

[美] 约翰 J. 克雷格 (John J. Craig) 著
斯坦福大学

负超 王伟 译
北京航空航天大学

机器人学导论

(原书第4版)

INTRODUCTION
TO
ROBOTICS

MECHANICS AND CONTROL,
FOURTH EDITION



机器人学译丛

[美] 约翰 J. 克雷格 (John J. Craig) 著
斯坦福大学

负超 王伟 译
北京航空航天大学

机器人学导论

(原书第4版)

INTRODUCTION
TO
ROBOTICS

MECHANICS AND CONTROL,
FOURTH EDITION



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人学导论 (原书第 4 版) / (美) 约翰 J. 克雷格 (John J. Craig) 著; 负超, 王伟译.
—北京: 机械工业出版社, 2018.2

(机器人学译丛)

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

ISBN 978-7-111-59031-6

I. 机… II. ① 约… ② 负… ③ 王… III. 机器人学 IV. TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 014100 号

本书版权登记号: 图字 01-2017-7502

Authorized translation from the English language edition, entitled *Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Fourth Edition*, 978-0-13-348979-8 by John J. Craig, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2018, 2005 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by China Machine Press, Copyright © 2018.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

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

本书系统讲解了机器人学的理论知识, 主要内容包括: 空间位姿的描述和变换、操作臂的正运动学和逆运动学、操作臂的雅可比、操作臂动力学、轨迹规划、操作臂的机构设计、操作臂的线性和非线性控制、操作臂的力控制、机器人编程语言和离线编程。此外, 各章末包括不同难度的习题、编程练习和 MATLAB 练习。

本书可作为高等院校相关专业的教材和参考书, 也可供相关技术人员参考。

出版发行: 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: 朱秀英

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

版次: 2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 19.5

书号: ISBN 978-7-111-59031-6

定价: 79.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

机器人技术是一项机械、电子、自动控制、计算机以及人工智能等多学科交叉的综合性应用技术。

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了。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记里鼓车，三国时期诸葛亮发明的木牛流马。国外公元前 2 世纪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·道罗斯发明了能自动书写和演奏的玩偶，18 世纪日本人发明了端茶玩偶等。机器人这一概念的提出源自约 100 年前的科幻剧本《罗素姆万能机器人》。但是真正按照现代机器人的定义研究、制造和使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而诞生的。1961 年美国 Unimate 公司生产了第一台商用工业机器人。1980 年日本等国家迅速普及工业机器人，国际上称这一年为“机器人元年”。随着机构学、控制理论和计算机技术的发展，传统的机器人已发展到冗余操作臂、移动机器人、人形机器人和多机器人协作等多种形式。随着大数据和深度学习技术的发展，近两年出现的围棋脑和驾驶脑，在特定领域的智能程度已经接近于人类。另一方面，随着机械和电子器件的成本降低，特别是视觉和语音能够实现低成本的高速输入和提取，极大地提高了机器人外设的性能，扩大了机器人的应用场景。

本书是美国斯坦福大学的 John 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，将数学、力学和控制理论等与机器人应用实践密切结合。本书按照刚体力学、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、控制和编程中的原理进行了严谨的阐述，语言精练，内容深入浅出，例题简单易懂且具有代表性，体现出 Craig 教授在机器人学方面高深的造诣。本书是当今机器人学研究领域的经典之作。

本书是在第 3 版中文翻译的基础上核对整理后完成的。参与第 3 版翻译的人员包括负超、高志慧、李成群、陈心颐、宁凤艳和王伟等。第 4 版全书由王伟校对整理，并对第 3 版中的翻译错误和第 4 版英文原书中的错误做了修正，特别是对第 4 版中新增的章节和习题进行了翻译和校对。

首先要感谢国内的同行在使用本书第 3 版作为教材期间发现的问题，以及提出的宝贵意见。特别要感谢南开大学的刘景泰教授将本书第 3 版的错误逐条列出来，发给译者，使得我们有机会将这些错误在第 4 版中逐一消除。

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，书中难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

译者

2017 年 12 月 11 日

科学家常会感到通过自己的研究工作在不断地认识自我。物理学家在他们的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。与仅追求分析的自然科学不同,当前机器人学所追求的是偏重于综合的工程学科。也许正是这个原因,这个领域才使我们当中的许多人着迷。

机器人学研究的是怎样综合运用机械装置、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划分。在更高的层次上,可把机器人学划分为4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。机械操作这一机器人学分学科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1~8章包括机械工程和数学的主题,第9~11章为控制理论的题材,第12~13章属于计算机科学的内容。另外,本书从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”的讲稿。前3版在1986~2016年被许多大学采用。第4版得益于这一广泛应用,并且根据多方面的反馈意见做了修改和改进。在此,向对本书作者提出修正意见的所有人表示感谢。

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,同时学习过线性代数,并且能够使用计算机高级语言编程,将是有帮助的。此外,虽然不必先修控制理论的入门课程,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,虽然本书很多内容选自机械工程领域,但本书的读者不必是机械工程师。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。

虽然本书直观上适合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,本书内容都是重要的背景资料。就像软件开发人员通常要了解一些硬件知识一样,不直接从事机器人的机械和控制研究的人员,也应当具备一些本书提供的背景知识。

与第3版一样,第4版分为13章。本书的材料适合一学期讲授,如果要在半学期内讲授,教师需要略去一些章节。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,多数章只采用一种方法去解决常见的问题。编写本书的主要挑战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影响机器人机械操作的材料。

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]是尚未解决的研究性问题。[⊖]当然,

⊖ 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。

一个人认为困难的问题，另一个人可能认为容易，因此，一些读者会发现那些难度系数在某些情况下会引起误解。不过，我们尽力评估了这些习题的难度。

在每章的末尾，布置了编程作业，学生可以把相应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用来证明大多数一般操作臂的所有原理，而不会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，第1~9章共有12道MATLAB练习。这些练习由俄亥俄大学的Robert L. Williams II教授编写，我对他所做的贡献深表感谢。这些练习可以配合澳大利亚CSIRO首席研究科学家Peter Corke编写的MATLAB机器人工具箱(Robotics Toolbox)[⊖]使用。

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

第2章包括描述三维空间中的位置与姿态的数学知识。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(工件、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问题，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章我们将运动学的研究范围扩展到速度和静力方面。

第6章我们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的机构设计有关的问题。例如，设计多少关节是适宜的，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(通常利用计算机)，使其准确地跟踪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章讨论操作臂的力控制，即研究如何控制由操作臂施加力，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元素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，其中描述人与机器人接口的最新进展。

第4版新增内容

- 每章增加了若干习题
- 8.9节(光学编码器)
- 10.9节(自适应控制)
- 由于技术进步更新了文献材料和参考文献
- 更新或新增了插图
- 改正了100多个录入错误和其他小错误

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秋季ME219班的学生，他们学习了初稿，发现了不少错误，并提出了许多建议。

⊖ 关于MATLAB机器人工具箱，请访问http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html。

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，而且为我完成第 1 版提供了环境。在 SILMA 公司，我得到了很好的仿真环境和资源，这些条件帮助我完成了第 2 版。Jeff Kerr 博士写了第 8 章的初稿，Robert L. Williams II 教授设计了每章最后的 MATLAB 练习。Peter Corke 扩充了他的机器人工具箱，以支持本书采用的 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。

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过帮助。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 Jackcon、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。

我还要感谢 Pearson 公司的 Tom Robbins 为前两版提供了指导。

斯坦福大学的 Roth 教授在给 2002 级的学生讲授机器人课程时使用了本书第 2 版，并指出了许多遗留的错误，这些错误在第 4 版中做了修订。

最后，我还要感谢那些帮助我完成第 4 版的人：Matt Marshall(为每章新增习题并收集有用的反馈)，Pearson 公司的 Julie Bai 和 Michelle Bayman。

译者序

前言

第 1 章 概述 1

- 1.1 背景 1
- 1.2 操作臂的力学与控制 3
- 1.3 符号 10
- 参考文献 10
- 习题 11
- 编程练习 12
- MATLAB 练习 12

第 2 章 空间描述和变换 13

- 2.1 引言 13
- 2.2 描述: 位置、姿态与位姿 13
- 2.3 映射: 从一个坐标系到另一坐标系的变换 15
- 2.4 算子: 平移、旋转和变换 20
- 2.5 总结和说明 23
- 2.6 变换的计算 23
- 2.7 变换方程 25
- 2.8 其他姿态描述 27
- 2.9 自由矢量的变换 35
- 2.10 计算问题 36
- 参考文献 37
- 习题 38
- 编程练习 42
- MATLAB 练习 43

第 3 章 操作臂运动学 44

- 3.1 引言 44
- 3.2 连杆的描述 44
- 3.3 连杆连接的描述 46
- 3.4 连杆坐标系的定义 47
- 3.5 操作臂运动学 52

- 3.6 驱动器空间、关节空间和笛卡儿空间 54
- 3.7 实例: 两种工业机器人的运动学问题 54
- 3.8 坐标系的标准命名 61
- 3.9 工具的位置 63
- 3.10 计算问题 63
- 参考文献 64
- 习题 64
- 编程练习 69
- MATLAB 练习 70

第 4 章 操作臂逆运动学 71

- 4.1 引言 71
- 4.2 解的存在性 71
- 4.3 当 $n < 6$ 时操作臂子空间的描述 74
- 4.4 代数解法和几何解法 75
- 4.5 简化成多项式的代数解法 78
- 4.6 三轴相交的 Pieper 解法 79
- 4.7 操作臂逆运动学实例 81
- 4.8 标准坐标系 87
- 4.9 操作臂求解 88
- 4.10 重复精度和精度 88
- 4.11 计算问题 89
- 参考文献 89
- 习题 90
- 编程练习 93
- MATLAB 练习 94

第 5 章 雅可比: 速度和静力 95

- 5.1 引言 95
- 5.2 时变位置和姿态的符号表示 95
- 5.3 刚体的线速度和角速度 97
- 5.4 对角速度的进一步研究 98
- 5.5 机器人连杆的运动 101

5.6	连杆之间的速度“传递”	101	7.7	使用机器人编程语言描述 路径	160
5.7	雅可比	105	7.8	使用动力学模型的路径 规划	160
5.8	奇异性	106	7.9	无碰撞路径规划	160
5.9	操作臂的静力	108	参考文献	161	
5.10	力域中的雅可比	110	习题	162	
5.11	速度和静力的笛卡儿变换	111	编程练习	163	
参考文献	112		MATLAB 练习	164	
习题	112				
编程练习	115				
MATLAB 练习	115				
第 6 章 操作臂动力学	117		第 8 章 操作臂的机构设计	165	
6.1	引言	117	8.1	引言	165
6.2	刚体的加速度	117	8.2	基于任务需求的设计	165
6.3	质量分布	118	8.3	运动学构型	167
6.4	牛顿方程和欧拉方程	121	8.4	工作空间属性的定量方法	172
6.5	牛顿-欧拉递推动力学方程	122	8.5	冗余结构与闭链结构	174
6.6	迭代形式与封闭形式	125	8.6	驱动方案	175
6.7	封闭形式的动力学方程应用 举例	125	8.7	刚度与变形	177
6.8	操作臂动力学方程的结构	128	8.8	位置检测	180
6.9	操作臂动力学的拉格朗日 方程	129	8.9	光学编码器	181
6.10	笛卡儿空间中的操作臂 动力学	132	8.10	力传感	183
6.11	考虑非刚体影响	134	参考文献	185	
6.12	动力学仿真	134	习题	186	
6.13	计算问题	135	编程练习	190	
参考文献	137		MATLAB 练习	190	
习题	138				
编程练习	141		第 9 章 操作臂的线性控制	192	
MATLAB 练习	142		9.1	引言	192
第 7 章 轨迹生成	144		9.2	反馈与闭环控制	192
7.1	引言	144	9.3	二阶线性系统	193
7.2	关于路径描述和路径生成的 综述	144	9.4	二阶系统的控制	198
7.3	关节空间的规划方法	145	9.5	控制规律的分解	199
7.4	笛卡儿空间规划方法	155	9.6	轨迹跟踪控制	200
7.5	笛卡儿路径的几何问题	157	9.7	抑制干扰	201
7.6	路径的实时生成	158	9.8	连续控制与离散时间控制	202
			9.9	单关节的建模和控制	203
			9.10	工业机器人控制器的结构	207
			参考文献	208	
			习题	208	
			编程练习	210	
			MATLAB 练习	210	

第 10 章 操作臂的非线性控制	212	第 12 章 机器人编程语言及编程	
10.1 引言	212	系统	253
10.2 非线性系统和时变系统	212	12.1 引言	253
10.3 多输入多输出控制系统	214	12.2 可编程机器人的三个发展	
10.4 操作臂的控制问题	215	水平	253
10.5 实际问题	216	12.3 应用实例	255
10.6 当前工业机器人控制系统	219	12.4 机器人编程语言的必要条件 ..	256
10.7 李雅普诺夫稳定性分析	221	12.5 机器人编程语言的特殊问题 ..	259
10.8 基于笛卡儿坐标的控制系统 ..	223	参考文献	261
10.9 自适应控制	227	习题	261
参考文献	232	编程练习	262
习题	234	第 13 章 离线编程系统	263
编程练习	236	13.1 引言	263
第 11 章 操作臂的力控制	237	13.2 离线编程系统的要点	264
11.1 引言	237	13.3 PILOT 仿真器	268
11.2 工业机器人在装配作业中的		13.4 离线编程系统的自动子	
应用	237	任务	274
11.3 部分约束任务中的控制		参考文献	275
坐标系	237	习题	276
11.4 力/位混合控制问题	241	编程练习	276
11.5 质量-弹簧系统的力控制	242	附录 A 三角恒等式	277
11.6 力/位混合控制方法	244	附录 B 24 种转角排列设定法	278
11.7 当前工业机器人控制方法	247	附录 C 逆运动学公式	280
参考文献	249	部分习题答案	281
习题	249	索引	287
编程练习	251		

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 年代被定义为一种独特的设备^[1]，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发展^[2]。

在北美，20 世纪 80 年代初期工业机器人的应用很多，到 80 年代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，但仍然不断增长(如图 1-1 所示)。

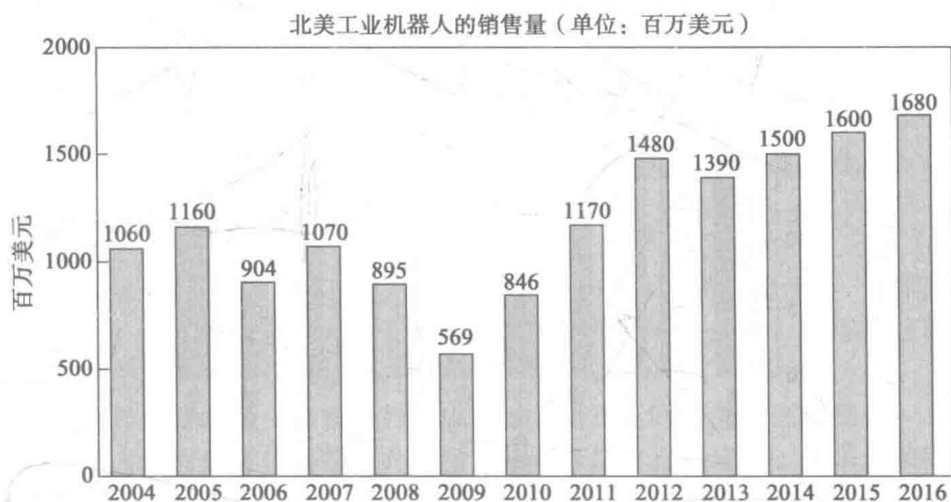


图 1-1 北美工业机器人的销售量(单位: 百万美元)。来源: 机器人工业协会

图 1-2 反映了全世界机器人的年安装使用量。工业机器人使用量增加的主要原因是机器人成本的下降和机器人性能的提升。据估算，到 2025 年，制造业雇主会通过机器人替代手工的方式将劳工数量减少 16%。如图 1-3 所示，在一些国家或地区使用机器人更受欢迎。由于机器人作业效率越来越高，而人工成本越来越高，因此越来越多的工业岗位可能会被机器人自动化取代。这是驱动工业机器人市场增长的最重要的因素。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的或是工人不可能完成的工作。

本书聚焦工业机器人或者叫作机械臂的最重要的内容，即力学和控制。事实上，有时候人们在争论工业机器人的内涵。如图 1-4 所示的设备一般都称为工业机器人，而数控铣床则不属于工业机器人。两者的区别在于可编程的复杂性不同。如果某个机械设备可以编程去完成多种不同的应用任务，一般情况下是工业机器人。机器一般限定为完成某一类任

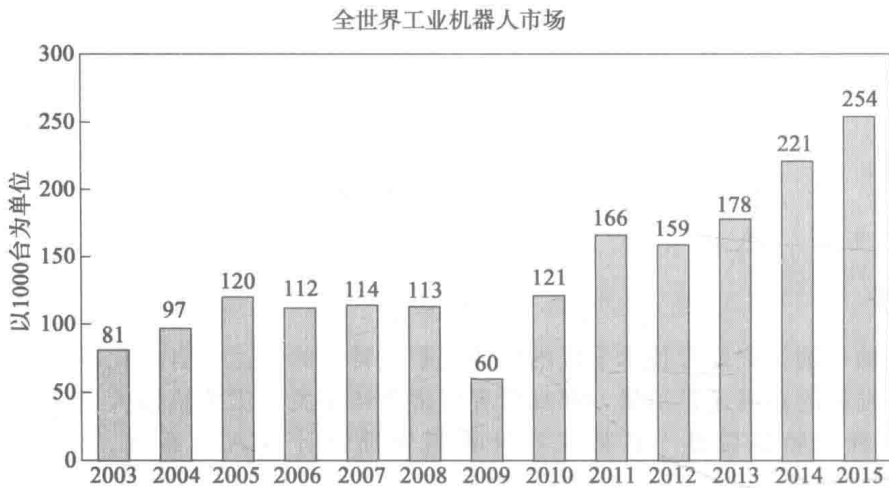


图 1-2 工业机器人的年安装量。来源：世界机器人 2016

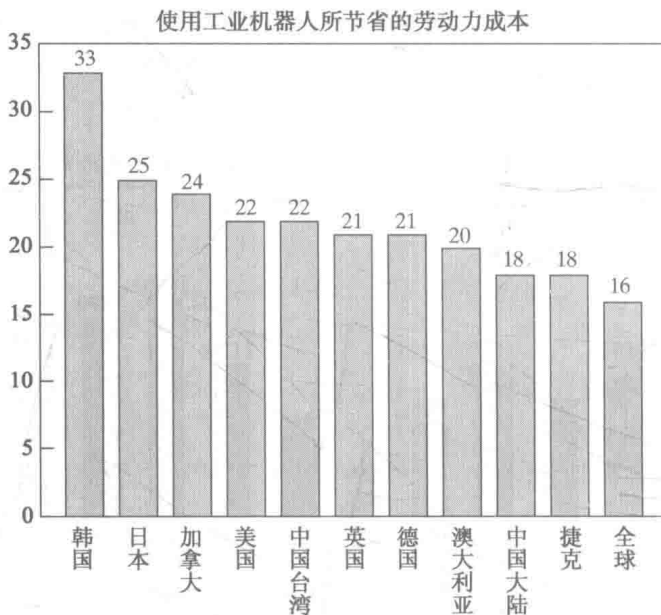


图 1-3 预计 2025 年使用工业机器人所节省的劳动力成本(百分比)。来源：波士顿咨询公司

务，称之为**刚性自动化**。本书的目的不是争论两者的区别。书中的主要基本原理均可应用于各种可编程机械。

总体上说，有关操作臂的力学和控制的研究不是一门新科学，但是也不完全是将经典领域的主题拼凑在一起。机械工程师研究机器的静态和动态特性。数学家为描述空间运动和操作臂的其他属性设计数学工具。控制理论提供设计和评估算法，用来实现期望的运动或力的应用。在工业机器人的传感器和接口设计方面需要电气技术，而计算机科学提供了执行期望任务所需的编程平台。

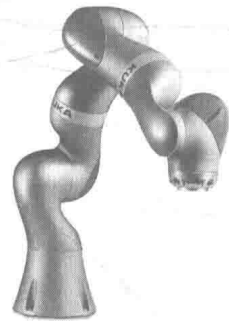


图 1-4 新型七自由度机器人。图片由 KUKA 机器人公司提供

1.2 操作臂的力学与控制

下面介绍一些术语并对书中将要涉及的一些主题进行概述。

位置和姿态的描述

在机器人学的研究中，我们通常要考虑在三维空间中物体的位置。这里所说的物体包括操作臂的杆件、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置和姿态，我们一般先在物体上设置一个坐标系(或位姿)。然后在某个参考坐标系中描述该位姿的位置和姿态，如图 1-5 所示。

任一姿态我们都能用作研究物体位置和姿态的参考坐标系，因此我们经常将物体空间属性的描述从一个位姿变换到另外一个位姿。在第 2 章中，我们将研究同一物体在不同坐标系中空间位置和姿态的描述方法和数学计算方法。

刚体位置和姿态的研究对于机器人以外的其他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，相邻连杆间由关节连接起来，允许相对转动。这些关节通常装有位置传感器，允许测量相邻杆件的相对位置。如果是转动关节，位移被称为关节角。一些操作臂包括滑动关节(或移动关节)，那么两个相邻连杆的相对位移是直线运动，有时将这个位移称为关节偏移量。

操作臂自由度的个数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。自由度是机构学中普遍使用的术语。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唯一一个变量来定义，因此关节数目等于自由度数目。

组成操作臂的运动链的自由端称为末端执行器。根据机器人的不同应用场合，末端执行器可以是夹具、焊枪、电磁铁或是其他装置。我们通常采用设置于末端执行器上的工具坐标系(相对于设置于操作臂固定底座的基坐标系)来描述操作臂的位置(如图 1-6 所示)。

机械操作研究的基本问题是操作臂正运动学。正运动学是一个计算操作臂末端执行器位置和姿态的静态几何问题。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。有时候，我们将这个过程称为从关节空间描述到笛

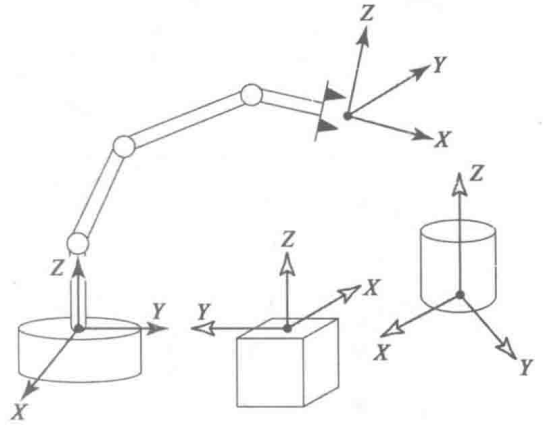


图 1-5 将坐标系(或位姿)设置在操作臂和环境中的物体上

笛卡儿空间描述的操作臂位置表示[⊖]。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。

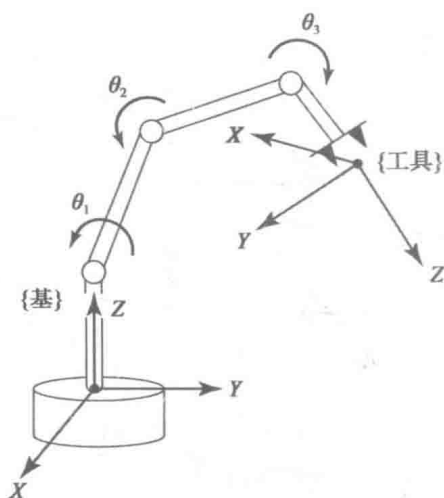


图 1-6 正运动学方程是各个关节变量的函数，描述了工具坐标系相对于基坐标系的位置和姿态

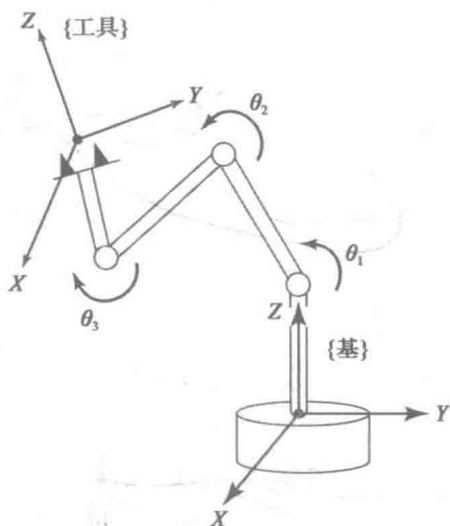


图 1-7 给定工具坐标系的位置和姿态，通过逆运动学可以计算出各关节变量

这是一个相当复杂的几何问题，然而人类和其他生物系统每天都要进行数千次这样的解答。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因素。

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(有时要由人工实现)到期望位置，同时记录一系列关节变量(例如关节空间的位置)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么容易。因为运动学方程是非线性的，难以找到封闭解，有时甚至无解。同时我们还会遇到是否有解和多解问题。

如此复杂的问题，人脑和神经系统可以在无意识的情况下完成，引导手臂和手移动以及操作物体，这让我们不得不由衷地佩服。

运动学方程解的有无定义了操作臂的工作空间。无解表示操作臂不能达到这个期望位置和姿态，因为目标点位于操作臂的工作空间之外。

⊖ 在笛卡儿空间中，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，奇异点

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。在奇异点，映射是不可逆的。对操作臂的设计者和用户来说，理解奇异现象是十分重要的。

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，后座舱的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。

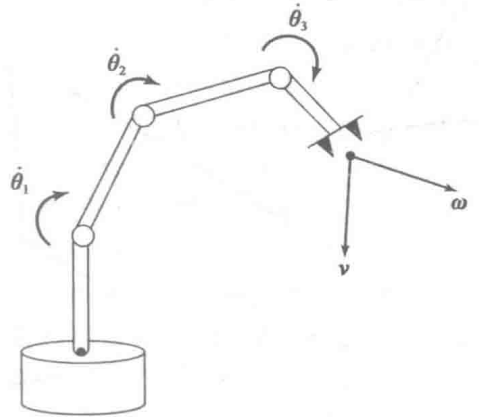


图 1-8 关节速度和末端执行器速度的几何关系可以由雅可比矩阵表示

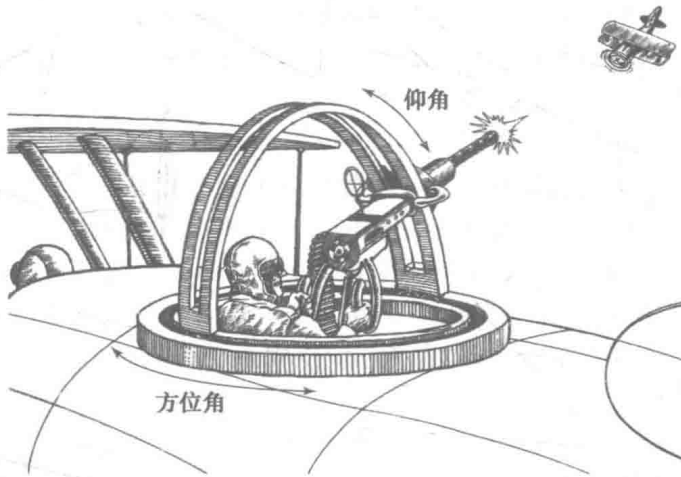


图 1-9 第一次世界大战中载有一名飞行员和一名后座舱机枪手的老式双翼飞机。这种后座舱机枪的机构受奇异点的影响

一架敌机出现在方位角 1 点钟和仰角 25° 的地方！机枪手瞄准敌机并向其开火，与此同时，机枪手改变枪的方位跟踪敌机，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 1 点钟和仰角 70° 的地方！机枪手瞄准敌机并开始向其开火。敌机迅速躲避，飞到相对于机枪手飞机仰角越来越大的位置上。很快，敌机就要飞过机枪手飞机的头顶。敌机为何这样做？因为这样机枪手就不能够准确瞄准敌机了！机枪手发现，当敌机飞过头顶时，他需要快速地改变机枪的方位角。但是他不能以如此快速的动作改变方位角，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

了跟踪穿过飞机头顶的目标，枪手需要使枪以非常快的速度绕着方位轴转动。目标越接近于飞机头顶位置，枪手就需要越快的速度使枪绕方位轴转动来跟踪目标。如果目标直接飞过枪手头顶，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？然而结果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，例如机枪竖直向上的情况，机枪的方向与方位转轴共线。也就是说，当处于这点时，方位转动改变不了机枪的方向。我们知道需要两个自由度来确定枪的方位，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点造成的。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，这些奇异点并不影响机器人手臂在其工作空间内的定位，然而，机器人手臂在这些奇异点附近运动就会引起一些问题。

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，问题就产生了：怎样设定关节力矩来产生要求的接触力和力矩？为了解决这个问题，操作臂的雅可比矩阵自然又被提出来。

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运动，最后减速停止，关节驱动器必须产生一组复杂的扭矩函数来实现⁹。关节驱动器产生的扭矩函数的形式取决于末端执行器路径的空间形式和瞬时特性、连杆的质量特性和负载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扭矩函数。

大多数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可以计算加速度，加速度是驱动力矩的函数，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（如图 1-10 所示）。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显得越来越重要。

在第 6 章中，我们会推导动力学方程，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运动并同时停止，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（如图 1-11 所示）。

⁹ 我们用关节驱动器作为操作臂驱动装置的一般术语，它可以是电机、气缸、液压缸和肌肉。

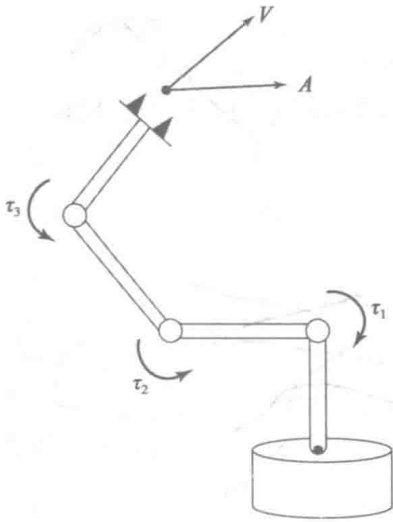


图 1-10 动力学方程中驱动器驱动力矩和操作臂运动之间关系的图示

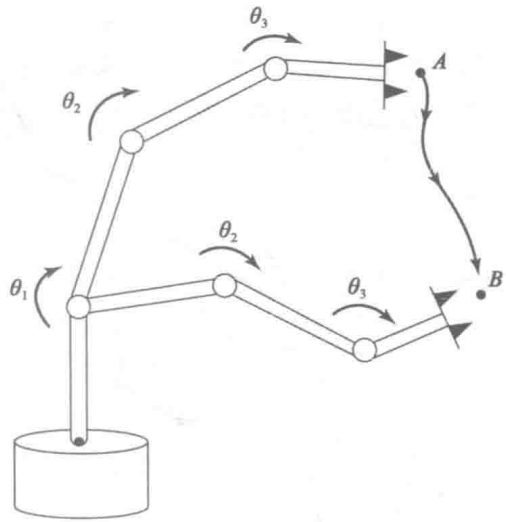


图 1-11 为了使末端执行器在空间中从 A 点运动到 B 点, 必须为各个关节计算一个连续运动轨迹

通常, 一条路径的描述不仅需要确定期望目标点, 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点到达目标点。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), 必须将末端执行器的期望运动转化为一组等效的关节运动。这种笛卡儿轨迹生成将在第 7 章中讨论。

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许多情况的通用装置, 但从经济角度考虑, 操作臂的机械设计是由期望执行的任务决定的。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, 而且还要考虑关节的数量和它们的几何布局。这些因素影响了操作臂的工作空间的大小和性质、操作臂结构的刚度以及其他属性。

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。为了设计出一个有用的机器人, 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, 通过认真考虑就能确定需要设计的关节的数目。例如, 一个仅用来在电路板上装配电器元件的专用机器人有 4 个关节就足够了。3 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, 准确的最小关节数量是 6 个。

完整的操作臂设计还包括以下因素: 驱动器的选择和位置、传动系统以及内部位置传感器(有时是力传感器)(如图 1-12 所示)。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期望的轨迹。然而, 绝大多数的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, 但动力学并不仅是为了问题的求解。设计位置控制系统首先要考虑的是自动补偿由于