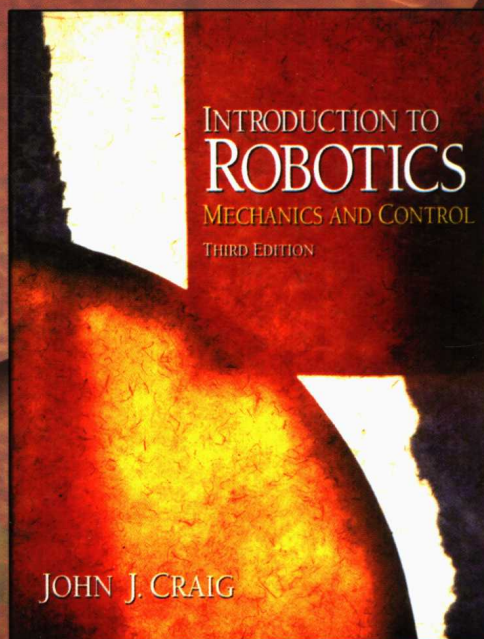


(原书第3版)

# 机器人学导论

Introduction to Robotics  
Mechanics and Control  
Third Edition

(美) John J. Craig 著  
负超 等译



机械工业出版社  
China Machine Press



(原书第3版)

# 机器人学导论

Introduction to Robotics  
Mechanics and Control  
Third Edition

(美) John J. Craig 著  
负超 等译



机械工业出版社  
China Machine Press

本书系统讲解机器人学的理论知识，主要内容包括：机器人操作臂的几何性质，引起操作臂运动的力和力矩，与操作臂机械设计有关的问题和控制方法，机器人编程方法等。本书曾作为美国斯坦福大学机器人学导论的教材，经过两次修订。书中还包括大量分级的习题和编程作业，适合教学参考。

本书可作为高等院校相关专业的教材或参考书，也可供相关技术人员参考。

Simplified Chinese edition copyright © 2006 by Pearson Education Asia Limited and China Machine Press.

Original English language title: *Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Third Edition* (ISBN 0-201-54361-3) by John J. Craig. Copyright © 2005.

All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Education, Inc..

本书封面贴有Pearson Education（培生教育出版集团）激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号：图字：01-2004-6542

### 图书在版编目（CIP）数据

机器人学导论（原书第3版） /（美）克来格（Craig, J. J.）著，俞超等译. -北京：机械工业出版社，2006.6

书名原文：Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Third Edition

ISBN 7-111-18681-8

I. 机… II. ①克… ②俞… III. 机器人学 IV. TP24

中国版本图书馆CIP数据核字（2006）第021007号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037）

责任编辑：乔翠梅 耿 娅

北京京北制版印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2006年6月第1版第1次印刷

184mm × 260mm · 20.75印张

定价：42.00元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换  
本社购书热线（010）68326294

# 译者序

机器人技术是集机械、电子、自动控制、计算机以及人工智能等多学科领域的一项综合性应用技术。

人类利用自然力代替人力劳动创造了许多自动工具和自动机械，这已有几千年的历史。例如中国西周时代的歌舞伶人，春秋后期木匠鲁班制造的木鸟，东汉时期张衡发明的计里鼓车，后汉三国时期诸葛亮发明的木牛流马，国外公元前2世纪的古希腊人发明了一种自动机，1738年法国人发明了一种机器鸭，1773年瑞士钟表匠杰克·道罗斯发明的能自动书写和演奏的玩偶，18世纪末日本人发明的端茶玩偶等。但是真正按照现代机器人的定义研究、制造和应用机器人的历史距今只有几十年。实际上，真正意义上的机器人是随着计算机的出现诞生的。1961年美国Unimate公司生产了第一台商用工业机器人。1980年开始日本等国迅速普及工业机器人，国际上称这年为“机器人元年”。随着机构学、自动控制理论、计算机技术的发展，传统的机器人已由欠自由度操作臂发展到冗余度操作臂、行走机器人、拟人机器人、多机器人系统等多种形式，2005年9月，日本已研制出能够控制平衡的骑自行车的拟人机器人。

本书是美国斯坦福大学的J.J.Craig教授在机器人学和机器人技术方面多年的研究和教学工作的积累。Craig教授根据机器人学的特点，将理论和实际应用密切结合，按照刚体力学、分析力学、机构学和控制理论中的原理和定义对机器人运动学、动力学和控制中的原理进行了严谨的阐述，语言精练，内容深入浅出，例题简单易懂，没有丝毫玄虚造作，俨然是大师风范，体现出Craig教授在机器人学方面高深的造诣。本书不愧为当今机器人学研究领域的经典之作。

本书第1~3章、第9~13章以及部分习题答案、相关公式和索引由负超翻译，第4章由李成群翻译，第5章由陈心颐翻译，第6章由宁凤艳翻译，第7、8章由高志慧翻译。全书由负超校对整理，对原书中的错误作了修正，对描述不清之处作了补充完善。

承蒙感谢对本书校对稿提出的宝贵意见。

本书可作为机械电子工程专业、自动控制专业和计算机专业高年级本科生、硕士生或博士生的教学参考书，也可供从事机器人和自动化装备等应用开发工作的技术人员参考。

限于译者的经验和水平，书中难免存在许多缺点和错误，欢迎读者批评指正。

译者

2005年9月28日

# 前 言

科学家常会感到通过自己的研究工作在不断地认识自我，物理学家在工作中认识到了这一点，同样，心理学家和化学家也认识到了这一点。在机器人学的研究中，研究领域和研究者自身之间的关系尤为明显。并且，与那些纯理论的自然科学不同，当前机器人学是一门侧重于综合的工程科学。也许正是这个原因，才使许多人迷恋于这个领域。

机器人学研究的是怎样综合运用机械、传感器、驱动器和计算机来实现人类某些方面的功能。显然，这是一项庞大的任务，它必然需要运用各种“传统”领域的研究思想。

现今，机器人学诸方面的研究工作都是由不同领域的专家们进行的。通常没有一个人能够完全掌握机器人领域的所有知识。因此，自然有必要对这个研究领域进行分类。在更高的层次上，可把机器人学划分为四个主要领域：机械操作、移动、计算机视觉和人工智能。

本书介绍机械操作的理论和工程知识，这是机器人学的分支学科，它是建立在几个传统学科基础之上的。主要的相关学科有力学、控制理论、计算机科学。在本书中，第1章至第8章包括机械工程和数学的专题，第9章至第11章为控制理论的题材，第12章和第13章属于计算机科学的内容。另外，本书自始至终强调通过计算解决问题。例如，与力学密切相关的每一章都有一节简要介绍计算方面的问题。

本书源于斯坦福大学1983~1985年秋季学期的“机器人学导论”的讲义。第1版和第2版在1986~2002年间被许多大学采用。第3版得益于这些应用，并且根据多方面的反馈意见做了修改和改进。在此，向那些对本书作者提出修正意见的人表示感谢。

本书适用于高年级本科生或者低年级研究生课程。选修此课程的学生如果学过静力学和动力学这两门基础课程之一，同时学习过线性代数，并且能够使用计算机高级语言编程，这将有助于学习。此外，虽然不必先修控制理论方面的入门课程，但学过这门课程也是有益的。本书的目标之一是以简单、直观的方式介绍机器人学的知识。特别需要指出的是，虽然本书很多内容源于机械专业，但本书的读者不一定是机械工程师。在斯坦福大学，很多电气工程师、计算机科学家、数学家都认为本书具有很强的可读性。

虽然本书直接由机器人系统的研发工程师使用，但是对于任何将要从事机器人研究工作的人，本书内容应当被看作是重要的背景资料。同样，至少从事过某种硬件的软件开发人员和不直接参与机器人的机械和控制的研究人员，应当具备一些本书提供的背景知识。

第3版和第2版相似，分为13章。本书的材料适合于一个学期讲授，如果要在半学期内讲授，需要略去一些章节。即便如此，仍然无法深入讲解所有专题。本书在编写时从某些方面考虑了这一点；例如，大多数章节只采用一种方法解答常见的问题。编写本书的主要问题之一就是尽量在限定的教学时间内为每个主题合理地分配时间。为此，我的办法是只考虑那些直接与学习机器人操作相关的材料。

在每章的最后都有一组习题。在每道习题题号后的方括号中给出习题的难度系数。难度系数在[00]到[50]之间。[00]是最简单的题目，[50]是尚未被解决的研究性问题<sup>⊖</sup>。当然，一

⊖ 我采用了与D.Knuth所著《The Art of Computer Programming》(Addison-Wesley出版)同样的难度等级。

个人认为困难的问题，另一个人可能认为容易，因此，难度系数在某些情况下会使人疑惑。不过，毕竟这种方法在某种程度上对这些习题的难度作出了评价。

在每章的末尾，有一个编程作业，学生可以把该章的知识应用到一个简单的三关节平面操作臂中。这个简单的操作臂足以证明大多数一般操作臂的所有原理，而不必使学生陷入过于复杂的问题中。每个编程作业都建立在前一个作业的基础上，到课程结束时，学生就会得到一个完整的操作臂软件程序库。

另外，我们在本书第3版中增补了使用MATLAB的习题。第1~9章共有12道使用MATLAB的习题。这些习题由俄亥俄大学的Robert L. Williams II教授编写，我对他所做的贡献深表感谢。这些习题可以配合澳大利亚CSIRO首席研究科学家Peter Corke编写的MATLAB机器人学工具箱<sup>⊖</sup>使用。

第1章是机器人学的概述，介绍一些背景资料、基本思想和本书所使用的符号，并预览后面各章的内容。

第2章包括描述三维空间中的位置与方法的数学知识。这是极为重要的内容：通过定义机械操作本身与周围空间的移动物体（部件、工具、机器人自身）联系起来。我们需要用一种易于理解并且尽可能直观的方式来描述这些动作。

第3章和第4章讨论机械操作臂的几何性质。介绍机械工程学科中的运动学分支，这个分支研究运动但不考虑引起这种运动的力。在这两章里，我们讨论操作臂运动学，但把研究范围限定在静态定位问题上。

第5章将运动学的研究范围扩展到速度和静力方面。

第6章开始研究引起操作臂运动的力和力矩。这就是操作臂动力学问题。

第7章描述操作臂在空间的运动轨迹。

第8章涉及许多与操作臂机械设计有关的问题。例如，设计多少个关节是适宜的，关节的类型应是什么，它们需如何布局。

第9章和第10章研究操作臂的控制方法（通常利用数字计算机），使其准确地经过预先设定的空间轨迹。第9章研究线性控制方法，第10章将研究拓展到非线性领域。

第11章讨论操作臂的主动控制。这就是研究如何对操作臂施加的力进行控制，这种控制模式在操作臂接触周围环境的情况下非常重要，比如操作臂用海绵擦窗户。

第12章概述机器人编程方法，特别是机器人编程系统中所需的基本内容以及与工业机器人编程相关的特殊问题。

第13章介绍离线仿真和编程系统，其中介绍了人与机器人接口的最新进展。

我非常感谢牺牲宝贵时间协助我完成这本书的许多人。首先，感谢斯坦福大学1983~1985届ME219班的同学们，他们在学习初稿时发现了不少错误，并提出了许多建议。Bernard Roth教授在多方面给予了帮助，不仅对草稿提出了建设性的意见，而且为我提供了完成第1版的条件。在SILMA公司，我得到了很好的仿真环境和资源，从而使我完成了第2版。Jeff Kerr博士写出第8章的初稿，Robert L. Williams II教授设计了每章最后的MATLAB习题。Peter Corke扩充了他的Robotics Toolbox（机器人学工具箱），以此支持本书采用的Denavit-Hartenberg符号体系。在此，我也深深地感谢我在机器人学方面的导师Marc Raibert、Carl Ruoff、Tom Binford和Bernard Roth。

<sup>⊖</sup> 关于MATLAB机器人学工具箱，请访问<http://www.ict.csiro.au/robotics/ToolBox7.htm>。

我还要感谢来自斯坦福大学、SILMA公司、Adept公司和其他地方的许多人，他们以各种方式对我提供了帮助，他们是John Mark Agosta、Mike Ali、Lynn Balling、Al Barr、Stephen Boyd、Chuck Buckley、Joel Burdick、Jim Callan、Brian Carlisle、Monique Craig、Subas Desa、Tri Dai Do、Karl Garcia、Ashitava Ghosal、Chris Goad、Ron Goldman、Bill Hamilton、Steve Holland、Peter Jackson、Eric Jacobs、Johann Jäger、Paul James、Jeff Kerr、Oussama Khatib、Jim Kramer、Dave Lowe、Jim Maples、Dave Marimont、Dave Meer、Kent Ohlund、Madhusudan Raghavan、Richard Roy、Ken Salisbury、Bruce Shimano、Donalda Speight、Bob Tilove、Sandy Wells 和Dave Williams。

斯坦福大学的Roth教授在给2002届的学生们讲授机器人课程时使用了本书第2版，并指出了许多错误，这些错误在第3版中做了修订。

最后，我还要感谢Prentice Hall出版社的Tom Robbins对第1版和本版给予的指导和帮助。

J. J. C.

# 目 录

译者序	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 操作臂的机构与控制	3
1.3 符号	10
参考文献	11
习题	12
编程习题	12
MATLAB习题	13
第2章 空间描述和变换	14
2.1 概述	14
2.2 描述: 位置、姿态与坐标系	14
2.3 映射: 从坐标系到坐标系的变换	17
2.4 算子: 平移、旋转和变换	22
2.5 总结和说明	25
2.6 变换算法	26
2.7 变换方程	28
2.8 姿态的其他描述方法	29
2.9 自由矢量的变换	39
2.10 计算分析	40
参考文献	41
习题	42
编程习题	46
MATLAB习题1	47
MATLAB习题2	47
第3章 操作臂运动学	48
3.1 概述	48
3.2 连杆描述	48
3.3 关于连杆连接的描述	50
3.4 对连杆附加坐标系的规定	52
3.5 操作臂运动学	57
3.6 驱动器空间、关节空间和笛卡儿空间	59
3.7 举例: 两种典型机器人的运动学问题	60
3.8 坐标系的标准命名	68
3.9 工具的定位	70
3.10 计算问题	70
参考文献	70
习题	71
编程习题	76
MATLAB习题	76
第4章 操作臂逆运动学	78
4.1 概述	78
4.2 可解性	78
4.3 当 $n < 6$ 时操作臂子空间的描述	81
4.4 代数解法与几何解法	83
4.5 通过化简为多项式的代数解法	87
4.6 三轴相交的PIEPER解法	88
4.7 操作臂逆运动学实例	90
4.8 标准坐标系	97
4.9 操作臂求解	98
4.10 重复精度和定位精度	99
4.11 计算问题	99
参考文献	99
习题	100
编程习题	103
MATLAB习题	104
第5章 速度和静力	106
5.1 概述	106
5.2 时变位姿的符号表示	106
5.3 刚体的线速度和角速度	108
5.4 对角速度的进一步研究	110
5.5 机器人连杆的运动	113
5.6 连杆间的速度传递	113
5.7 雅可比	117
5.8 奇异性	119
5.9 作用在操作臂上的静力	121
5.10 力域中的雅可比	123



5.11 速度和静力的笛卡儿变换	124
参考文献	126
习题	127
编程习题	128
MATLAB习题	129
第6章 操作臂动力学	131
6.1 概述	131
6.2 刚体的加速度	131
6.3 质量分布	133
6.4 牛顿方程和欧拉方程	136
6.5 牛顿-欧拉迭代动力学方程	137
6.6 迭代形式与封闭形式的动力学方程	140
6.7 封闭形式动力学方程应用举例	140
6.8 操作臂动力学方程的结构	143
6.9 操作臂动力学的拉格朗日公式	145
6.10 建立笛卡儿空间的规范化 操作臂动力学方程	147
6.11 计及非刚体效应	150
6.12 动力学仿真	151
6.13 计算效率问题	151
参考文献	153
习题	155
编程习题	157
MATLAB习题1	158
MATLAB习题2	159
MATLAB习题3	159
第7章 轨迹的生成	161
7.1 概述	161
7.2 关于路径描述和路径生成的综述	161
7.3 关节空间规划方法	162
7.4 笛卡儿空间规划方法	173
7.5 笛卡儿路径的几何问题	175
7.6 路径的实时生成	177
7.7 使用机器人编程语言描述路径	178
7.8 使用动力学模型的路径规划	179
7.9 无碰撞路径规划	179
参考文献	180
习题	180
编程习题	182
MATLAB习题	183
第8章 操作臂的机械设计	184
8.1 概述	184
8.2 基于任务需求的设计	184
8.3 运动学构形	186
8.4 工作空间属性的定量测量	191
8.5 冗余机构与闭链机构	193
8.6 驱动方式	195
8.7 刚度与变形	197
8.8 位置检测	200
8.9 力检测	201
参考文献	202
习题	204
编程习题	207
MATLAB习题	207
第9章 操作臂的线性控制	209
9.1 概述	209
9.2 反馈与闭环控制	209
9.3 二阶线性系统	210
9.4 二阶系统的控制	216
9.5 控制律的分解	217
9.6 轨迹跟踪控制	219
9.7 抗干扰	219
9.8 连续时间控制与离散时间控制	221
9.9 单关节的建模和控制	221
9.10 工业机器人控制器的结构	226
参考文献	227
习题	227
编程习题	229
MATLAB习题	229
第10章 操作臂的非线性控制	231
10.1 概述	231
10.2 非线性系统和时变系统	231
10.3 多输入多输出控制系统	234
10.4 操作臂的控制问题	235
10.5 实际应用中的问题	236
10.6 当前的工业机器人控制系统	239
10.7 李雅普诺夫稳定性分析	241
10.8 基于笛卡儿空间的控制系统	244

10.9 自适应控制·····	248	12.4 机器人编程语言的必要条件·····	273
参考文献·····	248	12.5 机器人编程语言的特殊问题·····	276
习题·····	249	参考文献·····	278
编程习题·····	252	习题·····	279
第11章 操作臂的力控制·····	253	编程习题·····	280
11.1 概述·····	253	第13章 离线编程系统·····	281
11.2 工业机器人在装配作业中的应用·····	253	13.1 概述·····	281
11.3 局部约束任务中的控制坐标系·····	254	13.2 离线编程系统的核心问题·····	282
11.4 力/位混合控制问题·····	258	13.3 引导仿真器·····	286
11.5 质量-弹簧系统的力控制·····	258	13.4 离线编程系统的自动子任务·····	292
11.6 力/位混合控制方法·····	261	参考文献·····	293
11.7 当前的工业机器人控制方法·····	265	习题·····	295
参考文献·····	266	编程习题·····	295
习题·····	267	附录A 三角恒等式·····	296
编程习题·····	269	附录B 24种角坐标系的旋转矩阵定义·····	297
第12章 机器人编程语言及编程系统·····	270	附录C 逆运动学公式·····	300
12.1 概述·····	270	部分习题答案·····	301
12.2 机器人编程的三个级别·····	270	索引·····	308
12.3 应用实例·····	272		

# 第1章 绪 论

## 1.1 背景

工业自动化的历史是以技术手段的快速更新为特征的。这种自动化技术的更新不论是看作世界经济发展的诱因还是结果，都和世界经济密切相关。工业机器人在20世纪60年代毫无疑问是一种独特的设备<sup>[1]</sup>，将其和计算机辅助设计（CAD）系统、计算机辅助制造（CAM）系统结合在一起应用，这是现代制造业自动化的最新发展趋势。这些技术正在引导工业自动化向一个新的领域过渡<sup>[2]</sup>。

在北美，20世纪80年代初期工业机器人的应用很多，到晚期有一个短暂的回落。从那时开始，工业机器人市场虽然像所有产品一样受到经济波动的影响，但仍然不断成长（图1-1）。

图1-2反映了机器人在世界主要工业区的年安装使用量。我们注意到日本的统计数字在某种程度上与其他地区不同：他们将一些世界其他地区认为不属于机器人的机器也算作机器人（然而这些机器仅能被看作是工厂的设备）。因此，日本的统计数字稍有夸张。

工业机器人使用量增长的主要原因是价格不断降低。图1-3表明在20世纪90年代的十年间，机器人价格降低而劳动力成本增加。机器人不仅越来越便宜，而且它们在工业领域变得更加有效——速度更快、操作更准确、更富有柔性。如果在成本统计中将质量因素考虑在内，应用机器人的成本将比它的实际价格下降快得多。由于机器人作业变得愈加有效，而劳动力成本不断升高，因此工业中越来越多的作业更适合于应用机器人自动化。这是推动工业机器人市场发展的主要因素。其次是非经济因素造成的，随着机器人作业能力的增强，它们可以完成更加危险或是人类不可能完成的工作。

虽然工业机器人的应用日趋成熟，但2000年在美国近78%的机器人仍应用于焊接和物料搬运作业。而在技术要求更高的领域，例如机器人装配作业，则仅装备有大约10%的机器人<sup>[3]</sup>。

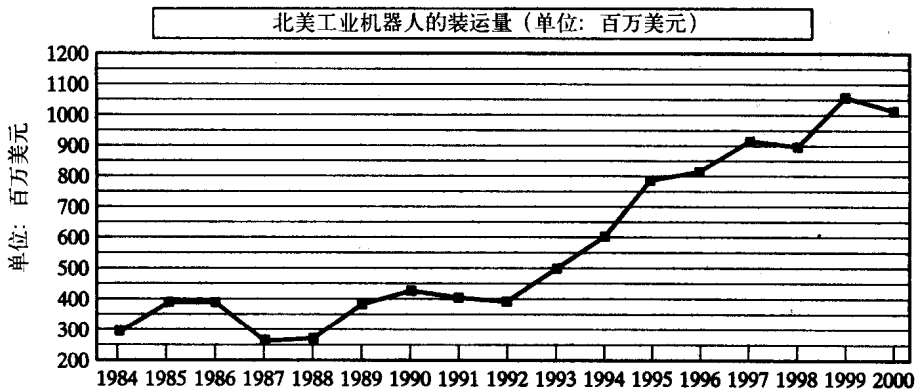


图1-1 北美工业机器人的装运量 (单位: 百万美元)<sup>[3]</sup>

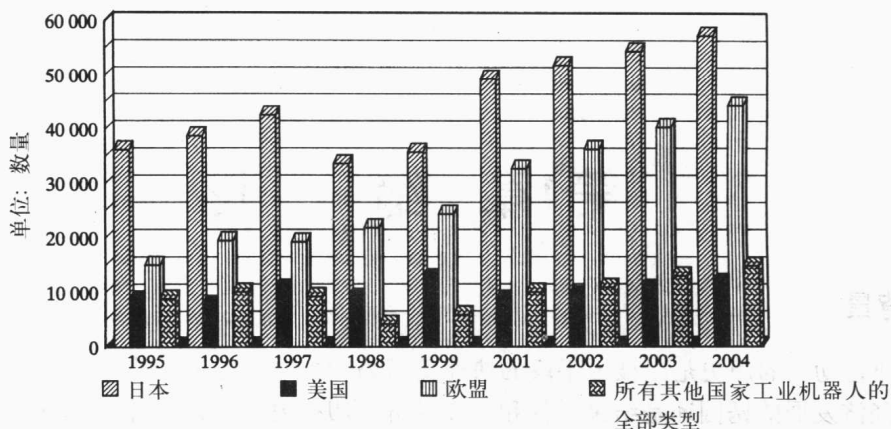


图1-2 1995-2000年各种用途工业机器人的年安装量和2001-2004年预计年安装量<sup>[3]</sup>

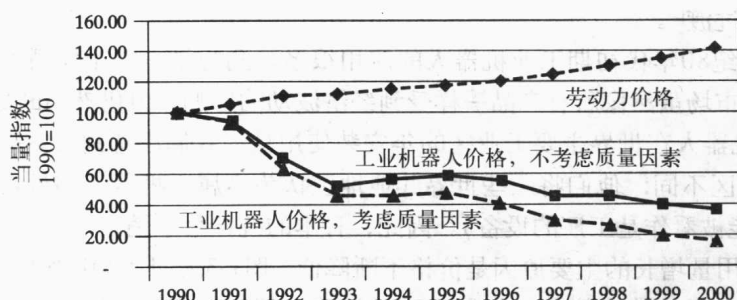


图1-3 20世纪90年代机器人价格与人力成本的比较<sup>[3]</sup>

本书重点阐述了操作臂的机构和控制理论，操作臂是工业机器人中最重要的一种类型。操作臂是否可称作工业机器人受到争议。如图1-4所示的装备通常被认为属于工业机器人的范畴，而数控（NC）磨床则通常在此范畴之外。这种区别在某种程度上依赖于设备可编程能力的复杂程度。如果一台机械设备在编程后可实现多种用途，则很可能被称作工业机器人。如果一台设备的主要功能都被限定用来执行同一类型任务，一般则把它称为专用的自动化装备。从本书的目的出发，我们将不讨论这种区别，书中的大部分内容均可应用于各种可编程机械。

一般来说，对于操作臂的机构和控制理论的研究并不是一门新的科学，它只不过是对传统学科理论的一种综合。机械工程理论为研究静态和动态环境下的操作臂提供了方法论；数学方法用于描述机械手空间运动及其特性；控制理论为实现期望运动或力提供了各种设计方法和评估算法；电气工程技术可用于传感器及工业机器

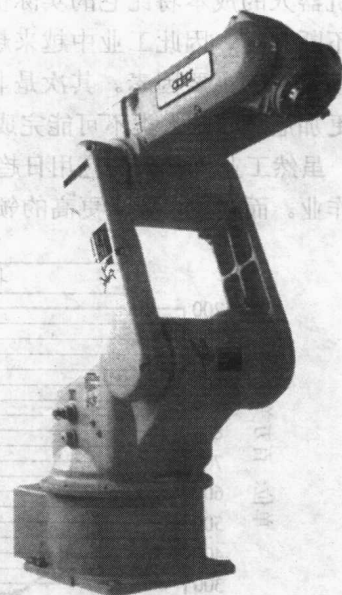


图1-4 被广泛应用的Adept 6机械手有6个转动关节（经Adept公司许可）

人接口的设计；计算机技术提供了执行期望任务所需的编程平台。

1  
3

## 1.2 操作臂的机构与控制

下面几节介绍一些术语，并对文章中将要涉及的一些专题进行概述。

### 位姿描述

在机器人研究中，我们通常在三维空间中研究物体的位置。这里所说的物体既包括操作臂的杆件、零部件和抓持工具，也包括操作臂工作空间内的其他物体。通常这些物体可用两个非常重要的特性来描述：位置和姿态。自然我们会首先研究如何用数学方法表示和计算这些参量。

为了描述空间物体的位姿，我们一般先将物体固置于一个空间坐标系，即参考系中，然后我们就在这个参考坐标系中研究空间物体的位置和姿态，如图1-5所示。

任一坐标系都能用作描述物体位姿的参考系，我们经常在不同参考系中变换表示物体空间位姿的形式。在第2章中，我们将研究同一物体在不同坐标系中空间位姿的描述方法和数学计算方法。

刚体位姿的研究对于机器人以外的领域也是非常有意义的。

### 操作臂正运动学

运动学研究物体的运动，而不考虑引起这种运动的力。在运动学中，我们研究位置、速度、加速度和位置变量对于时间或者其他变量的高阶微分。这样，操作臂运动学的研究对象就是运动的全部几何和时间特性。

几乎所有的操作臂都是由刚性连杆组成的，相邻连杆间由可作相对运动的关节连接。这些关节通常装有位置传感器，用来测量相邻杆件的相对位置。如果是转动关节，这个位移被称为关节角。一些操作臂含有滑动（或移动）关节，那么两个相邻连杆的位移是直线运动，有时将这个位移称为关节偏距。

操作臂自由度的数目是操作臂中具有独立位置变量的数目，这些位置变量确定了机构中所有部件的位置。自由度对所有的机构具有普遍意义。例如，四杆机构只有一个自由度（尽管它有三个可以运动的杆件）。对于一个典型的工业机器人来讲，由于操作臂大都是开式的运动链，而且每个关节位置都由一个独立的变量定义，因此关节数目等于自由度数目。

末端执行器安装在操作臂的自由端。根据机器人的不同应用场合，末端执行器可以是一个夹具、一个焊枪、一个电磁铁或是其他装置。我们通常用附着于末端执行器上的工具坐标系描述操作臂的位置，与工具坐标系相对应的是与操作臂固定底座相联的基坐标系（如图1-6所示）。

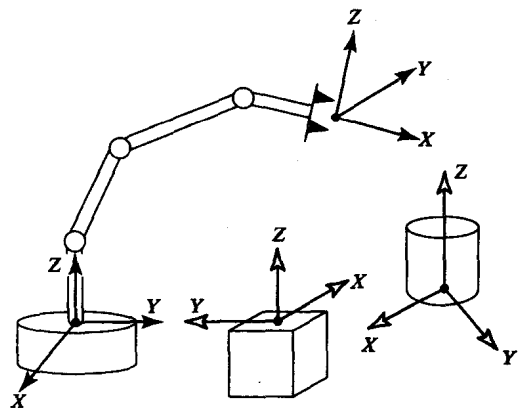


图1-5 在坐标系（参考系）中的操作臂  
和工作空间内的其他物体



在操作臂运动学的研究中一个典型的问题是操作臂正运动学。计算操作臂末端执行器的位置和姿态是一个静态的几何问题。具体来讲,给定一组关节角的值,正运动学问题是计算工具坐标系相对于基坐标系的位置和姿态。一般情况下,我们将这个过程称为从关节空间描述到笛卡儿空间描述的操作臂位置表示<sup>⊖</sup>。这个问题将在第3章中详细论述。

### 操作臂逆运动学

在第4章中,我们将讨论操作臂逆运动学。这个问题就是给定操作臂末端执行器的位置和姿态,计算所有可达给定位置和姿态的关节角(如图1-7所示)。这是操作臂实际应用中的一个基本问题。

这是一个相当复杂的几何问题,然而人类或其他生物系统每天都要进行数千次这样的求解。对于机器人这样一个人工智能系统,我们需要在控制计算机中生成一种算法来实现这种逆向计算。从某种程度上讲,逆运动学问题的求解对于操作臂系统来说是最重要的部分。

我们认为这是个“定位”映射问题,是将机器人位姿从三维笛卡儿空间向内部关节空间的映射。当机器人目标位置用外部三维空间坐标表示时,则需要进行这种映射。某些早期的机器人没有这种算法,它们只能简单地被移动(有时要由人工示教)到期望位置,同时记录一系列关节变量(例如各关节空间的位置和姿态)以实现再现运动。显然如果机器人只是单纯地记录和再现机器人的关节位置和运动,那么就不需要任何从关节空间到笛卡儿空间的变换算法。然而现在已经很难找到一台没有这种逆运动学算法的工业机器人。

逆运动学不像正运动学那样简单。因为运动学方程是非线性的,因此很难得到封闭解,有时甚至无解。同时提出了解的存在性和多解问题。

上述问题的研究给人脑和神经系统在无意识的情况下引导手臂和手移动以及操作物体的现象做出了一种恰当的解释。

运动学方程解的存在与否限定了操作臂的工作空间。无解表示目标点处在工作空间之外,因此操作臂不能达到这个期望位姿。

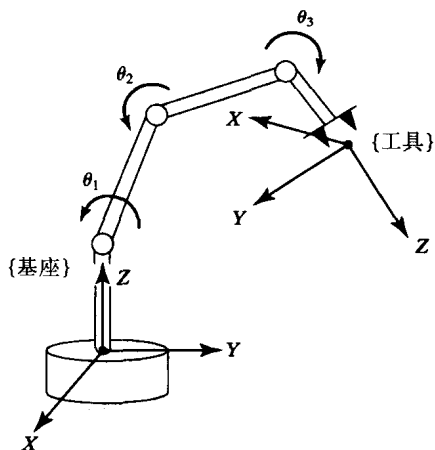


图1-6 正运动学方程描述了各个关节变量在工具坐标系与基坐标系间的函数关系

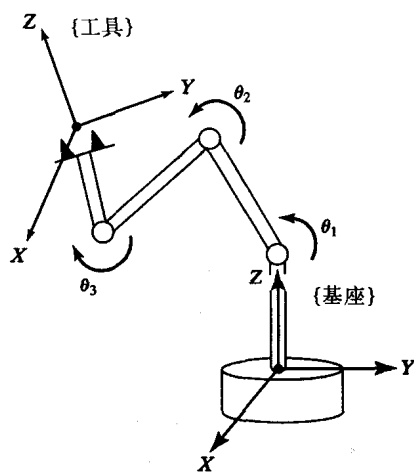


图1-7 给定工具坐标系的位置和姿态,通过逆运动学可以计算各关节变量

⊖ 在笛卡儿坐标系中,我们用三个变量来描述空间一点的位置,而用另外三个变量描述物体的姿态。有时将此称为任务空间或操作空间。

### 速度，静力，奇异性

除了分析静态定位问题之外，我们还希望分析运动中的操作臂。为操作臂定义雅可比矩阵可以比较方便地进行机构的速度分析。雅可比矩阵定义了从关节空间速度向笛卡儿空间速度的映射（如图1-8所示）。这种映射关系随着操作臂位形的变化而变化。在奇点雅可比矩阵是不可逆的。对这种现象的正确理解对于操作臂的设计者和用户都是十分重要的。

以第一次世界大战中坐在老式双翼飞机后座的机枪手为例（如图1-9所示）。当在前座舱中的驾驶员控制飞机飞行时，后座舱的机枪手负责射击敌人。为了完成这项任务，后座舱机枪被安装在有两个旋转自由度的机构上，这两个自由度分别被称为方位角和仰角。通过这两个运动（两个自由度），机枪手可以直接射击上半球面中任何方向的目标。

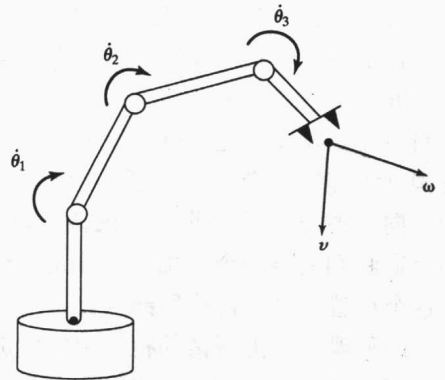


图1-8 关节速率和末端执行器速率的几何关系可以通过雅可比矩阵表示

7

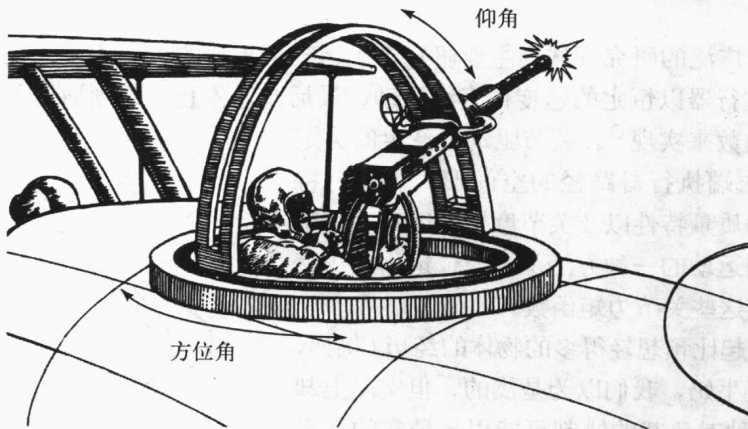


图1-9 第一次世界大战乘坐一个飞行员和一个后座舱机枪手的老式双翼飞机。

这种后座舱机枪的机构受奇异点的影响

一架敌机出现在方位角 $15^\circ$ 、仰角 $25^\circ$ 的地方！机枪手瞄准敌机并向其开火，与此同时，机枪手改变机枪的方位以便尽可能长时间地向敌机连续发射子弹。他成功地击落了敌机。

另一架敌机出现在方位角 $15^\circ$ 、仰角 $70^\circ$ 的地方！机枪手瞄准敌机并开始向其开火。敌机迅速躲避，相对于机枪手的飞机仰角越来越大。很快，敌机飞过机枪手飞机的正上方。敌机为何这样做？因为这样的话，机枪手就不能够准确瞄准敌机了！机枪手发现，当敌机飞过他的正上方时，他就需要快速地改变机枪的方位角。但是他并不能以如此快速的动作改变方位角，因而致使敌机逃掉了！

最终幸运的敌机飞行员因为机枪的奇异点而获救！枪的定位机构尽管在绝大部分操作范围内都能工作良好，但当枪竖直向上或接近这种方位时，它的工作就越来越不理想。为了跟踪穿过飞机正上方的目标，机枪手就需要使枪以非常快的速度绕着方位轴转动。目标越接近于飞机正上方的位置，机枪手就需要加速使枪绕方位轴转动来跟踪目标。如果目标直接飞过枪手正上方，他就需要使枪以无穷大的速度绕方位轴转动！

机枪手应该向机构设计者抱怨这个问题吗？能设计出更好的机构来避免这个问题吗？然而回答却是这个问题并不容易避免。事实上，任何一个只有两个转动关节的两自由度的定位机构都不能够避免这个问题。当机构处于这种位姿时，例如机枪竖直向上射击的情况，机枪的方向与方位角转轴共线。也就是说，当处于这点时，方位角转动改变不了机枪的方向。我们知道我们需要两个自由度来确定机枪的方位，但在这一点上，其中一个转动关节却失效了。在这个位置，这种机构局部退化，就像只有一个自由度一样（仅有仰角）。

这种现象是由所谓的机构奇异性造成的。所有的机械装置都会有这种问题，包括机器人。正如后座舱机枪一样，这些奇异性并不影响机器人手臂在其工作空间内的定位，然而，机械臂在这些奇异点附近运动时会出现一些问题。

操作臂并不总是在工作空间内自由运动，有时也接触工件或工作面，并施加一个静力。在这种情况下问题是一组什么样的关节力矩能够产生要求的接触力和力矩？为了解决这个问题，自然又要利用操作臂的雅可比矩阵。

### 动力学

动力学是一个广泛的研究领域，主要研究产生运动所需要的力。为了使操作臂从静止开始加速，使末端执行器以恒定的速度作直线运动，最后减速停止，必须通过关节驱动器产生一组复杂的力矩函数来实现<sup>①</sup>。关节驱动器产生的力矩函数形式取决于末端执行器路径的空间形式和瞬时特性、连杆和负载的质量特性以及关节摩擦等因素。控制操作臂沿期望路径运动的一种方法是，通过运用操作臂动力学方程求解出这些关节力矩函数。

许多人都有拿起比预想轻得多的物体的经历（例如，从冰箱中取出一瓶牛奶，我们以为是满的，但实际上却几乎是空的），这种对负载的错判可能引起异常的抓举动作。这种经验表明，人体控制系统比纯粹的运动规划更复杂。操作臂控制系统就是利用了质量以及其他动力学知识。同样，我们构造机器人操作臂运动控制的算法也应当把动力学考虑进去。

动力学方程的第二个用途是用于仿真。通过重构动力学方程以便以驱动力矩函数的形式来计算加速度，这样就可以在一组驱动力矩作用下对操作臂的运动进行仿真（见图1-10）。随着计算能力的提高和计算成本的下降，仿真在许多领域得到广泛应用并且

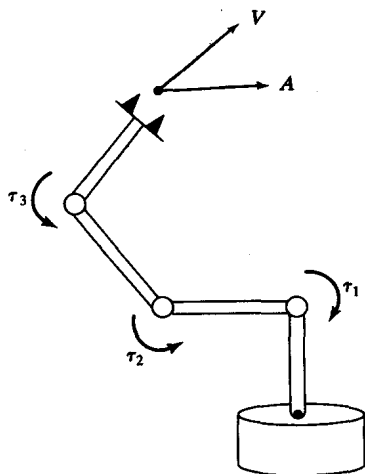


图1-10 动力学方程中驱动器的驱动力矩和操作臂运动之间关系的图示

① 我们用关节驱动器作为操作臂驱动装置的通用术语，它可以是电机、气缸、液压缸和人工肌肉。

显得越来越重要。

在第6章中，我们推导了动力学方程，这些动力学方程可用于对操作臂运动的控制和仿真。

### 轨迹生成

平稳控制操作臂从一点运动到另外一点，通常的方法是使每个关节按照指定的时间连续函数来运动。一般情况下，操作臂各关节同时开始或同时停止运动，这样操作臂的运动才显得协调。**轨迹生成**就是如何准确计算出这些运动函数（见图1-11）。

通常，一条路径的描述不仅需要确定期望目标，而且还需要确定一些中间点或路径点，操作臂必须通过这条路径到达目标。有时用术语**样条函数**来表示通过一系列路径点的连续函数。

为了使末端执行器在空间中走出一条直线（或其他的几何形状），那么必须将末端执行器的期望运动转化为一系列等效的关节运动。这种**笛卡儿轨迹生成**将在第7章中讨论。

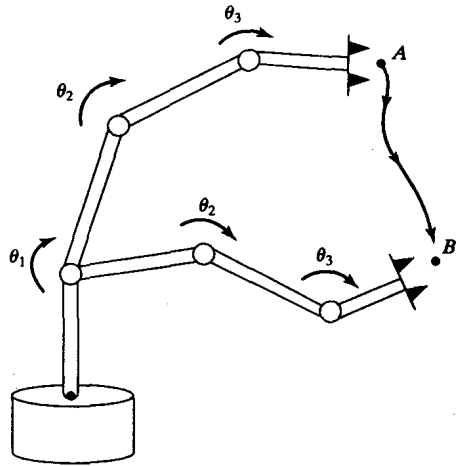


图1-11 为了使末端执行器通过空间的A点运动到B点，必须为各个关节计算一个连续运动轨迹

### 操作臂设计与传感器

尽管从理论上说操作臂是一种适用于多种情况的通用装置，但从经济角度考虑，操作臂的机械设计是由预期执行的任务决定的。设计者不仅要考虑诸如几何尺寸、速度以及承载能力等因素，而且还要考虑到关节的数量和它们的几何分布。这些因素影响了操作臂工作空间的大小和性质、操作臂结构的刚度以及其他性质。

机器人手臂的关节越多，机器人就越灵巧，能力越强。当然，它的制造难度也越大，造价也越高。为了设计一个实用的机器人，可采取两种方式：一种是为特定任务设计**专用机器人**，另一种是设计能够完成各种任务的**通用机器人**。对于专用机器人，仔细考虑一下就能确定需要的关节数目。比如说，一个仅用来在电路板上装配电器元件的专用机器人有四个关节就足够了。三个关节就可以使操作臂到达三维空间中的任何位置，第四个关节可以使被抓取的元件绕着垂直轴旋转。对于通用机器人，有趣的是由我们生活的现实世界的基本特性可知“合适的”最小关节数量是六个。

完整的操作臂设计还包括以下因素：驱动器的选择和配置、传动系统以及内部位置（有时是力）传感器（见图1-12）。上述问题以及其他设计问题将在第8章中讨论。

### 线性位置控制

一些操作臂装有步进电机或其他驱动器来直接产生所需要的轨迹。绝大多数操作臂都是由驱动器来驱动的，这些驱动器提供力或力矩来驱动连杆运动。在这种情况下，就需要一个算法来计算用于产生期望运动的力矩。动力学是设计这种算法的核心问题，但仅依靠动力学本