

操作机器人动力学

理论与应用

南] M. 武科布拉托维奇 著
V. 波特柯涅克



科学出版社

操作机器人动力学

理论与应用

[南] M. 武科布拉托维奇 著
V. 波特柯涅古

周起钊 殷金生 译

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书是“机器人学的科学原理”丛书之一,是一本论述机器人动力学的专著,重点介绍建立和求解机器人主动机构数学模型的计算机辅助方法,操作手动力学的计算机仿真算法,具有弹性构件的操作手动力学以及评价和选择工业机器人的动态方法。本书理论联系实际,系统而又具体地论述了机器人动力学的各种计算机仿真算法及其理论基础,同时给出了各类操作机器人的计算实例。

本书可供从事机器人动力学及其计算机仿真研究的科研人员 and 高等院校有关专业的师生参考。

M. Vukobratović V. Potkonjak

DYNAMICS OF MANIPULATION ROBOTS

Theory and Application

Springer-Verlag, 1982

操作机器人动力学

理论与应用

[南] M. 武科布拉托维奇 著
V. 波特柯涅克

周起钊 殷金生 译

责任编辑 袁放尧

科学出版社出版

北京东黄城根北街10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

1990年9月第一版 开本: 787×1092 1/32

1990年9月第一次印刷 印张: 9 5/8

印数: 00001—1 100 字数: 213 000

ISBN 7-03-000018-3/TP·2

定价: 9.70 元

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。一个操作机器人也是一个动力学上耦合的系统的例子，且它的控制任务本身就是动态的任务。

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规则和动态控制规则。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,进而将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. 武科蒂拉托维特

贝尔格莱德

1982年2月

序 言

这本专著是以“机器人学的科学原理”命名的丛书中的第一本书。本书的目的在于，从应用于复杂运动的角度出发，研究主动机构的动力学，以及具有某些优化功能的操作机构的计算机辅助设计。一类新式机构的迅速发展，有助于它们在各种环境中(从水下到宇宙空间)的应用，这类机构可以叫做主动机构。由于某些特点的缘故，无论在力学(运动学和动力学)方面还是在算法的综合方面，都要求对这类机构给予非常仔细的描述，而上述算法能在不够确定的操作条件下，精确地跟踪给定的运动。为了快速地、甚至是实时地解算系统的动态，为了基本上消除因“人工地”建立数学模型而产生的误差，本书将初步地提供一些方法，用以自动建立主动空间机构运动的动力学方程。除了这些与计算机有关的方法以外，本书还将论及一些方法，它们在次序上先于计算机方法，这主要是为解决刚体动力学的各种问题而发展起来的。

如果我们希望系统地建立一门学科，称它为机器人动力学，我们就必须追溯某些研究团体和个人。由于他们在仿真运动的综合和控制方面解决了实际问题，他们对逐步形成这门学科作出了贡献。武科布拉托维奇(Vukobratović)和朱里契奇(Juričić)从1968年开始研究仿真双足步态综合和拟人机构动力学。实际上，与此同时，R. Mc Ghee 和 A. A. Frank(美国)研究了四足机器(“加利福尼亚马”)的动力学问题(1970年)。随后，D. E. Okhotsimski(苏联，在1971年)和他的助手们广泛而有独创性地研究了动力学和控制算法的综

合, 其对象为具有人工智能部件的多足运动系统。几年以后(1974年), V. V. Beletskii (苏联)和他的助手们, 以及 V. B. Larin (苏联)在双足运动领域内继续进行系统地研究。虽然 Beletskii 实际上沿用了武科布拉托维奇的半逆解法, 但他随后把它改进为拟人步态综合的全逆方法。Larin 采用了贝尔格莱德研究所的全局控制方案, 对于把步态综合最优化方法用于较简单的拟人模型中作了尝试。

与此同时, 为了应用于操作机器人, 空间主动机构的动力学和控制方面的研究工作有了发展。这里应该提到的第一个人是现代机构理论的奠基者 I. I. Artobolevskii (苏联)。其次是 Yu. A. Stepanenko (苏联), 他也是首先研究对于开运动链的动力学方程建立计算机算法的人之一。在操作机器人的动力学和控制领域内作出积极贡献的人中, 还应该包括 E. P. Popov 和他的助手 N. A. Lakota, A. F. Vereshagin, V. S. Kuleshov, A. S. Yushenko 和 M. S. Medvedov, 以及 V. S. Yastrebov 和 F. M. Kulakov。

这里特别应该提到 R. Paul (美国)和他的助手 J. Luh, M. Walker 以及其他人的工作。他们的工作是在建立操作系统数学模型的相互制约的方法的基础上进行的。在方程的分析表达式的基础上, M. Renaud (法国)对操作手的动力学分析作出了贡献。J. Hollerbach 和 W. Silver (美国)研究了操作手动力学, 他们采用了递推关系, 使之适合于计算机建立操作系统的数学模型。

在构造空间机构数学模型的计算机方法方面, 几乎是与苏联取得新成果的同时, 在贝尔格莱德(南斯拉夫), Mihailo Pupin 研究所开始了系统研究自动(用计算机)建立拟人系统的动力学模型。这些算法后来发展成为用计算机建立任何复杂空间机构的数学模型的通用程序。因此, 除了前面说过的,

基于一般机构理论之上的、建立数学模型的方法以外,本书的作者利用拉格朗日第二类方程和吉布斯-阿沛尔方程详细叙述了描述运动链动力学的一般方法。在解决适用于机器人学的各类运动的综合和控制的实际任务时,建立主动机构数学模型的方法得到了发展,其结果是建立了特殊的非常规的系统动力学与规范运动(functional motion)之间的关系。因此这类动力学可以叫做规范动力学(functional dynamics),它与机器人学中规范运动的综合有联系。因为规范动力学表现为计算驱动力,所以在这些问题中,“理论”动力学与动力学控制在概念上有些相同。特别是如果人们对两阶段次最优控制综合的概念有所了解的话,其第一阶段表现为在无干扰的条件下,对规范运动的综合。

本书包括五章。第一章介绍和解释空间主动机构的各种形式及其分类,引入一些基本假定,以便于研究操作手和机器人的规范运动。对于空间主动铰链连接的多刚体系,则简要叙述建立其动力学方程的分析方法。第二章是计算机方法,用以建立空间主动机构动力学的数学模型,其基础首先是普遍定理方法(按时间顺序),然后是拉格朗日第二类方程,阿沛尔方程和加速度的吉布斯函数。这一章是本书的中心部分,因为它对于现有的、自动建立任意空间构造的、开运动链的动力学数学模型的方法,第一次给出了透彻的分析。第三章是把第二章的方法在典型的操作任务情况下,应用于规范运动的分析。这一章详细叙述了各种形式的功能块,当把它们应用于具有不同自由度的操作机构时,就能解决各类操作任务。在这一章中,还给出了各类操作机器人的规范运动综合的例子。第四、五章是动力学模型在操作机构综合任务中的应用。第四章给出了一些弹性操作手动力学的结果。第五章提供了一些与计算机有关的方法,为了设计操作机器人,并使之符合动

力学性能和最优特性的要求，这就要考虑各种指标和所加的约束。

在本书中，第一次公布了有关建立空间主动机构的完整的数学模型的材料，它们主要是用于操作机器人的。应该着重指出，这样的模型，在某些特殊条件下，在运动系统综合的情况中也可能被应用。本书将首先提供一个基础，为那些开始注意应用机器人学的研究者和研究生们认真地研究机器人动力学服务。

最后，作者高兴地借此机会感谢 D. 朱里契奇教授的工作，他实际上是本书的第一位作者，因为在十三年前，他发表了应用机器人动力学的第一篇论文¹⁾，当时也是第一次阐述了机器人的两阶段控制综合的概念。作者还要感谢 D. Hristić 博士，他研究和发展了运动和操作机构综合的概念。

除了在本书中提到的那些成果外，还应该提到 D. Stokic 博士在组合过程(assembly process)动力学方面的成果。这些成果有助于建立一种有效的算法，使之适合于上述操作任务的最后状态的动态控制。我们希望借此机会提到 V. Ovetković 博士，在实时计算操作手动力学和建立操作系统的近似模型方面，她取得了一些有用的结果。还应该提到下列理科硕士：N. Kirčanski, M. Kirčanski 夫人，I. Nikolić 和 B. Borovac，他们在下列几方面得到初步成果，即近似的和精确的动力学方面，模型的计算机线性化方法，操作机器人执行机构动力学响应的分析，这些成果扩大了机器人动力学和空间主动机构的研究范围。此外，D. Surla 博士在双足步态动力学方面获得了一些新成果。上面提到的这些成果，将包含在本丛书后面的几本书内。

1) Vukobratović M., Juričić D., "Contribution to the Synthesis of Biped Gait", IEEE Trans. On Biomed. Engn., BME, Vol. 16, Jan. 1969.

作者感谢 D. Hristić 博士和 G. Aleksić 小姐，他们帮助我们准备了本书的英文译本。感谢 T. Flannagan 博士对英译本的修改。最后，我们要特别感谢 V. Ćosić 小姐，为本书认真仔细地打字。

目 录

第一章 机器人和操作手动力学概论	1
1.1 引言	1
1.2 机器人中主动机构的种类及其特性	5
1.3 过去的结果	14
第二章 建立和求解机器人主动机构数学模型的计 算机辅助方法	23
2.1 引言	23
2.2 计算机建立并求解数学模型的基本思想	24
基于动力学普遍定理和牛顿-欧拉方程的方法	28
2.3 普遍定理法	28
2.4 分块矩阵法	45
2.5 牛顿-欧拉方程法	61
2.6 欧拉角方法	66
基于拉格朗日方程的方法	81
2.7 拉格朗日方程法	81
基于高斯原理和阿沛尔方程的方法	109
2.8 高斯原理法	109
2.9 阿沛尔(Appel)方程法	120
2.10 对于闭链动力学一些问题的讨论	133
第三章 操作手动力学模拟和功能运动的控制	140
3.1 基本思想	142
3.2 一般的模拟算法	144
3.3 功能作业的种类和调整块	146
3.4 各种调整块的详细描述	149

• 致 •

3.5	其他动力学特性和数值的计算	161
3.6	实例	168
3.7	操作运动规范动力学的综合	176
3.8	完整的动力学模型	179
3.9	促动器系统的数学模型	182
3.10	规范动力学综合的模拟算法	185
3.11	综合的例子	187
3.12	促动器模型复杂性的影响	192
3.13	功能运动最优化综合的一种方法	195
第四章	具有弹性部件的操作手动力学	205
4.1	引言	205
4.2	基本概念和假设	207
4.3	规范动力学的特性	211
4.4	弹性振动模型的推导	214
4.5	影响系数	224
4.6	方法的结果及其应用	229
4.7	实例	231
第五章	评价和选择工业操作手的动态方法	234
5.1	引言	234
5.2	动态指标的定义	235
5.3	约束的定义	243
5.4	实例	244
参考文献		280
名词索引		288

第一章 机器人和操作手动力学概论

1.1 引言

近几年来,在应用力学和工程系统的控制中出现了一个新的技术学科,该研究领域可称为“机器人学”。有许多迹象表明它确已存在,对此我们只能略加叙述。一方面人们已经亲眼见到广泛应用于工业上的各种级别操作系统的迅速发展,另一方面机器人和操作手的理论在许多通常对实际操作装置或机器人的设计者和创造者不产生任何重大影响的研究中心里发展起来。因此,在目前实践和过于学究式的纯理论之间存在着相当大的距离。

近来,由于对最优工业操作手和最优控制算法的需要,研究工作已经更加直接地面向理论成果的有效应用。工业操作手和机器人已越来越广泛地得到应用,它们的发展对新的理论方法提出了要求。当主动机构¹⁾这个词用于机器人学时,其含义是机器人机构,这类机构的广泛应用为理论方法的研究开辟了一个新天地。远在1937年,空间机构动力学的第一篇论文由 N. G. Bruyevich²⁾ 发表。在他的论文中将动静法用于空间杆件机构的动力学分析,由于当时不可能利用电子计算机,又由于对于大量机构构件的分析计算非常复杂,所以这篇论文只有理论方面的意义。随后的许多年,空间机构动力学的研究工作没有多大进展,其原因很多,尤其是因为有效的运动学分析方法没有发展起来。稍后一些年,更多的注意力就被放

1) 是一种每个自由度都可以分别驱动的机构。

2) VVA Zhukovskiy 报告, Vol. 36, 87, 1937.

到对空间机构特别是其动力学研究上去了。为了试图找出推导机构动力学方程的解析方法而产生了几种方法，这些方法趋向于手工推导数学模型，尽管其中有一些可以针对计算机而加以程序化。这些方法的共同特点是它们最初在各种机构而不是在机器人学方面发展起来的，后来它们的作者才致力于将相同的方法用于机器人机构的分析中去。

主动机构动力学领域中巨大的进展是出现了所谓建立和求解主动机构数学模型的自动化方法（此方法将在本书第二章中详述）。这些方法的主要优点是建立和求解数学模型（即动力学方程组）的大部分工作是由计算机来完成的，当然这只有在现代计算机已经进入科学研究的应用以后才有可能。出现这些自动化方法有几个原因，首先，即使机构只有很少的自由度，用手工写出它的动力学方程也是非常困难的，在冗长的推算过程中造成失误的可能性是不能略去不提的。数学模型的导出是如此笨拙以致毫无实际应用价值，用手工求解这些模型是不可能的，而且用计算机求解的编程工作总是非常复杂。最后必需强调，经常需要对机器人的大量不同的构造进行分析，对此采用手工方法是不可能的，因此转为由计算机自动完成从建立数学模型到求解的整个过程的想法就自然地产生出来了。研究者的工作只要准备好有关机构构造的输入数据，因为自动化方法对于任意构造都行之有效，作为计算机的输出，得出了动力学正问题和反问题¹⁾的解（这取决于对工况的设置）。为了能够显示出这些方法的全部效率，对于机构运动学和动力学的考虑方法必需作某些改变，也就是说我们首先要关心导出递推形式的运动学和动力学关系式。用手工写出的这些递推式并不具有紧凑的标准形式，但是这一

1) 正问题（直接问题）是已知机器人机构的运动求造成此运动的驱动力和驱动力矩，反问题则是已知驱动求运动。

点对于一种高效率的数字计算机运算来说是必不可少的。

现在让我们更为详细地来考虑一下功能动力学问题，人们将会看到这个词完全适合于机器人和操作手动力学。一般说来在主动机构动力学分析方法中使用的是广义坐标。如果对于已知的驱动力和力矩求出了由广义坐标表示的相应的运动，或者对于已知的运动求出了相应的驱动力和力矩，那么从纯理论的观点看来动力学问题就解决了。然而对于实际问题来说这样的解是不够的，因为人们需要考虑所谓的功能机器人运动，这是一种适合某种特殊要求的运动。现在让我们来考虑工业操作手的情况，操作手的作业即它的功能运动可以用几种不同的方式来规定，例如可以给定支配操作手端点的运动规律以及抓手在空间的方位要求。在机构所有可能的运动中我们只对这种功能运动发生兴趣，进一步必需要得到对这种功能运动的驱动方法，所以我们经常谈的是功能动力学。

让我们分析一下主动机构动力学和对于这种机构进行控制之间的关系。当考虑一个功能运动时(例如一个操作手作业)，其基本问题是确定促动器(它能产生所期望的操作手运动)的驱动力和力矩。对功能动力学的考虑与控制(或者相反)是紧密联系着的这一点现在就非常清楚了，因此引进动力学控制或动态控制这个名词就是有意义的，可以从几个方面来看动力学和控制之间的联系。首先对功能运动的动力学分析，特别是模拟算法提供了计算规范动力学的可能性，在此基础上对于无扰动工作状态完成控制的综合¹⁾。这主要是应用在工业机器人方面，它们有完全确定的作业要求而且是在通常不变的已知工作条件下运行的。如果存在某种程度的不确定性(例如水下爆破操作或类似的操作)则控制问题的提法

1) 如果采用机器人和操作手的两阶段控制概念^[1-4]则在第一阶段即所谓无干扰状态阶段实现动力学规范状况的计算。

就不同了,在这种情况下处理方法是不同的。关于动力学和控制之间的联系在本引言稍后一些还会要再多说几句。这里我们要提出一个基本问题,研究主动机构动力学的用途和目的是什么?其一是与控制相关的,这一点已经在前面讲过(以后还要更全面地来讨论),其二是为了发展优化设计方法以及发展设计工业操作手的自动化过程,第二个目的仅仅是在最近才显示出来,而且越来越引起人们的注意。让我们对本专著中这些有显著特色的问题说上几句,实际上到目前为止,在机器人机构部份的设计工作中对于运动学结构的选择,不同参数(尺寸、质量等等)的选择,以及促动器的选择是一个自由估算的课题,通常是依靠经验而缺乏任何的规律和方法,因此现有操作手的许多参数特别是马达的功率经常是有富裕的,从能量消耗或者运行速度的观点来看这样的装置根本谈不上最优。于是就提出了这样的要求:对于操作手构造的综合选择要有一定的指标和方法,本专著的主要目的是研究这些指标和方法。

现在来讨论机器人数学模型自动公式化的另外一方面,这就是实时问题,现代计算机处在建立数学模型(即操作手动力学的实时计算)的前沿,但是提出了实现实时计算的目的问题。对于这个问题,如果想要给出一个充分简单而又充分精确的回答,那么可以说自动(计算机)建立机构的运动微分方程也就够了,然而实时计算的成果在学术方面却具有更大的意义。因为在某些情况下计算时间并不是最重要的,此时如何将动力学应用到优化设计中倒成了问题。让我们看一看将动力学用到控制方面时情况如何?已经指出过动力学和控制问题不能完全分开,更确切地是要谈功能动力学或动力学控制,即以系统动力学特性的详细知识为基础的控制。最重要的是这样一种控制,根据对系统彻底的了解以及在确定的

作业范围内对系统的能量要求,使得在驱动和控制元件中只具有必要的功率储备。只有现在才能提出第二个问题,这个问题不是关于动力学计算的合理性,而是关于实时控制算法综合的合理性。无疑在大多数主动机构的实际应用中上述性能并不是必须要的,对于所有的永久地或在某一时期内预先规定工作要求的操作系统(在相同工作条件,相同环境下或在相同的程序作业中)在运算过程中控制算法不发生变化,这主要是指工业机器人。

然而,对于工作条件不完全确定(即工作环境有一些不确定)的系统情况就有些不同了。我们只提一下用于水下作业的操作手。在这种情况下应该认识到动力学参数和控制参数的计算对于计算(在操作手的运动学约束和几何约束下)程序运动学(依赖于问题的目标)是很有必要的。如果程序运动学还依赖于其它变化的条件譬如重量(在促动器的能力限度内),那么还需要计算所要求的驱动力并在那个连接机构中选择相应的增益系数,以保证令人满意的良好轨迹跟踪质量。例如如果我们考虑包括水下及宇宙空间在内的各种不同环境下机械部件的装配作业,则实时地单独计算操作系统动力学的理由就变得更令人信服了。冗余性是机器人主动机构的另一个常见的特性,在这种情况下机构具有比完成规定作业所需要的更多的自由度。一方面,在完成作业时允许机构有更大的灵活性,而另一方面由于引入了求解系统冗余性问题的最优方法而使得控制系统复杂化了。这些过剩的自由度也可以用来满足特殊的附加要求。

1.2 机器人中主动机构的种类及其特性

从机械原理的观点来看,机器人学中的主动机构是一种