

高等学校教材

机器人学导论

[美] 约翰 J·克雷格

苏仲飞 郭子正 等译

彭炎午 等校

Introduction to Robotics

MECHANICS &
CONTROL

西北工业大学出版社

机器人学导论

——力学与控制

[美] 约翰 J. 克雷格
苏仲飞 杨佩贞 张寿祥 郭子正 译
陈佳实 金西岳 陈家铨
彭炎午 苏仲飞, 郭子正 校

西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书由美国斯坦福大学John J. Craig教授编著,是目前美国流行的一本最新教材。全书共10章,着重讲述机器人的力学和控制问题;包括机器人操作器的几何描述、运动学、动力学、位置控制、力控制及复合控制,机器人的编程等问题,每章附有习题及编程练习。本书较之其他教材易读易懂,取材新颖,理论与应用兼顾,适用于机械、电气自动化、控制和计算机应用等学科的研究生、高年级大学生以及有关技术人员。

Introduction to Robotics
Mechanics & Control John J. Craig
ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 1988.

高等学校教材
机器人学导论
—力学与控制

翻 译 苏仲飞、郭子正 等
校 订 彭炎午 等
责任编辑 郑文治

西北工业大学出版社出版
(西安市友谊西路127号)
陕西省新华书店发行
陕西省富平县印刷厂印装

开本 787×1092毫米 1/16 12.25 印张 288千字
1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷
印数0001—5000册

ISBN 7-5612-0017-X/TP·6 定价: 2.05元
统一书号: 15433·062

译 者 的 话

由美国斯坦福大学克雷格教授著的《机器人学导论—力学与控制》一书为目前美国流行的一本最新教材，1986年出版。与其它教材相比，此书取材新颖，内容全面，易读易懂，理论与应用兼顾，有习题和编程作业，为读者学习机器人学的入门提供了一个良好的条件。

本书适用于机械、控制和计算机应用等学科高年级大学生和研究生做为教材之用。对使用、设计和研究机器人的技术人员，此书提供了较全面的、必需的基础知识，是一本较好的参考读物。

全书共十章，着重讲述了机器人的力学与控制问题，包括操作器的几何描述、运动学、动力学、位置控制、力控制及复合控制，机器人的编程问题等。每章附有习题和编程作业，读者可通过它更好地掌握相应的理论与应用。

参加翻译的有苏仲飞（前言，第一、二章），杨佩贞（第三、四章），张寿祥（第五、六章），郭子正（第七章），陈佳实（第八章），金西岳（第九章），陈家锭（第十章）。译稿由郭子正（前言及第一~四章）、苏仲飞（第五~十章）校订，并由苏仲飞统稿。最后全稿由彭炎午校阅。

由于译校者水平有限，虽力求译稿体例统一，义译确切，但难免有错误及不当之处，恳望读者不吝赐教指正。

1987年1月

前 言

科学家常有这样的感受—即通过他们的工作，他们正在向自身的某些方面学习。物理学家看到了他们工作中的这一联系，心理学家和化学家也是如此。在机器人学的研究中，研究领域和我们自身的这种联系也是非常明显，而且，现在研究的机器人学不同于只是寻求分析的一门学科，而是把工程引向于综合。或许是这些原因，使我们这么多人着迷于这个领域。

机器人学的研究期望借采用的机构、传感器、驱动器和计算机等把人的功能的某些方面综合起来。很明显，这是一项巨大的事业，看来它必然需要大量的来自各“经典”领域的思想。

机器人学研究的不同方面现在是由不同领域的专家们来进行的。一般来说，任何一个人能掌握机器人学全部领域的情况是不存在的。自然希望划分一下这个领域。在抽象的相对地高水平上，把机器人学分成四个主要领域看来是合理的：机械操作、运转、计算机视觉和人工智能。

本书介绍机械操作器的科学和工程问题。这一分支在几个经典的领域都有它的基础。主要有关的领域是力学、控制理论和计算机科学。本书第一章到第七章包括了机械工程和数学方面的专题。第八章和第九章包括了控制理论的内容。第十章应归类于计算机科学。再者，本书通篇强调问题的计算方面，例如，主要讨论力学问题的各章都有一简单的节次讨论计算方面的问题。

这本书是以斯坦福大学1983年和1984年秋讲授“机器人学导论”的讲稿为基础发展起来的。在斯坦福大学这一课程是一连三个季学期的第一门课程，第二门课程是计算机视觉，第三门是人工智能、运转和深入的一些专题。

这本书适于大学三、四年级或研究生第一年的课程。若学生学过运动学和动力学的基础、线性代数，并能用高级语言编程则对学习本课程是有帮助的。又如学生学过控制理论的导论课程，虽非绝对必需，对学习第八、九章则是有帮助的。本书的目标之一是用简易，直观的方式提供材料。虽然大量内容取自机械领域，但听课者不必严格地限于机械工程师。在斯坦福大学，许多电机工程师、计算机科学工作者和数学家都反映这本书是十分易读的。

对于直接从事于开发机器人系统的工程师们来说，这些材料应看作是任一位从事机器人学的工作者的重要背景材料。就像搞软件的人至少要学一点硬件一样，不直接搞机器人的机械和控制的人也应掌握本书所提供的某些背景材料。

本书由十章组成，提供了十周一季学期的材料，在斯坦福大学每周教一章。按此进度，所有的题目不能做更深入的讲授。同样，本书也是按这一思想组织材料的，例如，绝大部分的章节只提供了解决手头问题的一种方法。本书的一个特色是力求在正常讲授的有限时间内对本书所包括的题目均给予妥善的交待。为达此目的，采用的方法之一是只考虑采用对机械操作有直接相关的材料。第一章末尾列出了一些参考材料，其中包括机器人学领域内出版的刊登研究成果的杂志。

每一章末有一套练习题，每一习题在题号后的方括弧内给出一困难因数，它们从(00)到

[50]之间变化, [00]表示无困难, 而[50]则是一个尚未解决的研究问题*。自然, 一个人感到困难的题对另一人可能会是容易的, 所以某些读者会在某些情况下认为这些困难因数有差错。但无论如何为评估练习的困难程度, 作者还是做出了这一努力尝试。

再有, 每一章末有一个编程的作业, 学生把相应章节的主要材料用于一个简单的三关节的平面操作器上。为了不使学生陷于过份复杂而不能自拔, 从近似地表达一般操作器的所有原理来说, 这个简单操作器是够复杂的了。每一编程作业是在前一个作业的基础上提出的, 课程学完后, 学生可有一个完整的操作器的软件库。

第一章是关于机器人学的引言。介绍一些背景材料, 本书所采用的符号, 一些基本概念和随后章节的预告。

第二章论及描述三维空间位置和方位的数学。这是特别重要的材料, 因为, 从定义讲, 机械操作器就是使它本身在空间移动物体(零件、工具、操作器本身)。我们需要以一种易于理解和尽可能直观的方法来描述这些动作。

第三章和第四章讨论机械操作器的几何学。介绍运动学这一机械工程的分支, 运动的研究不涉及产生运动的力。

第五章扩充对运动学的研究, 讨论速度和静态力。

第六章我们头一次对待产生操作器运动所需之力和力矩。这就是操作器动力学问题。

第七章涉及操作器的运动, 以通过空间的轨线来描述。

第八章我们研究控制操作器的方法(通常采用一数字计算机), 使它能如实地沿一要求的穿过空间位置的轨线运动。

第九章讨论操作器的主动力控制这一相对新的领域。也就是讨论如何控制操作器施加的力。这类控制模式在操作器与周围环境接触时是重要的, 例如当海棉揩拭窗户时。

最后第十章纵览机器人的编程方法, 特别注意机器编程系统中所必需的单元以及和工业机器人编程有关的特殊问题。

让我感谢那些贡献了自己的时间帮我写这本书的人。首先感谢1983、1984年秋ME219课程中的学生们, 他们使用了第一稿, 发现了许多错误并提出了许多建议。Bernard Roth教授以许多方式做出了贡献, 从对文稿的建设性批评直到提供我完成这本书的环境。我该深深感激机器人学方面我先前的诤友: Marc Raibert, Cart Ruoff和Tom Binford。斯坦福大学周围的许多朋友以不同的方式提供了帮助, 多谢: John Mark Agosta, Mike Ali, Chuck Buckley, Joel Burdick, Jim Callan, Monique Craig, Subas Desa, Ashitava Ghosal, Chris Goad, Ron Goldman, Johann Jäger, Jeff Kerr, Oussama Khatib, Jim Kramer, Dave Lowe, Dave Marimont, Madhusudan Raghavan, Ken Salisbury, Donald Speight, 和Sandy Wells。感谢写此书的过程中系统发展基金组织给予的支持。最后让我感谢Addison-Wesley出版社的Tom Robbins和他的同事们, Textset公司的Gary Grosso以及几位未署名的评论者。

约翰·克雷格

加里福尼亚 斯坦福

* 本人采用了Knuth著《计算机编程艺术》一书同样的尺度。

目 录

第一章 导论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 机械操作器的力学和控制	(2)
1.3 符号表示	(6)
参考文献.....	(7)
练 习.....	(7)
第二章 空间描述和变换	(9)
2.1 引言	(9)
2.2 描述: 位置, 方位和框	(9)
2.3 映射: 从一个框的描述变换至另一个框的描述	(11)
2.4 算子: 平移, 旋转, 变换	(15)
2.5 各种解释的综合	(18)
2.6 变换算术	(18)
2.7 变换方程式	(20)
2.8 方位的其他表示法	(22)
2.9 自由矢量的变换	(30)
2.10 计算方面的问题.....	(31)
参考文献.....	(32)
练 习.....	(33)
第三章 操作器运动学	(37)
3.1 引言	(37)
3.2 连杆的描述	(37)
3.3 连杆连接的描述	(38)
3.4 将框固定于连杆上的习惯	(40)
3.5 操作器运动学	(43)
3.6 驱动器空间, 关节空间及直角坐标空间	(45)
3.7 举例: 两个工业机器人的运动学	(46)
3.8 框的标准名称	(53)
3.9 工具的位置	(55)
3.10 计算技术的考虑.....	(55)
参考文献.....	(55)
练 习.....	(56)

第四章 反向操作器运动学	(59)
4.1 引言	(59)
4.2 可解性	(59)
4.3 $n < 6$ 时操作器子空间的标志	(62)
4.4 代数解对几何解	(64)
4.5 三轴相交时Pieper的解	(67)
4.6 逆向操作器运动学的例子	(69)
4.7 标准框	(77)
4.8 用SOLVE语言对操作器求解.....	(78)
4.9 重复性与精确度	(78)
4.10 计算技术的考虑.....	(78)
参考文献.....	(79)
练习.....	(79)

第五章 雅可比矩阵：速度和静力	(82)
5.1 引言	(82)
5.2 时变位置和方位的符号表示法	(82)
5.3 刚体的线速度和旋转速度	(84)
5.4 机器人连杆的运动	(85)
5.5 速度从一个连杆到另一个连杆的“传递”	(86)
5.6 雅可比矩阵	(89)
5.7 矩阵的奇异性	(90)
5.8 操作器的静力	(92)
5.9 力域中的雅可比阵	(94)
5.10 速度和静力的直角坐标变换.....	(95)
参考文献.....	(97)
练习.....	(97)

第六章 操作器动力学	(100)
6.1 引言.....	(100)
6.2 刚体的加速度.....	(100)
6.3 质量分布.....	(102)
6.4 牛顿方程式，欧拉方程式.....	(105)
6.5 迭代的牛顿-欧拉动态方程.....	(105)
6.6 迭代与封闭的表达形式.....	(108)
6.7 一个封闭形式的动力学方程的例子.....	(109)
6.8 操作器动力学方程的通用结构形式.....	(112)

6.9	直角坐标系中的操作器动态方程	(114)
6.10	考虑非刚体的影响	(116)
6.11	动态仿真	(117)
6.12	动态计算的考虑	(118)
	参考文献	(119)
	练习	(120)
第七章	轨线的形成	(123)
7.1	引言	(123)
7.2	路径描述和形成时考虑的一般问题	(123)
7.3	关节空间法	(124)
7.4	直角坐标空间法	(134)
7.5	运行中路径的形成	(136)
7.6	用机器人编程语言描述路径	(137)
7.7	用动力学模型规划路径	(138)
7.8	高级的路径规划	(138)
	参考文献	(139)
	练习	(139)
第八章	操作器的位置控制	(142)
8.1	引言	(142)
8.2	一个自由度的质量控制	(142)
8.3	控制规律的分解	(144)
8.4	非线性和时变系统	(145)
8.5	多输入-多输出控制系统	(148)
8.6	操作器的控制问题	(148)
8.7	实际的考虑	(150)
8.8	当前工业机器人的控制系统	(152)
8.9	笛卡尔基控制系统	(154)
8.10	自适应控制	(157)
	参考文献	(157)
	练习	(158)
第九章	操作器的力控制	(160)
9.1	引言	(160)
9.2	用于装配作业的工业机器人	(160)
9.3	力传感器	(161)
9.4	部分约束作业的控制结构	(161)
9.5	位置/力复合控制问题	(164)

9.6 质量-弹簧的力控制	(165)
9.7 位置/力复合控制方案	(167)
9.8 现代工业机器人控制方案	(170)
参考文献	(171)
练 习	(172)
第十章 机器人编程语言和编程系统	(174)
10.1 引言	(174)
10.2 为机器人编程的三个等级	(174)
10.3 一种应用实例	(176)
10.4 机器人编程语言的技术要求	(177)
10.5 机器人编程语言所特有的问题	(180)
参考文献	(183)
练 习	(184)

第一章 导 论

1.1 引言

工业自动化的历史是以通用的自动化方法迅速更换的时期为特征的。这些自动化技术更换的时期，作为原因或效果，看来都与世界经济紧密联系。工业机器人的应用，作为60年代一种独特装置，以及计算机辅助设计（CAD）系统和计算机辅助制造（CAM）系统三者一起标志着制造过程自动化的最新趋势[1]，这些技术正引导工业自动化经历着又一个转变，这个转变的规模未可预测。

本书集中论述工业机器人的一种最重要的型式—机械操作器（*mechanical manipulator*，或称机械手）的力学和控制。严格讲一台工业机器人是由哪些部分组成是有争议的。图1.1所示的各装置总是要有的，而数控铣床通常没有这些装置。区别在于该设备可编程性的完善化程度。如果一台机械装置可以靠编程来完成广泛的用途，它很可能就是一台工业机器人。

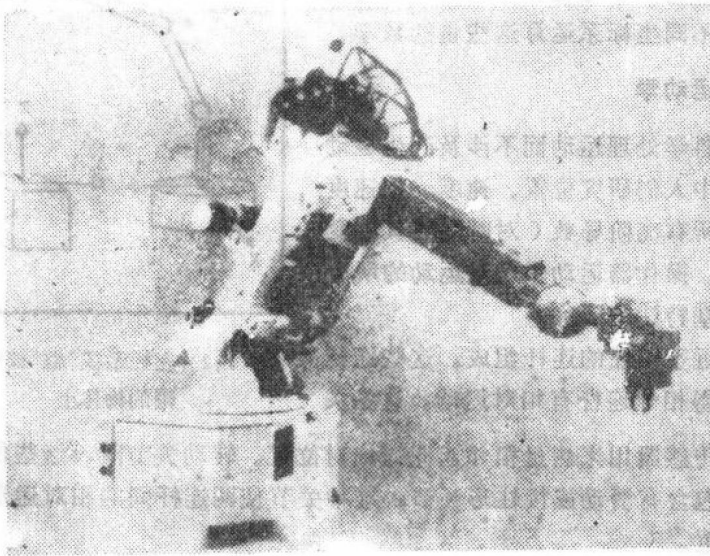


图 1.1 辛辛那提米拉克隆776操作器具有六个转动关节，在点焊中普遍应用。

如果这些机器只为完成某一类任务则认为**是固定自动化的装置**。从本教科书的目的来说不需要去争论这些区别，因为本书绝大部分材料是基础性的，对各类广泛的可编程机器都有用。

一般来说操作器的力学和控制的研究并非新学科，它只是集合了各经典领域中的诸课题。机械工程提供了机器的静态和动态的研究方法。数学提供了描述操作器的空间运动和其它特征的工具。控制论提供了设计和求解算法以实现所需运动和施加的力。电气工程则提供

各种传感器和工业机器人的接口。为完成某一作业，计算机科学提供这些装置编程的基础。

1.2 机械操作器的力学和控制

引 言

下面诸节将介绍某些名词术语并简要说明本书中所涉及的每一课题。

定位和定向的描述

在机器人的研究中，我们经常涉及到在三维空间内确定物体的位置问题。这些物体是操作器的连杆、与它有关的零件和工具以及在操作器周围的物体等。这些物体是由两个属性来表征的：它们的位置和方位。这两个属性虽然是原原本本的，但很重要。自然，我们以什么方式表示这两个属性以及如何以数学方式处理它们就即刻成为一个令人感兴趣的课题。

为了描述一个物体在空间的位置和方位，我们总是先在该物体上固联一个坐标系，或者叫做框。然后我们对这一框相对某参考坐标系再作描述（图 1.2）。这个描述就代表了对物体位置和方位的描述。

既然任何一个框都能作为表示某一物体的位置和方位的参考系统，我们就常想从一个框内物体属性的描述变换或改变为另一个框内的描述。在第二章我们将讨论关于定位和定向描述的习惯和方法，和相对不同坐标系运算这些量的数学。

操作器前向运动学

运动学这一科学处理运动而不涉及产生运动的力。在运动学中人们研究位置、速度、加速度以及位置变量的所有高阶导数（对时间或其它变量求导）。所以，操作器运动学是对运动的所有几何特性和时间基特性的研究。

操作器是由近乎刚性的连杆组成。这些连杆由关节相连，使得相邻连杆有相对运动。这些关

节通常装有位置传感器用来测量相邻连杆的相对位置。转动关节时，这些位移称为关节角。有关操作器有时包含有滑动或棱柱形关节，这种关节使两连杆间的相对运动为移动，这些移动常称为关节偏置。

操作器自由度的数目是指在确定机构全部零件的位置时所必需指定的独立的位置变量的数目。这是一个对任一机构都适用的通用名词。例如一个四连杆机构只有一个自由度（尽管它有三个运动件）。在典型的工业机器人的情况下，由于操作器通常是一个开式运动链，并且每一关节位置也通常由单个变量来规定，所以关节的数目就等于自由度的数目。

在组成操作器的连杆链的自由端处就是终端执行器，根据机器人使用的场合不同，终端执行器可以是爪、焊枪、电磁铁或其它装置。我们通常靠给定一个工具框相对于基座框的描述来说明操作器的位置。工具框是附在终端执行器上，而基座框是附在操作器不动的基座上

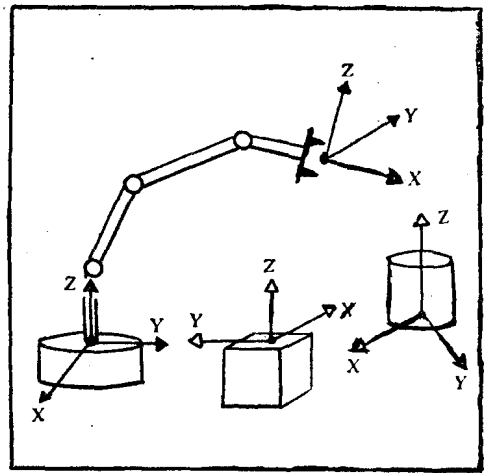


图 1.2 坐标系或“框”被附着在操作器或周围的物体上。

(图 1.3)。

机械操作研究的一个很基本的问题就是前向运动学。它就是操作器的终端执行器位置和方位计算的静态几何学问题。具体说,给出一组关节角,前向运动学问题就是计算工具框相对于基础框的位置和取向。有时我们把这一问题认为是操作器的位置从关节空间描述变为笛卡尔空间的描述*。这一问题将在第三章展开讲。

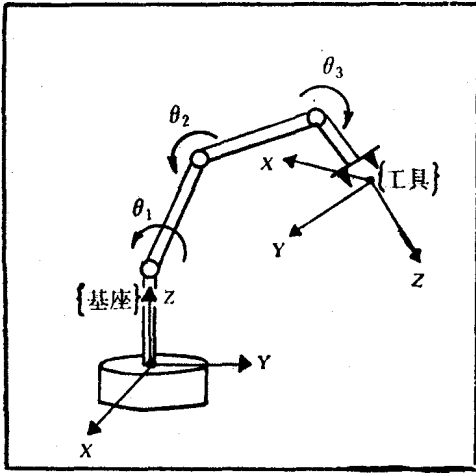


图 1.3 运动方程就是描述工具框相对于基座框的关节转角变量的函数。

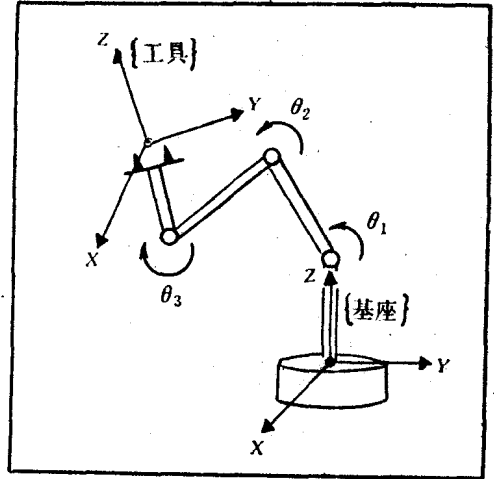


图 1.4 对一给定工具框的位置和方位可利用反向运动学算出各关节变量的数值。

操作器反向运动学

第四章我们将讨论反向运动学问题。这一问题如下所述:给出操作器终端执行器的位置和方位,计算出所有可能的几组关节角。每一组关节角都可用来得到这一给定的位置和方位(见图 1.4),这就是操作器实际应用时的基本问题。

反向运动学并非前向运动学那样简单。由于运动方程是非线性的,它的解不易求出,甚至不可能以封闭的形式给出,而且还有解的存在性和多解性等问题。

运动学解的存在或非存在就规定了给定操作器的工作空间。没有解就意味着此操作器不能达到要求的位置和方位,因为它们的操作器的工作空间之外。

速度、静态力、奇异性

除了处理静态定位问题之外,我们还希望对运动中的操作器进行分析。通常在作机构的速度分析时,规定一个称为雅可比(Jacobian)的矩阵是很方便的。雅可比定义了各速度量从关节空间到笛卡尔空间的映射(见图 1.5)。当操作器的外形改变时,这一映射也随着改变,在某些点(称为奇异点)时这一映射就不可逆。操作器的设计者和使用者理解这一现象是

* 笛卡尔空间是指一点的位置由三个数给定,一物体的方位由三个数给定的空间。有时称它为作业空间或操作空间。

很重要的。

操作器并不总是从空间移过，有时要求它与一工件或工作表面接触并施加一静态力。在此情况下，问题发生如下：给出一要求的接触力和力矩，需要一组怎样的关节扭矩来产生这一力和力矩？操作器的雅可比矩阵在解此问题时又再一次自然而然地出现。

动力学

动力学是一个庞大的研究领域，致力于研究产生运动所需之力。为了使操作器从静止点开始加速，然后按终端执行器的定常速度运动，最后减速至停止点，关节的驱动器*要发出一组复杂的扭矩函数。驱动器扭矩所要求的函数的严格形式决定于终端执行器所走路线的空间和瞬态的特征以及连杆和有效载荷的质量特性、关节的摩擦力等等。控制操作器使它沿所要求的路径运动的一个方法涉及到利用操作器运动的动力学方程来计算这些驱动器扭矩函数的问题。

动力学方程的第二个用途在仿真。重新变化一下动力学方程以便计算出作为操作器扭矩函数的加速度，这样就有可能对操作器在一组驱动器扭矩的作用下将会怎样地运动进行仿真（见图 1.6）。

第六章我们将推导出运动的动力学方程，用它控制操作器的运动并对后者仿真。

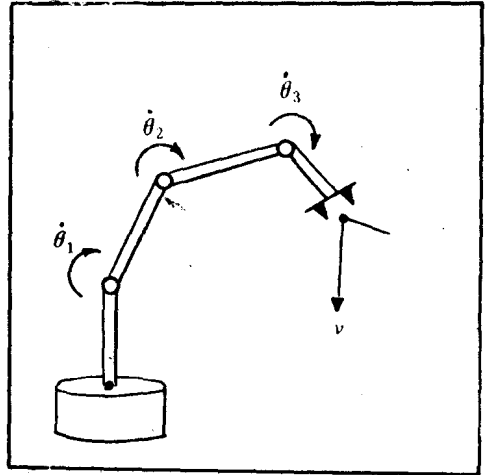


图 1.5 各关节的速率与终端执行器的速度之间的几何关系可用雅可比矩阵来描述。

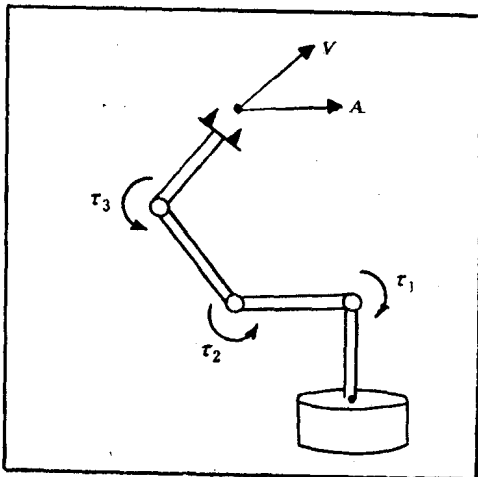


图 1.6 驱动器所施加的扭矩及操作器的合成运动之间的关系包含在运动的动力学方程中。

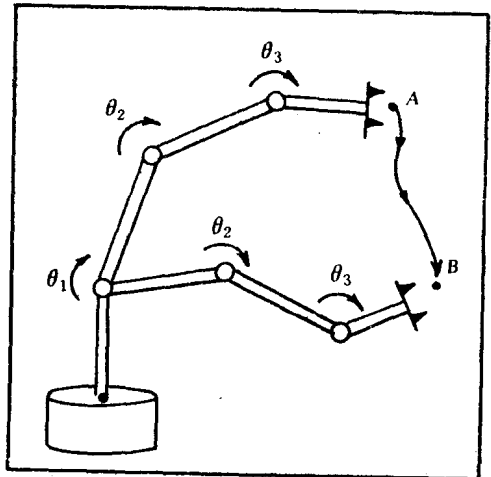


图 1.7 为了移动终端执行器穿过空间从A点到B点，我们必须计算一轨迹使每一关节都跟随它。

*我们采用驱动器做为驱动操作器装置的通用名词，例如：电机、液压和气动驱动器，肌肉型驱动器等等。

轨迹的产生

要使操作器以一种平滑受控的方式由此到彼运动时，一个通常的方法是使每一关节的运动按指定的平滑的时间函数所确定。通常每一关节是同时启动和停止其运动，这样，操作器的运动显得协调。如何严格地计算这些运动函数就是轨迹产生问题。（见图 1. 7）。

通常一个路径不仅由终点而且还要由一些中间点，或取道点来描述。操作器必须经过贯穿这些点的路径到达终点。在这些实例中，样条这一名词常用来论及通过一组中间点的平滑函数。

为了迫使终端执行器沿一直线（或其它几何形状）穿过空间，这一运动必须转变为相应的一组关节运动。这就是笛卡尔轨迹产生，将在第七章中详论。

位置控制

某些操作器装备步进电机或其它执行机构，它们能直接地实现某一要求的轨迹。但是大部分操作器是靠这样的执行机构驱动，这些机构提供力或力矩驱使连杆运动。这时，用以计算产生所要求运动的各个扭矩的算法就需要了。动力学问题集中于这类算法的设计，但它本身未形成一解答。位置控制系统的一个基本点是在已知系统参量下能自动地补偿误差，并能抑制使系统偏离所要求轨迹的干扰。为实现这一点，为执行机构计算扭矩命令的控制算法要监视位置和速度传感器（见图 1. 8）。第八章我们将应用操作器动力学的知识和某些控制论的思想来探讨操作器位置控制算法的设计问题。

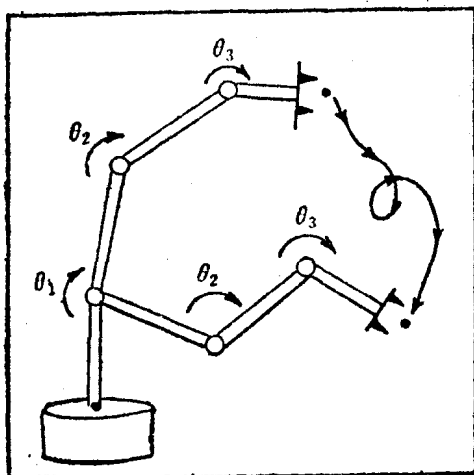


图 1. 8 为了使操作器遵循所希望的轨迹，必须装设位置控制系统。这种系统使用关节传感器的反馈以保持操作器不离开轨迹。

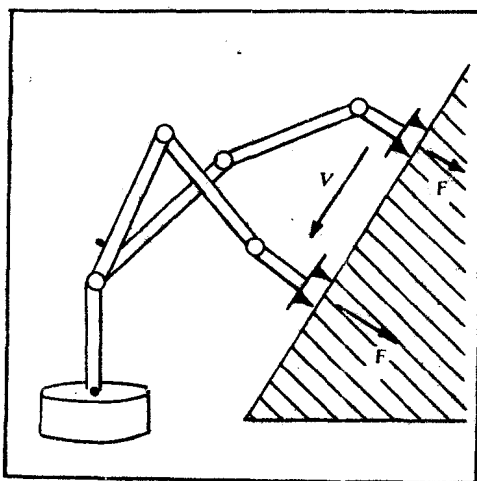


图 1. 9 为使操作器滑过一表面，并施加一恒定的力，需要应用一个复合的位置—力控制系统。

力控制

操作器在它和零件、工具或与工作表面接触时，对接触力的控制能力在实际应用中看来具有很大意义。在某一情况下我们常常考虑某个或另一个控制参量可利用时，力控制是对位置控制的补充。当操作器在自由空间运动时，只是位置控制有意义，因为没有表面对抗它。

然而当一操作器接触一固体表面时，位置控制方案在接触处会造成过大的力，或者在某些应用中希望接触时却与表面失去接触。既然操作器很少能同时在所有方向上受接触面的限制，用一混合的或复合的控制就需要了，某几个方向受位置控制规律所控制而其它方向受力控制规律所控制（见图 1.9）。第九章将介绍实现这一力控制的方法。

为机器人编程

机器人编程语言用作使用者与工业机器人之间的接口。其中心问题如下：通过空间的运动如何使编程员易于描述？如何对多台操作器编程使它们能平行作业？如何使传感器的作用以语言描述？

机器人操作器由于它的柔性也就是可编程性使它与固定的自动化有区别。不仅操作器的运动可以编程，而且通过传感器的应用以及和工厂其它自动装置的通讯，机器人可以在作业进展时适应任务的变化（见图 1.10）。

当操作器和其它可编程自动装置愈来愈多地在工业中采用时，用户接口的改进显得特别重要。操作器编程问题包含了所有“传统的”计算机编程问题，它本身就是一个很大的课题。此外操作器编程的某些特殊性又产生一些附加问题。这些将在第十章中讨论。

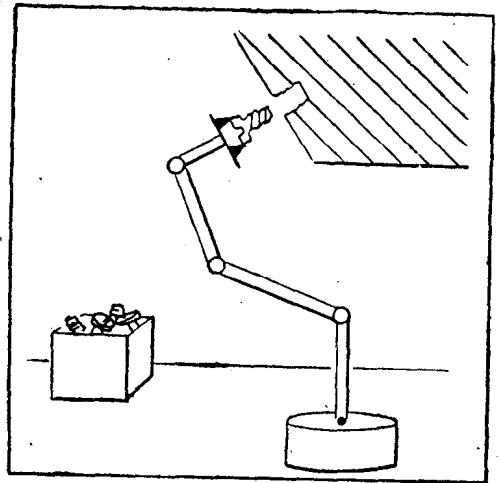


图 1.10 操作器及终端驱动器所希望的运动，所希望的接触力和复杂的操作策略可在机器人编程语言中描述。

1.3 符号表示

科学与工程中符号表示总是一个值得注意的问题。本书中我们应用下述惯例：

1. 用大写的变量表示向量或矩阵，小写表示标量。

2. 前下标和前上标表明一量是在哪一坐标系中描述。例如 ${}^A P$ 表示一位置矢量在坐标系 $\{A\}$ 中描述， ${}^A_B R$ 为一旋转矩阵*，表示坐标系 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 的关系（也就是说在 $\{A\}$ 坐标内描述 $\{B\}$ 坐标的旋转关系—译注）。

3. 后上标如通常一样表示矩阵的转置和逆，如 R^{-1} ， R^T 。

4. 后下标并未对应任何严格的习惯，但可用来表示一矢量的分量（例如标注 x 、 y 或 z ），或可用来表示如 P 螺钉，螺钉的位置。

5. 我们将应用许多三角函数。为了简化一个角度余弦表示，可以采用以下任何形式： $\cos\theta_1 = C\theta_1 = C_1$ 。

向量取列矢量的形式，所以行矢量将取它的转置。

有一点要注意，许多力学教科书在很抽象的水平上处理矢量，而且照例在表示式中使用对不同坐标系定义的矢量。一个最明白的例子就是对不同参考坐标系的或已知的矢量的相

*这一名词将在第二章中介绍。

加。这样就很方便地引出紧凑而又雅致的公式。例如计算角速度 ${}^0\omega_4$ ，一个由四个刚体（如操作器连杆）串联的最后一刚体相对该链基础的角速度。由于角速度是矢量相加，我们为最后连杆角速度写一很简单的矢量公式：

$${}^0\omega_4 = {}^0\omega_1 + {}^1\omega_2 + {}^2\omega_3 + {}^3\omega_4. \quad (1.1)$$

然而，除非这些量是对一个统一的坐标系而言，否则它们是不能相加的。所以（1.1）方程隐含了许多计算“工作”。对于机械操作器这一特殊情况的研究，像（1.1）式隐含着许多坐标变换的整理事务。这就是我们实际中必需处理的问题。

所以，在本书中我们在矢量表示中携带参考框的信息，并且，除非这些矢量是在同一坐标系中，否则我们不把它们相加。用此法，我们导出解决“整理操作”问题的表达式，它可直接用于实际的数值计算中。

参 考 文 献

- (1) B.Roth, "Principles of Automation," Future Directions in Manufacturing Technology, Based on the Unilever Research and Engineering Division Symposium held at Port Sunlight, April 1983, Published by Unilever Research, UK.

一般参考书

- (2) R.Paul, "Robot Manipulators," MIT Press, 1982.
- (3) M.Brady et al, "Robot Motion," MIT Press, 1983.
- (4) G.Beni, and S. Hackwood, editors, "Recent Advances in Robotics," Wiley, 1985.
- (5) R.Dorf, "Robotics and Automated Manufacturing," Reston, 1983.
- (6) A.Critchlow, "Introduction to Robotics" Macmillan, 1985.
- (7) W.Synder, "Industrial Robots: Computer Interfacing and Control," Prentice Hall 1985.
- (8) Y.Koren, "Robotics for Engineers," McGraw Hill, 1985.
- (9) V.Hunt, "Industrial Robotics Handbook," Industrial Press Inc, 1983.
- (10) J.Engelberger, "Robots in Practice" AMACOM, 1980.

一般参考期刊和杂志

- (11) Robotics Today.
- (12) Robotics World.
- (13) The Industrial Robot.
- (14) IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- (15) IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics.
- (16) IEEE Transactions on Automatic Control.
- (17) International Journal of Robotics Research.
- (18) ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control.

练 习

- 1.1 (20) 对过去30年工业机器人发展的大事做一个编年表。见参考资料。
- 1.2 (20) 做一个统计图，表示工业机器人的主要领域（例如点焊、装配等），以及当前在每一应用领域