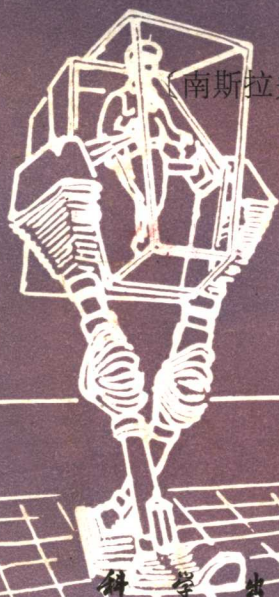


操作机器人非自适应 和自适应控制



(南斯拉夫)

M. 武科布拉托维奇
D. 斯托基奇 著
N. 基尔强斯基

科学出版社

操作机器人非自迫应 和自适应控制

M. 武科布拉托维奇
(南斯拉夫) D. 斯托基奇 著
N. 基尔强斯基

刘中仁 译

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是《机器人学的科学原理》系列丛书的第五册，是一本系统论述操作机器人负载或参数大范围变化时各种非自适应和自适应控制问题的专著。书中重点论述了“最优调节器”、“逆问题”方法、力反馈以及解耦控制和分散控制等非自适应控制算法，还专门介绍了机械手的自适应控制。

本书理论联系实际，除了阐述通用控制器原理和用现代微型计算机实现的控制算法外，还提供了大量有关真实机械手的研究结果以及便于进行计算机辅助设计的机器人控制综合软件包。

本书可供从事机器人控制理论与设计的科研人员、工程技术人员以及高等院校与自动控制有关专业的教师、研究生及大学生学习和参考。

M. Vukobratović D. Stokić N. Kirčanski

NON-ADAPTIVE AND ADAPTIVE CONTROL OF MANIPULATION ROBOTS

Springer-Verlag, 1985

操作机器人非自适应 和自适应控制

M. 武科布拉托维奇
【南斯拉夫】D. 斯托基奇 著
N. 基尔强斯基

刘中仁 译

责任编辑：赵丽娜
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

*

1993 年 4 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1993 年 4 月第一次印刷 印张：12 5/8

印数：1—1400 字数：282 000

ISBN 7-03-003259-4/TP·241

定价：17.00 元

译 者 的 话

本书是《机器人学的科学原理》系列丛书比较全面、系统地论述机械手控制的专著。本册书中最突出的特点也是成功之处在于，它不仅深入浅出地论述了较前沿的处理大范围变参量被控对象的自适应控制，还多方面创造性地提出了既有一定的控制理论意义又有巨大实用价值的处理大范围变参量的机械手对象的非自适应控制，因而这是一本值得向所有自动控制专业人员和自动化工程技术人员尤其是机器人控制专家、学者推荐的好书。

本书第一章内容是本丛书第四册内容的缩写。清华大学自动化系郭尚来副教授对第一章进行了校阅，由于本章内容涉及机械问题较多，译者还邀请了清华大学机械系教授何德誉、副教授巢克念进行了校对。本书第二章内容丰富、篇幅也较大，译者邀请深圳大学费跃农博士对其大部分内容做了初译。译者在此向他们四位以及其他对译稿提出过指正并给予过帮助的清华大学教授、研究生、大学生深表谢意。

由于译者水平所限，错误及不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

于清华大学

1991.12.13

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 N. 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

1982/5-1

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

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

本书内容涉及操作机器人控制领域的最新成果。从某种意义上说,这是 Mihailo Pupin 研究所机器人学研究室在机器人系统动力学控制领域多年研究成果的一个总结。正如本丛书第二册中所表明,这些成果都离不开空间活动机构的动力学数学模型,使用这些数学模型则为设计出动态特性好的操作机器人控制提供了可能性。

本书首次提出并解决了机器人控制中的许多新问题。与第二册相比有三个新的重要特点。

一个新颖之处是,针对负载参数大范围变化综合出了非自适应控制。这样,总体系统就具备了实际稳定性。这种控制综合方法已能满足目前工业机器人应用的实际需要。

本书的第二个特点是,针对参数不能事先具体规定如何变化的情况,提供了基于分散控制结构的有效的自适应控制算法。客观一点说,这还不是目前工业机器人学的迫切问题,但在将来的工程实践中,不管个别参数有还是没有变化,当对这些参数需分段辨识时,一定会采用自适应动态控制算法补充非自适应控制。

本书的第三个特点是,介绍了综合六个自由度操作机器人控制律的软件包。在本丛书第二册中曾预告过将在本册中详细说明这个软件包。这些细节包括:机器人数据输入和控制任务的详细说明,轨迹综合,校验完全非线性机器人模型的实际稳定性,总体系统仿真,最终选择合适的控制律和微机实现。为了体现本书这一新特点,我们增添了与非自适应和自

适应控制数值计算有关的结果，这是经过复杂而详尽的分析获得的。尤其是，这还使我们能对操作机器人动态控制提出通用控制器的概念。

本书共有五章。第一章介绍了计算机辅助生成解析形式的机器人动力学模型。为了有效地运用机器人机构动力学模型综合控制算法，本章还阐述了动力学模型的解析表示和实时程序的编程方法。应该说明，在这套丛书的第四册中已详细讨论了操作机器人实时动力学的结构，但为了使本册书自成体系，在这里仍对其重要内容重新作一简短描述。

第二章讨论了具有变参量的操作机器人的非自适应控制问题。与第二册相比，本书所解决的问题是相对大负载（通常，在工业操作中这是使用最多的参量）变化的鲁棒（robust）控制。本章还综述了各种非自适应控制算法，进而可深入了解在控制综合中使用的各种方法。这些方法包括最优调节器，“逆问题”方法，力反馈，以及解耦和分散控制。本章详细阐述了综合局部控制器的各种算法，并特别注意了各种最优伺服系统，鲁棒伺服调节器以及基于极点配置方法的调节器。本书中提出了一种用以分析局部控制器的变参量机器人实际稳定性的方法；介绍了或者通过力反馈或者通过在线计算的机器人动力学模型实现的总体控制；还详细阐述了既可综合局部控制又可综合总体控制的算法，这些算法可直接采用第四章中介绍的计算机辅助控制综合软件包来实现。

第三章专门介绍机械手的自适应控制，并讨论了两个概念，一个是集总机器人模型的概念，另一个是分散机器人模型的概念。在第一个概念范畴之内讨论了自校正控制策略的应用，基于超稳定性理论的算法，以及一些基于李雅普诺夫稳定理论的拟梯度算法。但是对于实际应用来说，分散控制算法比集总控制算法更重要，因为它的数值计算复杂性比集总控

制算法低得多。

第四章提供了在前几章中已介绍过的理论结果为基础的机器人控制综合软件包,并详细说明了软件包的所有程序块,例如,机构的运动学和动力学参数的详细说明,执行器参数,操作任务等。

第五章介绍了使用成本低的现代微型计算机实现控制的算法,阐述了通用控制器(即能自动生成给定的机器人模型的控制器)的原理,还介绍了用控制系统对机器人进行参数辨识的例子。在本章最后还提供了大量有关真实机械手的研究结果,用以说明在第二章和第三章中阐述过的各种控制律的灵活性。这些内容可使读者深入了解实现各种类型控制的可能性,以及对机器人实行动态控制可能得到的益处。

本书可供机器人学理论与应用领域的所有研究人员,机器人设计者,以及机器人学专业的高年级学生使用。本书所需的理论基础包括线性和非线性系统理论的基本知识以及机构动力学的基本知识。在本书中采用并发展了大规模非线性系统的现代理论的方法,但是,对不太熟悉这个理论和方法的读者来说,也容易看懂本书并运用其结果。

作者感谢 G. Aleksić 小姐帮助准备了本书的英文版。我们还特别感谢 V. Ćosić 小姐细心和出色地打印了全书。

作 者

1985年5月于贝尔格莱德

目 录

第一章 计算机辅助生成解析形式的机器人动力学模型	1
1.1 引言	1
1.2 机器人操作手闭合形式的动力学模型	6
1.3 动力学模型变量的解析表示	12
1.4 实时程序的编程	20
1.5 实例	23
第二章 变参量操作机器人的非自适应控制	33
2.1 引言	33
2.2 操作机器人的数学模型和控制任务的定义	35
2.2.1 数学模型	35
2.2.2 控制任务的定义	42
2.3 非自适应控制算法综述	51
2.3.1 最优控制综合	54
2.3.2 最优调节器	56
2.3.3 “逆问题”方法	65
2.3.4 力反馈	70
2.3.5 解耦控制	77
2.3.6 分散控制	82
2.3.7 其它方法	84
2.4 局部控制器的综合	85
2.4.1 最优伺服系统	93
2.4.2 鲁棒伺服控制器	97
2.4.3 用极点配置法综合局部控制器	103

2.4.4 局部控制任务	105
2.5 操作机器人的稳定性分析	128
2.6 总体控制综合	150
2.7 实例	174
2.8 小结	179
附录 2. A 执行器模型复杂性对机械手控制综合的影响分析	180
附录 2. B 操作机器人的实际稳定性	191
第三章 自适应控制算法	207
3.1 引言	207
3.2 机器人操作的集总自适应控制	212
3.2.1 自校正控制策略	212
3.2.2 集总参考模型跟随控制	224
3.2.3 间接的集总自适应控制	233
3.3 用于机械操作手的分散自适应控制策略	235
3.3.1 自校正局部控制器	235
3.3.2 分散参考模型跟随控制	241
3.3.3 间接的分散自适应控制	246
第四章 计算机辅助控制综合	260
4.1 引言	260
4.2 计算机辅助综合软件包	261
4.2.1 建立机械手结构数据的程序块	269
4.2.2 计算期望运动轨迹的程序块	270
4.2.3 建立动力学参数的程序块	272
4.2.4 建立执行器数据的程序块	272
4.2.5 标称动力学综合的程序块	277
4.2.6 建立控制任务的程序块	280
4.2.7 局部控制综合的程序块	282
4.2.8 分散控制稳定性分析的程序块	285

4.2.9	总体控制综合的程序块	288
4.2.10	自适应控制综合的程序块	290
4.2.11	离散时间控制综合的程序块	291
4.2.12	仿真程序块	292
4.3	实例	294
4.4	小结	312
第五章	控制算法的实现	315
5.1	引言	315
5.2	通用控制器原理	317
5.3	控制律的数值计算复杂性	326
5.3.1	动力学模型的数值计算复杂性	327
5.3.2	非自适应分散控制律的数值计算复杂性	336
5.3.3	自适应控制律的数值计算复杂性	340
5.4	参数辨识	345
5.5	非自适应控制律的微处理机实现	354
参考文献		371
名词索引		383

第一章 计算机辅助生成解析形式的 机器人动力学模型

1.1 引 言

把一般控制理论应用于复杂的机械系统,例如用于机器人、飞行器、复杂的液压系统等是一个很困难的问题,因为这些系统的数学模型具有显著的非线性和复杂性。对于本书中将论述的工业机器人来说,为了得到高定位速度和高精度,不可避免地要应用这一理论并开发新的控制算法。迄今为止,若干在在线运行中采用的部分简化了的甚至精确的数学模型的控制原理已达到先进水平。在线控制中,常常必须反复计算模型方程,由于大多数机械的谐振频率是 10Hz 左右,所以采样频率以不低于 50Hz 为好。然而,即使借助现代微型计算机,实时地(即每隔 20ms 或更短)建立机械手动力学方程的问题仍是相当困难和复杂的。

为了阐明解决我们在本章要探索的这个问题的新的途径,我们先叙述迄今所得到的机器人建模的若干结果,然后按不同的准则把这些结果系统化。这样,可以根据形成其运动方程的力学定律把这些方法区分开。假如以此作为准则,我们可以把这些方法区分为基于拉格朗日方程、牛顿-欧拉方程、阿沛尔方程以及其它方程的各种不同方法。判断一种方法是否具有求解动力学正问题和逆问题的解的性能可以有另一种准则。动力学的正问题是已知驱动力(力矩)确定机器人的运动,而动力学的逆问题是已知运动确定驱动力。显然,能

使这两种动力学问题都得到解决的方法是特别重要的。构造模型所需的浮点乘法(除法)和加法(减法)次数也是比较各种方法的又一个准则。从在线应用观点看,这个准则肯定是最重要的准则。

J. J. Uicker 发表了既可解决动力学的正问题又可解决动力学逆问题的一类拉格朗日方法的第一类结果^[1]。由于这种方法只涉及了某类闭环机构, M. Kahn 推敲了建立开环运动链模型的方法^[2]。L. Woo 和 F. Freudenstein^[3] 以及 A. Yang^[4] 通过引入螺旋计算 (screw-calculus) 修正并初步公式化了这个方法。N. Orlandea 和 T. Berenui 以机器人动力学分析的程序包形式给出了这个方法的一个程序实现^[5]。S. Mahi^[6] 和 M. Renaud^[7] 从减少数值运算次数的角度提出了这个方法的改进方案。这些算法的共同特点是它们都不使用递归关系而使用表示成模型矩阵诸元的闭式表达式。然而, J. Hollerbach^[8] 指出在这些方法中乘法和加法的次数取决于 n (n 是自由度数), 还指出对于三个自由度的机械手需要超过 5000 次乘法和大约同样多次数的加法。对于六个自由度的机械手来说, 运算次数超过 10 倍。容易证明用当今的微型计算机难于实时实现这些方法。换句话说, 一个一般水平的新式 16 位微型计算机(带有一个算术处理器或合适的浮点硬件支持)用大约 0.1ms 时间就能实现一次乘法和一次加法运算。这也就是说, 用 20ms 时间就可实现大约 200 次浮点乘法和加法运算, 但这是远远小于上述方法所需的运算次数的。

M. Vukobratović 和 V. Potkonjak^[9] 提出了一个用递归公式构造动力学模型矩阵的算法。尽管与 Kahn-Uicker 方法相比运算次数减少了许多次, 但这个方法还是难于实时实现, 因为对于一个典型的机械手结构来说, 它需要好几千次浮