地要应用控制理论,并且需要探索新的控制算法。到目前为止,适用于局部简化的,或甚至在线运行的精确数学模型的某些控制方法已达到相当先进的水平。然而对机器人的在线控制来说,对每一个采样周期都要计算模型方程,因为大多数机械操作手的共振频率约为 10Hz,所以采样频率一般不应低于 50Hz。然而,用现代微型计算机在 20ms 时间内,实时地解决操作手动力学方程问题则是相当困难和复杂的。

本书中将提出解决上述问题的新方法,在阐述这些新方法之前,让我们先叙述几个在机器人建模方面目前所得到的结果。根据不同的准则可把这些结果系统化。因此,可按建立运动方程的力学规律对所用方法进行分类,以此作为准则,我们就可按拉格朗日方程、牛顿-欧拉方程、Appel 方程和其它方程来划分所用方法,也可把所用方法能否求解动力学正问题和逆问题的性质作为另外的分类准则。所谓动力学的正问题指的是,已知驱动力(转矩),确定机器人的运动;而动力学的逆问题指的是,给定操作手的运动,确定驱动力。很明显,能给出动力学两种问题解的方法具有特别重要的意义。建立模型所需的浮点乘法/加法的运算次数也可作为比较所用方