

机器人机械系统原理

理论、方法和算法

(加拿大) Jorge Angeles 著
宋伟刚 译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

机器人机械系统原理 理论、方法和算法

(加拿大) Jorge Angeles 著

宋伟刚 译



机械工业出版社

本书以具体完成工作任务的机器人机械系统为对象,包括机器人操作手、多指灵巧手、步行机器人、并联机器人(飞行模拟器)和轮式机器人。目标是建立起在机器人设计、控制和操作方面起着重要基础作用的机器人机械系统原理。本书包含了进入机器人领域必备的数学基础和刚体力学基础,使本书自成体系,并包括一定数量的习题。

本书的主要内容包括解耦结构串联操作手的运动学和动力学;轨迹规划;根据刚体上点的数据确定角速度和角加速度;串联和并联操作手的运动学正问题和逆问题;平台型一般结构并联操作手动力学;以及轮式机器人的运动学和动力学。

书中系统的采用了螺旋理论,内容清晰,叙述详细。可作为相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可供工程技术人员和研究人员参考。

Translation from the English language edition:

Fundamentals of Robotic Mechanical Systems by Jorge Angeles

Copyright ©1997,2003 Spriger-Verlag New York,Inc.

All Rights Reserved

本书中文简体字版由德国施普林格出版社授权机械工业出版社独家出版。

版权所有。

著作权登记号:国字 01-2004-4094

图书在版编目(CIP)数据

机器人机械系统原理:理论、方法和算法/(加)安杰利斯(Angelds,J.)著;
宋伟刚译. —北京:机械工业出版社,2004.8

ISBN 7-111-14503-8

I. 机… II. ①安…②宋… III. 机器人-机械系统 IV. TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第046325号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:曲彩云

责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·25印张·604千字

0001-4000册

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

译者序

机器人是现代科学技术发展的必然产物,因为人们总是设法让机器来代替人的繁重工作,从而发明了各种各样的机器。机器的发展和其他事物的发展一样,遵循着由低级到高级的发展规律,机器发展的最高形式必然是机器人。

机器人学包括机构学、机器人运动学和动力学、电子学、控制工程、传感技术、计算机科学、模式识别、人工智能等广泛的领域。而机器人机械系统运动学和动力学是机器人研究与开发的基础,可以说,只要进行机器人的开发和研究就离不开对机器人进行运动学和动力学的分析。换句话说,对机器人进行运动学和动力学分析的根本目的就是为机器人的设计和控制提供基础。

本书以机器人的机械本体为对象,研究串联机器人操作手、并联机构机器人、步行机器人、机器人灵巧手、轮式机器人的运动学和动力学问题。

“机器人机械系统原理”的作者,加拿大 McGill 大学的 Jorge Angeles 教授是国际著名的机器人学专家,他于 2000 年获得美国机器人工程师学会(ASME)机构学专业委员会最高成就奖,曾在 1995 年至 1999 年担任国际机器与机构学理论联合会(IFToMM)主席。

有关本书的主要内容已经在作者的前言中详细的列出,这里只是简略地说几点我阅读本书感受到的本书的特点。

(1)研究内容集中。目前所见到的绝大多数的有关机器人的书籍往往都陷于机器人学的庞杂的研究内容,尽管在书中有一些独到的内容,但是由于所涉及的内容过多,而淹没了这些内容。本书仅致力于机器人的运动学和动力学问题,对一些关键知识和技术进行了详尽的分析与解说,使读者充分了解研究内容的精要;

(2)强调机器人运动学和动力学的数学、力学以及多体动力学基础,但不拘泥于数学的严密性,重在实用,便于自学。全书贯串着不变量和螺旋理论,但不过分讨论复杂的数学理论问题,书中没有出现四元数、对偶数等复杂的数学问题。书中给出了许多实际分析实例,甚至是在数学基础和习题中。例如,在第 2 章数学基础的最后给出了冗余传感器校准这一在机器人应用中十分重要的问题;

(3)本书的第 8 章,复杂机器人机械系统运动学是本书的最精彩部分,给出了一般结构串联操作手逆运动学和并联结构机器人运动学正问题的求解方法,给出了半图解法和单变量多项式方法。特别是在第 2 版中,作者重写了大部分的内容,使读者更易于理解。而且介绍了出自我国的学者李宏友博士和梁崇高教授的研究成果。有关轮式机器人运动学和动力学方面的内容也是很少见到的。

我最初看到这本书是 1998 年我在德国斯图加特大学暨弗劳恩霍夫协会生产技术与自动化研究所作为访问学者从事机器人研究时,书中的先进分析方法和精妙的技巧深深地吸引了我,一直希望有机会能将这本书译成中文,介绍给国内的读者,感谢机械工业出版社和曲彩云编辑的大力支持,使本书的中文版得以顺利出版。

本书的翻译是为研究生机器人课程的教学而进行的,最初翻译自第 1 版,又根据第 2

版进行了修改。研究生张国伟同志阅读了译文的初稿，提出了很多修改建议。在翻译过程中，虽然几经推敲，但是由于时间紧，译者水平有限，仍难免有疏漏和错误，敬请读者不吝指正。对于本书的译稿，若有指正或需与译者商讨，请通过电子邮件 weigangsong@263.net 或 wgsong@yahoo.com 与译者联系。

宋伟刚

2004 年 8 月于东北大学

第 2 版前言

机器人机械系统的不断发展使得我们不能及时地记录下它的理论、方法和算法。“机器人机械系统原理”的第 2 版也无法包含当前所有的发展。然而，期望通过内容的更新，更加贴近这一活跃领域的发展。本书的第 1 版出版后，有许多重要的发展值得我们注意，这里有许多先进的应用领域值得提出，例如胃肠透镜检查、触觉和制造业就是其中典型的实例。

或许最值得提出的是空间探索领域的成就。事实上，我们已经看到，1997 年“旅行者号”已经成功地登陆火星，用轮式机器人“探险者”在火星上漫游。在这个领域中，2000 年国际空间站进入轨道，2001 年 Canadaarm(加拿大臂)的改进型 Canadaarm2(加拿大臂 2)安装在其上。在理论研究方面也有许多值得指出的成就，虽然他们没有受到媒体的广泛关注。最值得提出的是，在第 1 版中提出的一个悬而未决的问题，在 1998 年的“机器人运动学前沿国际研讨会”(International Workshop on Advances in Robot Kinematics)上提交的一篇论文中解决了这个问题，Husty 导出了一般 Stewart-Gough 平台的运动学正问题求解计算的 40 次多项式(该论文 1996 年发表在“机构和机器理论”(Mechanism and Machine Theory)杂志上)。在这次会议上，Dietmaier 提出了这种平台的一组几何参数，能够求解出 40 个实解，这也证明了 Husty 导出的最小多项式的正确性。

在完成第 2 版的过程中，修改了手稿中的一些笔误和错误。特别感谢 Canmet(加拿大，安大略省，Nepean)的 Kourosh Etemadi Zanganeh 博士，在重写第 8 章中得到了他的无私帮助。Autónoma de najuto 大学(墨西哥)的 Carlos López-Cajún 教授和 de Guanajuato 大学的 J. Jesús Cervantes-Sánchez 指出了本书第 1 版中的一些矛盾。另外，加拿大航天局(加拿大，魁北克，Hubert 大街)的 Zheng Liu 博士，在 McGill 大学应用本书前 6 章的教学过程中，指出了一些错误，并提出了有价值的建议，以增进本书的可读性。本书的第 2 版大都接受了这些建议。除了一个问题，即 Liu 博士建议在第 2 章中扩展欧拉角的应用，因为它在工业的机器人工程中得到广泛采用。我决定采用在这一章列出有关欧拉角的习题的方式，而不对欧拉角作进一步的扩充。理由是，按照作者个人的观点，欧拉角表示方法有不可避免的缺陷，不仅欧拉角不是不变量，同时他们的运算非常繁琐，如同在例子中所看到的。欧拉角可以形象地表示刚体的旋转，但是，在采用计算机或手工计算旋转问题时并不是一个好的求解方法。这一点在通过长达 15 年使用这些材料进行教学过程中得到学生们广泛的认同。

另外还需要提一下的就是 RVS，使用这个软件系统可以实现机器人运动的可视化，而且它在本书的第 1 版中起到重要的作用。它没有得到有效的维护与升级，仍然运行在图形工作站上，而且，我们也没有计划开发其 Windows 版。

今后，我们一如既往地欢迎读者们提出改进意见。请读者通过下面的 E-Mail 地址提出自己的建议。本书的更新将在下面的网页上

www.cim.mcgill.ca/~rmsl

本书练习册也已经完成，其中包括了更多简单的习题，而且本书最后还给出了习题的数值解。练习册采用了 Autocad 软件 LATEX 进行排版，当需要时，该软件可以从出版者处获得。

最后，但不是最少的，我要向在 McGill 大学从事博士后研究的 Svetlana Ostrovskaya 博士表示感谢，她帮助我完成了第 10 章和本书第 2 版的编辑工作。

Jorge Angeles 蒙特利尔，2002 年 1 月
angeles@cim.mcgill.ca

第 1 版前言

不是所有的思考过程都是算法

——Mario Bunge¹

随着 20 世纪 60 年代微处理器的出现,进入了现代机器人时代,用计算机才可以实现操作手的多轴控制。今天,随着技术的不断发展,机器人从事先编程再现完成工作,发展到包含多学科的科学和工程的分支。机器人的开发与实现在计算机视觉、人工智能、模式识别等研究领域起到了重要的作用。机器人的发展依赖于计算机科学、电子学和控制等,也就是说机器人学覆盖了非常宽广的知识基础。本书仅包括其中较窄的内容。

当代机器人的目的是在高水平上设计、控制和完成一项任务的系统执行能力,用类似人的语言进行通信。而且,机器人可以有各种不同的形式,从无形的,如空间声音的图像解释,到有形的,如在外科手术中切割薄片。我们可以注意到,运动并不是机器人系统自己所固有的特性,而是通过人的作用,使它按照人的意志来实现运动。然而,因为机器人的进化是从以前的可编程操作手开始的,一种趋势是将其等同于机器人的运动和操作。当然,机器人可以通过其机械系统的作用完成相应的任务。正因为如此,本书的对象为机器人机械系统。这里的任务自然是,主要包括如同操作的运动,也包括类似于移动机器人的运动。而且,操作可以是简单的,如移动在带式输送机上的箱子;另一方面,操作也可以是复杂的,在几种运动和力约束下移动一个物体,例如切割人内脏的薄片。进而,操作也可以包括移动机器人的运动。

机器人机械系统的任务与运动控制密切相关,为保证运动控制的实现,需要对机械系统进行详细的研究,包括系统中的单元。本书的目的是建立机器人机械原理,它是机器人设计、控制和执行的基础。

本书是由作者在 McGill 大学 12 年来讲授本课程的讲义发展而来的。这些内容是两个连续学期的机器人机械系统课程。为此,本书包括两部分内容,即机器人机械系统的初级和中级部分。没有涉及高级部分,如冗余操作手、柔性杆件和关节操作手以及力控制。也没有涉及机器人机械系统的反馈控制,因为这些内容已经包含在专门的课程中。本书的目的是作为一个学年的机器人课程的教材或参考书,另一目的是供工程师参考。

本书要求读者具有熟悉在大学的工程或科学学科中前两年的数学基础,熟悉力学基础也是非常有用的,但不是必要的。本书所需要的有关力学基础知识已经包含在本书的前 3 章中。在这 3 章中,给出了学习和研究机器人机械系统的必须的数学和力学的基础。这些内容也可以作为大学二年级的机器人学数学基础课程的阅读材料,用以准备进入机器人课程。

第 1 章给出机器人机械系统的总体概貌,以使读者了解机器人机械系统的特征。第 2 章的内容是线性变换的表示方法、术语和基础,通过这些内容可以更好地理解刚体运动学,这些内容将贯穿本书。本章的唯一特色是讨论了手眼校准问题:有很多文章研究这个基本

¹ 这句话(译自法语)是作者在“思维问题研讨会”期间,送给 Mario Bunge 教授 75 岁生日的贺词,1994 年 9 月 30 日,蒙特利尔。

问题的求解,总是导出包括非线性方程求解的一些繁琐的求解,从而要采用迭代方法,而且,在这些迭代方法中需要进行奇异值分解和自迭代。在第2章中,提出了一种新的方法,借助于旋转不变量的性质导出了正向的解。包括一个直接的矩阵和矢量相乘。第3章中,首先复习了刚体运动静力学和动力学的基本定理。在现有的机器人操作手的书中,从这里开始有两种观点:实际上,正则正交矩阵可以看作坐标变换,但是也可以看作当选定坐标系后,表示刚体旋转矩阵。本书采用后者的观点,因此,基本概念也是从不变量性质的角度展开的,也就是,采用了坐标系无关的性质。因此,在这一章中研究刚体力学基础时,使用矩阵表示实际的运动。准确地说,第4章开始进入机器人机械系统。这一章包括使用广泛的串联型机器人操作手运动学,一直到位移分析关系。在这一章中,仅限于简单机器人操作手,即串联操作手为解耦结构,也就是,操作手可以分解为末端执行器的定位的区域结构和末端执行器点的定向的局部结构。在这一章引入了 Denavit 和 Hartenberg 表示方法,这个表示方法将贯穿在全书中。本章中还包括雅克比矩阵、工作空间、奇异性和运动静力学性能指标等概念;还给出了一种新的方法,用以确定操作手定位的工作空间的边界。进而,在第5章中讨论轨迹规划的类型,并限定在适合第1个学期学习的机器人的轨迹规划问题,即机器人的拾放操作轨迹规划。第6章,进入串联型机器人操作手动力学,讨论了在多体动力学中应用广泛的递归 Newton-Euler 算法和 Euler-Lagrange 方程。使用后者可以导出机器人机械系统数学模型的一般代数结构。至此,构成本书的初级部分。

中级机器人机械系统原理由4章构成。第7章是日益重要的问题,当一组点的速度和加速度已知时,确定角速度和角加速度。在中级水平的这一章中,仅研究理论上的问题,因此,假定点位置、速度、加速度是完全可测的,只考虑基本原理,而不考虑测量中产生的噪声。这个问题可以在并联操作手中应用,所以将它列在前面。如果受到时间的限制,也可以将这一章跳过,这并不影响全书的整体性。

在第8章中,导出了一般机器人操作手的逆运动学公式,它是一个单变量16次多项式,这是在其他机器人学的书籍中没有讨论过的问题。同样地,对一般的平台操作手,即著名的 Stewart 平台,又称 Stewart-Gough 平台,进行了正运动学分析,导出了16次单变量多项式。而且,给出了另外的求解前面两个单变量多项式表示系统的方法,也就是在本章中引入了半图解法。应用这个方法,将多变量代数方程组化简成不包括三角函数的含有两个变量的两个非线性方程。每个方程可以在两个变量的平面内画出一条等值线,期望求出的解就是这两条等值线交点的坐标值。

在第9章中,讨论了连续路径轨迹规划问题,这里应用了一些微分几何的概念,即光滑曲线的切向、法向和副法向矢量对曲线弧长变化率的弗莱纳-雪列方程关系。在这一章中,从样本位姿的笛卡尔空间的描述,给出了在关节空间用3次参数样条合成一般轨迹。最后,在第10章中,接续第6章,完整地讨论了机器人机械系统动力学问题。概要给出了并联操作手和轮式机器人的动力学。在这里应用了第6章中所引入的多体动力学方法的数学模型公式。

另外,还给出了两个附录,以保证本书的完整性,附录A总结了旋转运动学的一系列的事实;附录B给出了超定和不定线性代数方程组的数值解法,其目的是帮助读者掌握已有的稳定性好的最小二乘和最小正则解的计算技术。本书还为每章配备了一定数量的习题,最后还列出了全书的参考文献。

关于表示方法

给出合适的表示方法是重要的。在这些表示方法中,采用了 C^3 准则。在这个准则下,表示方法将符合

- (1)理解性(Comprehensive)。
- (2)简单性(Concise)。
- (3)一致性(Consistent)。

按照这些准则,使用粗体字表示矢量和矩阵,其中大写字母表示矩阵,小写字母表示矢量。按照我们开始采用的不变量方法,我们不区别矢量和数组,但是,要区别几何和机械对象。只有当需要为特定的目的完成操作时,才把对象看成数组。矢量的一个本质特征是讨论它的维数,这可以通过一个数来表示,相对于习惯,矩阵可以看成矢量的排列;在这种习惯下,维数可以用两个数来表示,一个数表示列数,一个数表示行数,在矢量的情况下,列数总是1,因此,不需要特别指出。而且,在表示一组点或对象时采用了手写体,因为在每个变量出现时都给出其定义,而且,在本书中,不同的部分中同一个变量名表示不同的概念,因而,没有给出符号表。

如何使用本书

本书可以作为从大学低年级学生到博士生的教材或参考书。在初级课程中。在一个正常的学期中不可能包含前6章的所有内容时,教师可以有选择地跳过一些内容,如果由于时间所限,可以跳过在第4章讨论的工作空间和性能指标及第6章的计算机仿真等内容。如果时间还不够,可以省略整个第5章的内容,但是,教师应该给学生布置包括机器人完成拾放操作的动力学逆问题计算的作业或项目。这没有包含在第6章的习题中。

如果在第1学期中没有包括第4章的部分内容和第5章,明智的选择是将这部分的内容在第2学期中,应该在中级部分之前讨论这些内容。

致谢

在本书的撰写过程中,得到了许多人的帮助和技术支持,我要向他们表示感谢:首先,我要深深地感谢我的博士研究生Eric Martin和Ferhan Bulca的无私的帮助及在编辑手稿和制作教授课程的图片中所作出的繁重的劳动。Max A. Gozález-Palacios博士,现在是墨西哥León, Iberoamericana大学机械工程副教授,他在McGill大学的博士论文工作中,取得了公认的高标准的一系列研究成果。我的同行们Ken J. Woldron, Clément Gosselin和Jean Merlet提出的建设性的建议。Andrés博士在McGill大学客座期间校对了大部分手稿。在此过程中,Kecskeméthy博士修正了几处推导的缺陷。与奥地利的Leoben大学的Manfred Husty博士关于几何问题的讨论和分析的把握,以及他在McGill大学客座期间,卓有成效地对第2和第3章的整理。前一版本的手稿还由Meyer Nahon在McGill大学完成博士论文期间进行了仔细的审阅,现在他是Victoria大学的副教授。与McGill大学的博士研究生Farzam Ranjbaran讨论,对运动静力学性能指标的相关概念有了更清楚地认识。与Kourosh Etemadi-Zanganeh博士在McGill大学的博士论文工作期间,对第8章的路径

参数表示进行非常有效的讨论，这对思路有很大的贡献，而且，他还完成了第 4 章和第 8 章的一些例子。Clément Gosselin 提供了轨迹规划方面的资料，从而帮助我开始第 5 章的撰写。本书所采用的图片得到了各个单位和组织的许可。这里，向他们表示深深地感谢。

本书手稿的撰写是在 1991~1992 学年，当时我是在洪堡研究奖学金的资助下，在慕尼黑工业大学进行客座研究。在这里，我要深深地表达对洪堡基金会和机械 B 所所长 Friedrich Pfeiffer 教授的感谢，以及他们对我在慕尼黑时的款待。另外，还要向慕尼黑工业大学计算机科学研究所的 Manfred Broy 教授表示感谢，他为我提供了他的 Unix 网络。慕尼黑工业大学的良好学术氛围是激起我撰写本书的动力。

而且，对 NSERC(加拿大自然科学与工程研究委员会)和魁北克的 FCAR 对研究的经济上的资助表示感谢。机器人学与智能系统研究所卓越的加拿大中心网络，通过保障机器人设计和机器人控制方面，间接地支持了本项研究工作。一个无价的工具是本书中所使用的 RVS，即 McGill 机器人可视化系统，它是在 NSERC 对机器人设计项目资助框架下，以及另外两个 NSERC 资助的项目基础上开发的。RSV 是 John Darcovich 作为 McGill 大学的软件工程师经历了四年的时间开发出来的，现在，他在魁北克的 Saint-Laurent 的 CAE 电气公司。RVS 使用方便，可以申请使用，不需要提供技术支持，有关 RVS 的详细信息读者可以访问 McGill 大学智能机械中心的主页：

<http://www.cim.mcgill.ca/rvs>

而且，California 的 Redwood City 的专业技术编辑 Lenore Reismann 非常认真地校对了手稿并进行了语言编辑，对 Lenore 的专业帮助，这里表示诚挚的感谢。对斯普林格出版社(纽约)的数学编辑 Rüdiger Gebauer 博士表示感谢，他的激励和追踪才使本书完成。还要向斯普林格出版社的 Thomas von Foerster 博士表示感谢，他保证了这本书的生产，以及他的同事 Steve Pisano，他们从开始的复制到最后的清样都付出了无私帮助。Steve 不仅细心的排版，而且还在清样中发现了几个技术上的缺陷。最后，但不是最少的，请允许我向为我提供良好的设备和研究环境的 McGill 大学机械工程系智能机械中心和整个 McGill 大学表示感谢，他们对这个冗长的项目给出了巨大的帮助。

Jorge Angeles

1996 年 11 月于蒙特利尔

目 录

译者序

第2版前言

第1版前言

第1章 机器人机械系统概述	1
1.1 引言	1
1.2 机器人机械系统的整体结构	3
1.3 串联操作手	5
1.4 并联操作手	5
1.5 机器人手	8
1.6 步行机器人	9
1.7 轮式机器人	11
第2章 数学基础	13
2.1 引言	13
2.2 线性变换	13
2.3 刚体的旋转	17
2.3.1 叉乘矩阵	19
2.3.2 旋转矩阵	20
2.3.3 3×3 矩阵的线性不变量	23
2.3.4 旋转的线性不变量	24
2.3.5 例题	25
2.3.6 欧拉-罗德里格斯参数	30
2.4 旋转和映像的合成	33
2.5 坐标变换和齐次坐标	34
2.5.1 原点重合的两个坐标系之间的坐标变换	34
2.5.2 原点移动的坐标变换	37
2.5.3 齐次坐标	38
2.6 相似变换	41
2.7 不变量的概念	45
2.7.1 冗余传感器校正的应用	47
第3章 刚体力学基础	51
3.1 引言	51
3.2 一般刚体运动及其螺旋	51
3.2.1 刚体运动的螺旋	53
3.2.2 直线的 Plücker 坐标	54
3.2.3 刚体的姿态	57
3.3 刚体绕固定点的旋转	59

3.4 刚体的一般瞬时运动	59
3.4.1 刚体运动的瞬时螺旋	60
3.4.2 刚体的运动旋量	62
3.5 刚体运动的加速度分析	65
3.6 坐标系移动下刚体的速度和加速度分析	67
3.7 刚体的静力分析	68
第4章 简单机器人操作手运动静力学	74
4.1 引言	74
4.2 底纳维特-哈滕博格表示方法	74
4.3 6R 操作手运动学	80
4.4 解耦操作手逆运动学问题	83
4.4.1 定位问题	83
4.4.2 定向问题	95
4.5 串联操作手的速度分析	98
4.5.1 雅可比矩阵的计算复杂性	104
4.5.2 解耦操作手的奇异位形分析	108
4.5.3 操作手工作空间	110
4.6 串联操作手的加速度分析	112
4.7 串联操作手的静力学分析	115
4.8 平面操作手	117
4.8.1 位移分析	118
4.8.2 速度分析	119
4.8.3 加速度分析	121
4.8.4 静力分析	123
4.9 运动静力学性能指标	124
4.9.1 操作手定位	127
4.9.2 操作手的定向	129
4.9.3 操作手的定位和定向	129
第5章 轨迹规划: 拾放操作	135
5.1 引言	135
5.2 拾放操作的背景	135
5.3 多项式插值	136
5.3.1 3-4-5 插值多项式	137
5.3.2 4-5-6-7 插值多项式	139
5.4 摆线运动	141
5.5 通过中间位姿的轨迹	143
5.6 用三次样条对拾放作业综合	144
第6章 串联机器人操作手动力学	150
6.1 引言	150

6.2 逆向和前向动力学.....	150
6.3 多体系统动力学的基本原理.....	151
6.3.1 术语和基本概念	151
6.3.2 串联操作手的欧拉-拉格朗日方程	152
6.3.3 凯恩方程	159
6.4 递归逆向动力学.....	159
6.4.1 运动学计算: 外向递归.....	160
6.4.2 动力学计算: 内向递归.....	165
6.5 机器人动力学中的自然正交补	168
6.5.1 约束方程和运动旋量形关系的推导	172
6.5.2 非惯性基座杆件	175
6.6 操作手前向动力学.....	175
6.6.1 平面操作手	178
6.6.2 算法复杂性	189
6.6.3 计算机仿真	192
6.7 重力合并到动力学方程.....	194
6.8 耗散力模型.....	194
第7章 刚体运动特殊问题.....	197
7.1 引言	197
7.2 用点速度计算角速度.....	197
7.3 用点的加速度计算角加速度.....	201
第8章 复杂机器人机械系统运动学	207
8.1 引言	207
8.2 一般6转动关节操作手的运动学逆问题.....	207
8.2.1 预备知识	208
8.2.2 双变量方程方法	218
8.2.3 单变量多项式方法.....	219
8.2.4 解的数值条件作用.....	226
8.2.5 其他关节角的计算.....	227
8.2.6 计算实例	230
8.3 并联操作手运动学.....	233
8.4 多指手	249
8.5 步行机器人.....	252
8.6 轮式机器人.....	254
8.6.1 传统车轮机器人	255
8.6.2 全方位轮式机器人.....	259
第9章 轨迹规划: 连续路径操作	263
9.1 引言	263
9.2 曲线几何学.....	263

9.3 参数路径的表示.....	267
9.4 轨迹规划中的参数样条.....	278
9.5 连续路径跟踪.....	284
第 10 章 复杂机器人机械系统动力学	292
10.1 引言	292
10.2 机器人机械系统动力学上的分类.....	292
10.3 完整系统动力学模型的结构.....	293
10.4 并联操作手动力学.....	295
10.5 轮式机器人动力学.....	302
10.5.1 传统车轮机器人	303
10.5.2 全方位轮式机器人.....	311
附录 A 旋转运动学概要	319
附录 B 线性代数方程组的数值求解方法.....	324
B.1 超定情况.....	324
B.2 不定情况.....	328
习题.....	331
第 1 章 机器人机械系统概述.....	331
第 2 章 数学基础.....	331
第 3 章 刚体力学基础.....	338
第 4 章 简单机器人操作手的运动静力学.....	341
第 5 章 轨迹规划: 拾放操作.....	346
第 6 章 串联机器人操作手动力学.....	348
第 7 章 刚体运动特殊问题.....	352
第 8 章 复杂机器人机械系统运动学.....	354
第 9 章 轨迹规划: 连续路径操作.....	356
第 10 章 复杂机器人机械系统动力学.....	359
参考文献.....	361
英汉名词术语对照.....	373

第1章 机器人机械系统概述

1.1 引言

为定义研究对象的范围，我们要建立机器人机械系统谱系。很明显，机器人机械系统(mechanical Systems)是非常广泛的机械系统的一个子系统。进一步地，机械系统又是更一般概念上的动力系统(dynamic Systems)的子集。因此，为了后面的分析，我们要建立什么是系统的总体概念。

简明牛津词典把系统定义为：复杂整体，有联系的事物或者部分，组成有形或无形事物的集合体。而 Random House College 词典定义为：“形成简单或复杂事物的局部或分支的集合或组合体”。Le Petit Robert 定义为：“Ensemble possédant une structure, constituant un tout organique”，可大致翻译成：“由有机体构成的集合”。在前面的定义中，我们知道了系统的基本意思是：一组元素连接成整体。

另一方面，动力系统是系统的子集。为了我们的目的，我们给出这个概念的严格的定义。可以说，动力系统是这样系统：可以将其分成状态、输入和输出三个单元，进而，通过一种变换规则可以从一个当前的状态变换到将来的状态。而且，这种状态是输入和过去状态的函数。从这个角度讲，理想的输入是重要的，通过他们可以辨识出随时间变化的状态值。在动力学系统中，状态的每个瞬间是函数，它是输出的反函数。就是说，动力系统的瞬时状态不仅由瞬间的输入量决定，还和以前输入的历史有关。从这一点上，可以认为动态系统具有记忆功能。

相反，状态只和输入函数有关的系统是静态的，没有记忆的。此外，因为动态系统的状态是所有以前输入的结果，所以，将来的输入值对现在的状态没有影响，所以动态系统被称为是不可预期的或因果的。同样，状态与将来输入结果有关的系统称为是可预期的或无因果的。实际上我们不用过多的考虑后者，所以，我们要考虑的系统可以假设是因果的。

很明显，机械系统是由机械元素组成的。如果这个系统和动力系统一致，那么我们就完成了动态机械系统的定义。简而言之，我们就把这样的系统当做机械系统。动力学问题理所当然的贯穿于本书。这样类型的机械系统存在元件的惯性，静态机械系统的惯性被忽略了。组成机械系统的元件可以是刚性的或可变形的固体，可压缩的或不可压缩的液体，有粘性或无粘性的液体。

从以上的讨论可以看出，机械系统可以由集中参数的或分布参数的元件组成。集中参数模型被简化成质点，刚体，无质量的弹簧和阻尼。分布参数机械系统用连续介质模型表示。本书中，我们主要讨论集中参数机械系统。

此外，机械系统可以是自然的，也可以是人造的。后者是我们要研究的对象。人造机械系统可以是可控的，也可以是不可控的。大多数的工程系统是可控的机械系统，所以，我们要研究可控的人造机械系统。此外，一个被控制的机械系统可以是机器人，也可以是非机器人。后者要配置简单的控制器。例如，自动调温器，伺服阀等。机器人机械系统是可编程的，例如现在的大多数的工业机器人和以后要讨论的智能机器人。可编程机械系统可以执行存储在存储器的指令或在线指令。在任何一种情况下，它们都需要简单的传感器，

例如，关节编码器、加速传感器和测力器。

智能机器人，或者广泛的讲是智能机器，有待进一步发展，而且将成为研究的热点。如果智能机器成为可能的话，他们就要高度依靠高级的传感系统和支持传感器提供的过程信息能够传递而联系起来的软件和硬件。获得的过程信息然后被送到执行机构，以让机器人产生所预期的动作。可程序机器人的工作限制在结构环境，相反，智能机器人能够在非结构环境顺应不可预测的因素变换工作。因此，智能机器人将以它的决策能力来用于模仿有机生命的自然决策过程，这就是为什么这种系统被称为智能的主要原因。智能机器能感觉环境然后做出判断，被认为是使系统具有智能的原因。它包括一些判断元件。可以认为，“人类和机械的最复杂的感知工作都是视觉(Levine, 1985:Horn, 1986)。

总的说来，智能机器人的工作是：1)感知环境；2)处理所感知到的信息；3)做出判断；4)根据高水平的规划进行动作。最后一条的意思是：机械执行动作是由像给的命令一样的指令决定的。就像“给我们一杯水而不要洒掉”一样。

智能机器人是否有一天能具有上述特点还是一个讨论的议题。有时是在哲学领域进行的。Pentose(1994)写了一本论述来反驳智能机器人可能出现的观点。

图 1.1 给出了包括机器人的一般机器系统的结构谱系。在图中，我们在“机械系统”和“其他系统”、“自然的”和“人工的”之间画了虚线，就是为了强调机械系统、电、热及其他系统、包括人工的系统间的相互交叉，也包括我们以后将要讨论的遥控机械手。

