

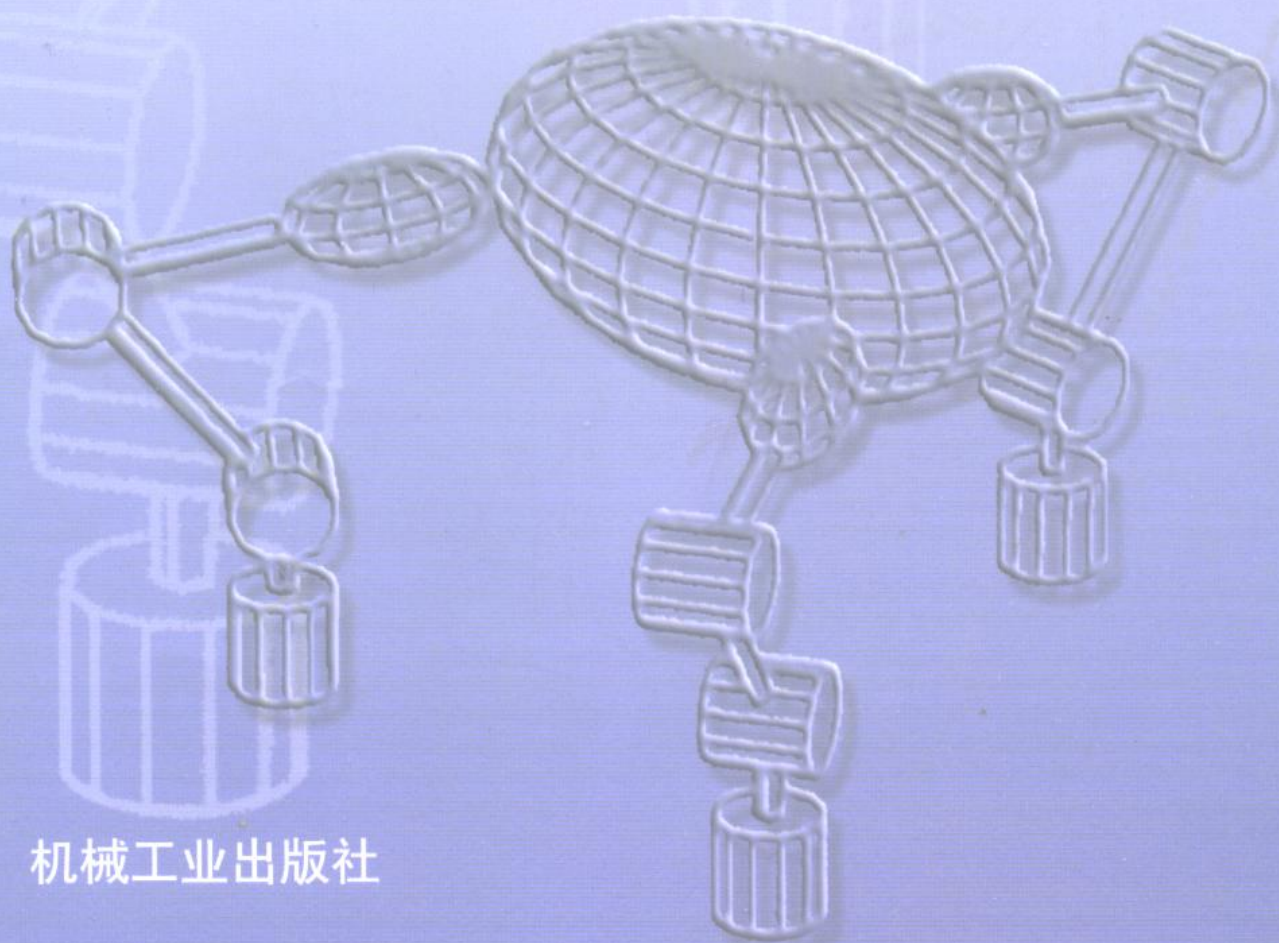
机器人操作的 数学导论

(美) 理查德·摩雷

(中) 李泽湘

著

(美) 夏恩卡·萨思特里



机械工业出版社



机器人操作的数学导论

(美) 理查德·摩雷
(中) 李泽湘 著
(美) 夏恩卡·萨思特里

徐卫良 钱瑞明 译



机械工业出版社

著作权合同登记号图字：01-97-1070

DW 20/01
本书在综合大量的技术文献资料基础上，结合作者从事的研究工作，从数学角度系统地论述了机器人操作的运动学、动力学、控制及运动规划。本书内容反映了近年来机器人领域的主要研究成果。

本书共九章，包括绪论、刚体运动、机器人运动学、机器人动力学及控制、多指手运动学、机器人手的动力学及控制、机器人系统的非完整约束、非完整运动规划和机器人操作的研究展望。第二章至第八章含有丰富的实例，并附有小结和大量的习题。

本书可作为有关专业研究生的教材，也可供从事机器人、自动控制等领域工作的科研和工程技术人员参考。

A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation/Richard M. Murray, Zexiang Li, S. Shankar Sastry

Original English language edition published 1994, by CRC Press, Inc., 2000 Corporate Blvd., N. W., Boca Ration, Florida 33431, USA. All rights reserved.

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人操作的数学导论 / (美) 理查德·摩雷, (中) 李泽湘, (美) 夏恩卡·萨思特里著; 徐卫良, 钱瑞明译. —北京: 机械工业出版社, 1997

高等学校适用

ISBN 7-111-06058-X

I. 机… II. ①摩… ②李… ③萨… III. 机器人-操作-数学理论
IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 28347 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张一萍 版式设计: 霍永明 责任校对: 韩晶

封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·19.25 印张·462 千字

0 001—1 300 册

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

译者序

原著《机器人操作的数学导论》（《A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation》），由美国 CRC 出版社于 1994 年出版，是关于机器人操作理论的一本专著。该书从数学的角度、系统完整地论述了机器人操作的基本理论，使机器人学者可以从更高层次了解机器人操作原理和开拓机器人学研究的新领域。该书还特别介绍了著作者在多指机器人手与多机器人协调操作理论、非完整系统的运动规划与控制等方面的最新研究成果。该书出版后即被美国、日本及我国香港地区的许多大学用作博士和硕士研究生学习机器人理论的教材。

机器人学是一门新兴的、正在不断发展的技术科学，许多国家都将其作为高技术大力开展研究与应用。我国同样也不例外。机器人学与机器人技术的研究和应用已有 20 多年的历史，目前已达到了一个崭新的水平。高等学校也设置了机器人方面的课程，并针对不同专业的本科生和研究生培养需要编写出版了一些教材。译者经过多年的研究生教学与培养的实践，感到国内近期虽出版过一些有关机器人的专著。为此，我们翻译了《机器人操作的数学导论》这本书。

本书汇集了当今最新的有关机器人学研究的文献资料及著者从事这方面研究工作的成果，从数学角度系统地介绍了机器人操作的运动学、动力学、控制及运动规划，内容丰富，层次分明，系统性强，多数章节含有丰富的实例，并附有小结和大量的习题。第一章回顾了机器人技术的发展过程。第二章利用指数映射、旋量、运动螺旋、力螺旋等数学工具，从几何角度阐述了刚体的运动表示。第三章采用指数积公式论述了单机器人的操作运动学，包括运动学正逆解、雅可比矩阵等。第四章推导了单机器人的动力学及控制方程，并利用李亚普诺夫（Lyapunov）理论证明了有关控制规则的稳定性。第五章介绍了多指手的抓取运动学和抓取规划，讨论了稳定抓取的特性。第六章推导了多指机器人手和冗余度机器人系统的动力学与控制方程，给出了计算力矩控制规则和 PD 控制规则，并讨论了腱驱动机器人手的动力学问题。第七章讨论了机器人系统的非完整特性，列举了大量的非完整系统实例。第八章介绍了非完整运动规划的几种方法，研究了非完整系统轨迹规划问题。第九章论述了机器人学方面的一些新的研究和应用领域。本书内容反映了近年来机器人领域的主要研究成果。

本书在翻译过程中，得到中国工程院院士、北京航空航天大学张启先教授，国家自然科学基金会雷源忠教授和东南大学郑文纬教授的热情帮助，在此表示衷心的感谢。原著者之一，香港科技大学的李泽湘教授对本书译稿与清样作了校阅，提出了许多宝贵意见，对此深表谢意。

由于译者水平所限，译文中错误及不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者

1997 年 10 月于东南大学

前 言

在最近 20 年中，机器人技术有了巨大的发展。机器人学研究吸引了众多学者的兴趣，而且引起了公众极大的关注。随着机器人技术的逐步成熟，机器人从能完成一些简单的抓取、放置、喷漆和焊接操作，发展到能实现在印刷电路板上装插集成电路芯片和在汽车工业中装卸与传送零件这样复杂的操作。机器人的应用情况已成为衡量某些工厂自动化程度的标准，而且如本书所述，机器人在危险环境、微型外科手术和微型机电装置等领域的应用正成为机器人学研究的新领域。

随着近 20 年来机器人技术的发展，高等学校中有关机器人学课程的内容也相应得到了很大的发展。这些机器人学课程主要是面向计算机科学、机电工程和数学等专业的本科生或研究生，针对不同的授课对象在教学内容方面有所侧重。目前，已出版了很多这方面的优秀教材，内容包括机器人操作器的运动学、动力学、控制、传感和规划等。

不同专业背景的学生要全面了解机器人学方面的知识，需要一本详细介绍有关机器人操作器运动学、动力学和控制内容的教材。本书不仅介绍简单机器人的基本知识，而且讨论多指机器人手和多机器人的协调操作。本书是在给下列人员组成的混合班讲课时所用讲义的基础上编写而成，这些听课人员包括：不了解机构的电气工程师，不了解控制理论的计算机科学工作者，不了解开式运动链运动学和动力学的机械工程师以及那些有兴趣但没有时间去全面学习机器人学内容的数学工作者。

如果读者的数学基础知识比较扎实，将会有助于更好地理解本书内容。本书内容的选择由浅入深，包括简单机器人的运动学和动力学、多指机器人手对物体的抓取和操作以及非完整运动规划，既介绍了机器人学的基本概念，又反映了机器人学的最新研究成果。从 1990 年到 1993 年，本书内容曾在下列学校讲授过多次：加利福尼亚大学伯克利分校（University of California, Berkeley），纽约大学库兰特数学研究所（Courant Institute of Mathematical Sciences of New York University），加利福尼亚工学院（California Institute of Technology），香港科技大学（Hong Kong University of Science and Technology）。本书部分内容也曾作为下列学校的短期培训教材：罗马大学，印度孟加拉人工智能与机器人中心，台湾大学。

本书可作为高等学校本科高年级学生或一、二年级研究生使用的机器人学方面的高级课程教材。在给本科高年级学生讲课时，我们用 12 周的时间，讲授了第一章~第四章的内容，再加一些技术与规划方面的讨论课和一个实验。实验内容包括工业机器人的在线轨迹规划与控制、机器人离线编程仿真环境的使用。教学侧重于运动学内容，我们常跳过第四章机器人动力学方面的内容，而讲授第五章的多指手运动学。对于研究生，我们也用 10 周时间讲授第五章~第八章的内容，同时增加介绍一些操作或移动机器人方面的最新课题。

我们认为，对于本科生和对信号与系统有所了解的学生来说，在学习本教材之前，应先修线性代数方面的课程。如果学习过控制理论，那将是很帮助的，但并不是十分必要。对于能掌握第二章内容的学生来说，学习本书其它章节的内容是没有困难的，但数学基础还是非常重要的。

从第二章到第八章，我们都提供了大量的习题，以帮助学生理解所学的新知识和掌握每章内容。本书有意不采用数值计算型习题，但在教学过程中，我们却采用了数值计算型习题，具体原始数据来源于实验室的机器人或其他实时系统。教学内容应不断更新。

本书没有涉及有关机器人的运动规划和运动避障的内容，所以在课堂教学时，为使内容系统、完整，我们总是补充一些机器人运动规划方面的教学内容。对于研究生课，推荐一本由 Latombe 编写的关于运动规划方面的新书，可作为本书的教学参考书。本书未加讨论的另一个问题是机器人的传感技术。为了合理处理这些内容，有关学校是将计算机视觉、接触传感和其他有关内容，如信号处理，单独设课。

本书内容的选择基于以下思路：面对机器人方面大量新技术发明和新进展，这些内容在今后的几年内仍然是重要的，第九章简单地介绍了机器人学未来的发展方向。在阅读完本书后，希望读者与我们一起能促进机器人领域的技术和社会前景以及基本理论的发展。

1993年8月于伯克利

理查德·摩雷

李泽湘

夏恩卡·萨思特里

致 谢

本书有关内容的研究, 得到很多同仁大力的支持, 在此表示衷心的感谢。本书第二章和第三章的大量内容参考了 Bradley Paden (University of California, Santa Barbara) 的博士论文; 参与第五章和第六章多指机器人手研究工作的有: Ping Hsu (San Jose State University); Arlene Cole (AT&T Bell Laboratories); John Hauser (University of Colorado, Boulder); Curtis Deno (Intermedics, Inc. in Houston); Kristofer Pister (University of California, Los Angeles)。对于非完整运动规划方面的内容, 曾得到下列同仁的合作: Jean - Paul Laumond (LAAS in Toulouse, France); Paul Jacobs (Qualcomm, Inc. in San Diego); Greg Walsh, Dawn Tilbury, Linda Bushnell (University of California, Berkeley); Richard Montgomery (University of California, Santa Cruz); Leonid Gurvits (Siemens Research, Princeton); Chris Fernandez (New York University)。

本书第二章和第三章建立机器人运动学关系的核心方法是采用由 Roger Brockett (Harvard University) 建立的指数积公式。对于 Roger Brockett 和他的学生在运动学、滚动接触和非完整控制方面给予的热情帮助和鼓励, 表示衷心的感谢。Roger Brockett 所建立的有关非线性控制理论贯穿于本书的整个内容。

我们永远记住于 1983 年在伯克利举行的研讨班, P.S.Krishnaprasad (University Maryland) 使我们坚信了指数积公式的优点, 并给我们提出了许多有价值的建议; Jerry Marsden (Berkeley) 和 Tony Bloch (Ohio State University) 在经典力学、现代数学和控制理论方面提供了很大的帮助。于 1987 年在伯克利举办的另一次研讨班上, Yoshi Nakamura (University of Tokyo) 激励了我们对多指机器人手和多机器人协调操作的研究。在运动学、最优控制和冗余度机构方面, 通过与下列学者的交流得到了许多有益的启发: John Baillieul (Boston University); Jeff Kerr (Zebra Robotics); Mark Cutkosky (Stanford University); Robert Howe (Harvard University); Dan Koditschek (University of Michigan); Mark Spong (University of Illinois at Urbana-Champaign); Joel Burdick 和 Elon Rimon (California Institute of Technology)。Hector Sussmann (Rutgers University) 和 Gerardo Lafferiere (Portland State University) 在非完整运动规划方面也给予了非常有益的帮助, 在此一并表示感谢。

本书的完成得到了同事们的支持与帮助, 他们是伯克利分校 (Berkeley) 的 John Canny, Charles Desoer, David Dornfeld, Ronald Fearing, Roberto Horowitz, Jitendra Malik 和 “Tomi” Tomizuka; 纽约大学的 Jaiwei Hong, Bud Mishra, Jack Schwartz, James Demmel 和 Paul Wright; Catech 的 Joel Burdick 和 Pietro Perona; 香港科技大学的 Peter Cheung, Ruey-Wen Lin, Matthew Yuen; 西澳大利亚大学的 Robyn Owens; Georges Giralte (LAAS in Toulouse, France); Dorothee Normand Cyrot (LSS in Paris, France); Alberto Isidori, Marica Di Denedetto, Alessandro De Luca 和 Nando Nicolo (Universita di Roma); Sanjoy Mitter 和 Anita Flynn (MIT); Antonio Bicchi (Universita di Pisa); M. Vidyasagar (the Center for Artificial Intelligence and Robotics in Bangalore, India); 傅立成 (台湾大学); T. J. Tarn (Washington Uni-

versity)。本书图片由 Mark Spong, Kevin Dowling 和 Dalila Argez 提供, 在此也表示感谢。

我们的研究工作得到了国家自然科学基金的大力资助 (资助编号: DWC84-51129, IRI90-14490, IRI90-03986), 同时还得到国防研究基金 (DAAL88-K-0372), IBM, AT&T 基金, GE 基金, HKUST 基金 (DAG 92/93 EG23) 的资助。我们的母校加利福尼亚大学伯克利分校、加州理工学院和香港科技大学为我们的研究提供了实验设备, 在此对各校给予的帮助深表感谢。我们还要特别感谢伯克利分校工程系系主任 Karl Pister 给予的支持。

本书初稿曾在多所学校讲授过, 教学中用过本书初稿的除我们三人之外还有: James Clark (Harvard); John Canny, Curtis Deno 和 Matthew berkemeier (Berkeley); Joel Burdick (Caltech)。他们的反馈意见对我们修改书稿是非常有价值的。本书承蒙下列专家仔细审阅: Greg Chirikjian (Johns Hopkins), Michael McCarthy 和 Frank Park (University of California, Irvine)。

此外, 在本书的编写过程中还得到了许多学生的帮助, 他们是: L. Bushnell, N. Getz, J. P. Tennant, D. Tibury, G. Walsh, J. Wndlandt (Berkley); R. Behnken, S. Kelly, A. Lewis, S. Sur 和 M. van Nieuwstadt (Caltech); A. Lee 和 J. Au (香港科技大学)。Sudipto Sur (Caltech) 帮助开发了旋量计算的数学软件包。我们要感谢给予本书的编写以启发的所有人。

最后, 对于家人给予我们的支持和鼓励表示衷心的感谢。

目 录

译者序	
前言	
致谢	
第一章 绪论	1
1 历史回顾	1
2 多指手和灵巧操作	4
3 本书概述	7
3.1 单机机器人操作	8
3.2 多指机器人手的协调操作	8
3.3 机器人系统的非完整约束	9
4 文献说明	10
第二章 刚体运动	11
1 刚体变换	11
2 三维空间中的旋转运动	13
2.1 旋转矩阵的性质	13
2.2 旋转的指数坐标	16
2.3 其他表示法	18
3 三维空间中的刚体运动	21
3.1 齐次坐标表示法	22
3.2 刚体运动的指数坐标和运动旋量	24
3.3 旋量：运动旋量的几何表示	28
4 刚体速度	31
4.1 转动速度	31
4.2 刚体速度	33
4.3 旋量运动的速度	36
4.4 坐标变换	36
5 力旋量和对偶旋量	38
5.1 力旋量	38
5.2 力旋量的旋量坐标	40
5.3 对偶旋量	42
6 小结	44
7 文献说明	46
8 习题	46
第三章 机器人运动学	51
1 概述	51
2 运动学正解	52
2.1 问题的描述	52
2.2 指数积公式	53
2.3 机器人的运动旋量参数表示	58
2.4 机器人的工作空间	61
3 运动学逆解	63
3.1 一个平面例子	63
3.2 Paden-Kahan 子问题	64
3.3 利用子问题求解运动学逆问题	67
3.4 运动学逆解问题的一般解法	70
4 机器人的雅可比矩阵	76
4.1 末端执行器的速度	76
4.2 末端执行器的作用力	80
4.3 奇异性	82
4.4 可操作性	84
5 冗余度机器人和并联机器人	85
5.1 冗余度机器人	85
5.2 并联机器人	87
5.3 四连杆机构	89
5.4 Stewart 平台	92
6 小结	95
7 文献说明	96
8 习题	96
第四章 机器人动力学及控制	102
1 概述	102
2 拉格朗日方程	103
2.1 基本公式	103
2.2 刚体的惯性	105
2.3 实例：两杆平面机器人的动力学	107
2.4 刚体的牛顿-欧拉方程	108
3 开链机器人动力学	110
3.1 开链机器人的拉格朗日函数	110
3.2 开链机器人的运动方程	111
3.3 机器人动力学和指数积公式	115
4 李亚普诺夫 (Lyapunov) 稳定性理论	118
4.1 基本定义	118
4.2 李亚普诺夫直接法	120
4.3 李亚普诺夫间接法	121
4.4 实例	122

4.5 李亚普诺夫不变原理·····	124	2.2 内力·····	185
5 位置控制与轨迹跟踪·····	125	2.3 其他机器人系统·····	186
5.1 问题描述·····	125	3 冗余度机器人系统和不可操作	
5.2 计算力矩·····	126	机器人系统·····	189
5.3 PD 控制·····	127	3.1 冗余度机器人的动力学·····	189
5.4 工作空间控制·····	129	3.2 不可操作抓取·····	192
6 有约束机器人的控制·····	132	3.3 实例:两个 SCARA 手指的抓取·····	193
6.1 约束系统的动力学·····	132	4 腱驱动的运动学和静力学·····	194
6.2 有约束机器人的控制·····	133	4.1 无弹性腱·····	194
6.3 实例:沿滑槽运动的平面机器人·····	134	4.2 弹性腱·····	196
7 小结·····	135	4.3 腱驱动手指的分析与控制·····	198
8 文献说明·····	136	5 机器人手的控制·····	199
9 习题·····	137	5.1 扩展的控制规则·····	199
第五章 多指手运动学 ·····	139	5.2 多级控制结构·····	200
1 抓取概述·····	139	6 小结·····	205
2 抓取静力学·····	140	7 文献说明·····	206
2.1 接触模型·····	140	8 习题·····	207
2.2 抓取映射·····	144	第七章 机器人系统的非完整约束 ·····	209
3 力封闭·····	146	1 概述·····	209
3.1 有关定义·····	146	2 可控性和 Frobenius 定理·····	211
3.2 构给力封闭的条件·····	147	2.1 向量场和向量流·····	212
4 抓取规划·····	151	2.2 李氏括号和 Frobenius 定理·····	212
4.1 所需接触数目的范围·····	151	2.3 非线性可控性·····	216
4.2 构给力封闭抓取·····	152	3 非完整系统实例·····	219
5 抓取约束·····	154	4 非完整系统的结构·····	223
5.1 手指运动学·····	154	4.1 非完整分布的分类·····	224
5.2 多指抓取的性质·····	156	4.2 非完整系统实例(续)·····	225
5.3 实例:两个 SCARA 手指抓取盒子·····	158	4.3 Philip Hall 基·····	227
6 滚动接触运动学·····	161	5 小结·····	228
6.1 曲面模型·····	161	6 文献说明·····	229
6.2 接触运动学·····	165	7 习题·····	229
6.3 滚动抓取运动学·····	169	第八章 非完整运动规划 ·····	233
7 小结·····	170	1 概述·····	233
8 文献说明·····	171	2 典型控制系统的正弦控制·····	234
9 习题·····	172	2.1 一阶可控系统:Brockett 系统·····	235
第六章 机器人手的动力学及控制 ·····	176	2.2 二阶可控系统·····	237
1 有约束的拉格朗日方程·····	176	2.3 高阶系统:链式系统·····	238
1.1 Pfaffian 约束·····	176	3 一般控制方法·····	240
1.2 拉格朗日乘子·····	178	3.1 傅里叶技术·····	240
1.3 拉格朗日-达朗伯方程·····	179	3.2 链式转换·····	243
1.4 非完整约束的性质·····	182	3.3 非完整系统的最优控制·····	244
2 机器人手的动力学·····	183	3.4 分段定常输入控制·····	247
2.1 公式推导及有关性质·····	183	4 动态手指重定位·····	251

4.1 问题的描述·····	251	1 用于危险环境的机器人·····	260
4.2 用正弦输入进行控制·····	252	2 用于医疗的多指手·····	261
4.3 几何状态算法·····	253	3 小型机器人——微机器人学·····	262
5 小结·····	255	附录 A 李群与机器人运动学 ·····	264
6 文献说明·····	256	附录 B 旋量计算软件包 ·····	285
7 习题·····	256	索引 ·····	288
第九章 机器人操作的研究展望 ·····	260	参考文献 ·····	292

第一章 绪 论

近 20 年来,有关机器人的概念及其应用已经从作为科幻电影的素材发展到在工业领域广泛应用的计算机控制的机电装置。在日常工作中可以见到机器人应用于如下领域:在汽车组装线上对车身进行焊接和喷漆;将集成电路元件装插在印刷电路板上;在核辐射、水下、地下等环境进行检查和维修;甚至用于农业生产中摘桔子、收葡萄。虽然这些机器人大都不是拟人的,但是人们对于拟人机器的追求并没有减少,人们甚至幻想把机器人发展成人类自身的复制品。虽然在未来几年里,还不能看到这类机器人,但把具有末端执行器的简单机器人引入到广阔的应用领域,人类已取得了很大进步。另外应该注意到,机器人学研究步伐的急切以及对机器人功能的期望,很大程度上取决于对人类自身生物运动控制系统之惊人能力的了解。

1 历史回顾

机器人一词是 1921 年由 Czech playwright Karel Capek 在他的讽刺剧“鲁世慕的万能机器人”中首先提出的。在剧中,他把机器人描绘成与人类相似但能不知疲倦地工作的机器。剧中,机器人最终违反他们的创造者而消灭了人类。由该剧派生出大量的科幻文学和电影,从而形成了对机器人的认识:像人,富有知识,甚至还有个性。因此,与娱乐界所创造的机器人相比,当今的机器人显得很原始也就不足为奇了。为使读者对现代机器人的发展有个了解,本书借助 Fu, Gonzalez 和 Lee^[35]以及 Spong 和 Vidyasagay^[111]的描述来说明该领域的发展简史。在从 50 年代到 80 年代的发展过程中,下面粗略地以 10 年为一个阶段加以回顾。

形成机器人今天这种局面的早期工作,开始于第二次世界大战之后对遥控机械操作手的研究,这种机械操作手由 Argonne & Oak Ridge 国家实验室开发,用于处理放射性物质。这些早期的机械装置包括主操作手和从操作手,经使用者对主操作手的运动示教,通过从操作手加以运动再现。从操作手通过一系列机械连杆与主操作手相连。在由通用电气公司和通用机器人公司制造的“远程操作手”teleoperators 上,这些连杆最终被电动或液力偶合器所代替。1949 年,为使从操作手不至于压碎玻璃器皿之类的物体,在远程操作手上又加入了力反馈。

在远程操作手发展的同时,适用于小体积、高质量航空部件精密铣削加工的数控(CNC)机床也发展起来。George Devol 在 1954 年用 CNC 机床控制器的可编程技术取代远程操作手的主操作手,发明了第一台机器人,他称其为“可编程关节式输送装置”。哥伦比亚大学的学生 Joseph Engelberger 买下了上述专利权,并于 1956 年在康涅狄格州成立了 Unimation 公司。该公司于 1961 年在通用电机制造厂生产出它的第一台机器人。该机器人的主要革新之处在于可编程性,它能以相对低的花费,通过重新编程及更换刀具使它能完成多种多样的任务。Unimation 机器人手臂的机械结构与传统设计不同,它采用开式运动链,也就是多自由度的悬臂梁。这就使其具有比自身所占据空间更大的工作空间,但同时也给设计带来不少问题,因为悬臂梁末端的精确控制以及刚度的调节很困难,而且运动链末端会将运动

链根部的误差放大。为解决此问题，关节驱动器采用功率大、精度高的液压驱动器。

新近开发的机器人通过传感反馈使其灵活性明显提高。1962年 Ernst 制造出具有力感觉的机器人，它能堆积块料。据了解，该系统最先涉及机器人与非结构化环境的相互作用，它导致麻省理工学院 (MIT) MAC (Man And Computer) 工程的创立。Tomovic & Boni 开发了一种机器人用压力传感器，借助于压力传感器，机器人能挤压被夹物体，并研究了两种不同抓取方式中的一种。几乎在同一时期，McCarthy 和他的同事于 1963 年开发出二元机器人视觉系统，这种系统能对周围的障碍物作出反应。该时期还产生了许多其他类型的机器人运动学模型，如 Stanford 操作手 (图 1.1)、Boston 臂、AMF 臂以及 Ed-

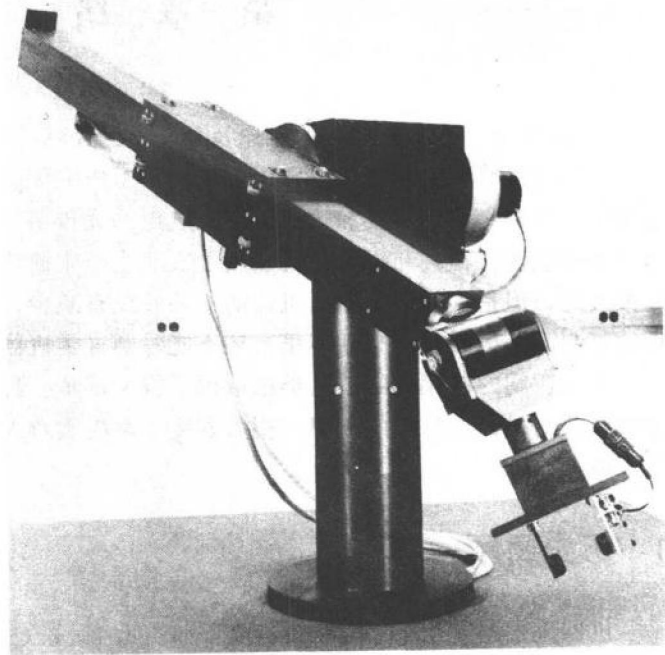


图 1.1 Stanford 操作手

inburgh 臂。这个阶段的另一种新颖机器人是行走机器人，它由通用电气公司于 1979 年为军队而设计。能够声控和堆积分散物体的机器人在 Stanford 和其他地方也发展起来。1968 年，日本川崎获得了 Unimation 的许可证，从而机器人在日本出现。

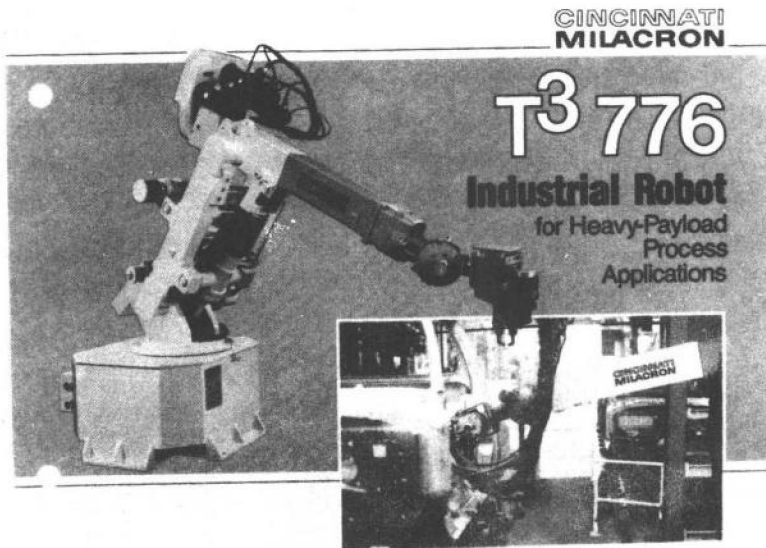


图 1.2 Cincinnati Milacron T³ (未来工具) 机器人

1973年，Stanford大学研究出第一种用于机器人运动控制的编程语言——WAVE，这就使得用高级命令驱动机器人成为可能。与此同时，1974年，机床制造商 Cincinnati Milacron 有限公司生产出它的第一台计算机控制的机器人，称为未来工具 (T^3) (图 1.2)，它能提起 450N 的负荷，并能在装配线上跟踪运动的工件。70 年代后期，Paul & Bolles 成功地用 Stanford 操作手装配水泵，Will & Grossman 利用具有触觉和力传感器的机器人装配了由 20 多个零件组成的打字机，Draper 实验室的研究人员在装配作业中使用了一种远程中心随动装置 (RCC)。

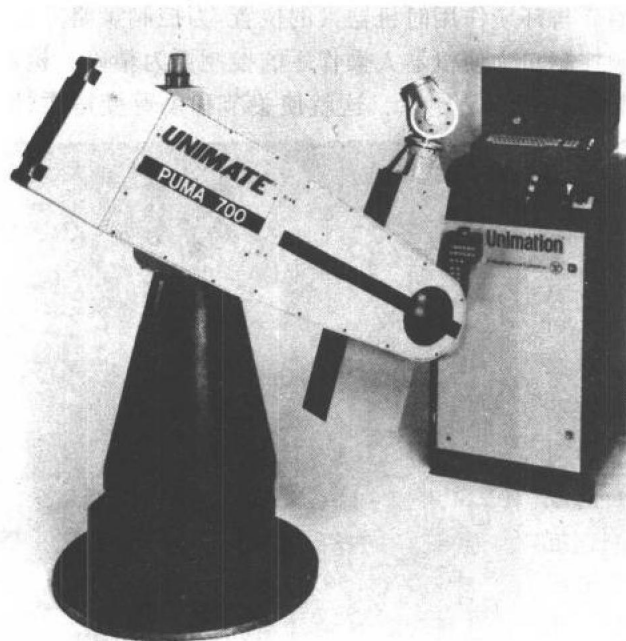


图 1.3 Unimation PUMA (装配用可编程万能机器人)

1978年，Unimation公司在通用电机研究成果的基础上，开发出用于装配的可编程万能机器——PUMA 机器人 (图 1.3)。70 年代中期，在喷气推进实验室，Bejczy 开始为太空操作手编写远程操作程序。1979年，SCARA 机器人先后在日本和美国问世。

随着工业机器人应用的普及和推广，出现了各种不同传动方式的机器人。对于轻载作业，出于相对廉价和洁净的原因，常采用电动机驱动的机器人。由于电动机只有在高速时才能获得最大功率，因此使用时需对电动机进行减速。但是，齿轮减速带来摩擦、间隙和成本高等问题。为此，有必要寻找一种无需对电动机进行减速、能直接驱动机器人关节的方法。针对这种需要，于 1981 年 Asada 在 Carnegie Mellon 开发出这种直接驱动机器人 (图 1.5)。

进入 20 世纪 80 年代后，人们多方努力以求提高工业机器人在精细作业任务中的性能，积极主动的方法是用反

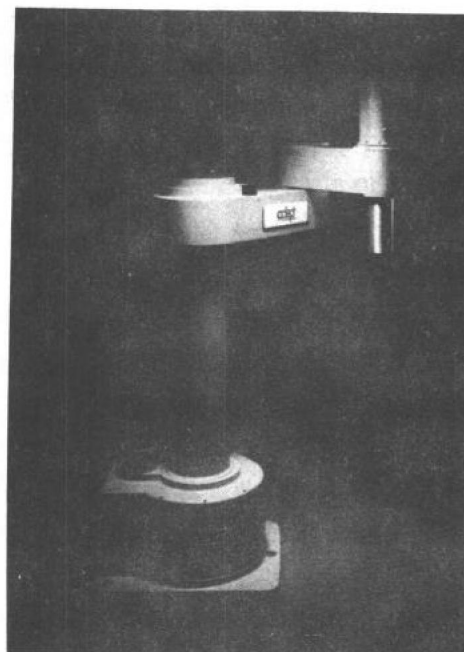


图 1.4 AdeptOne 机器人

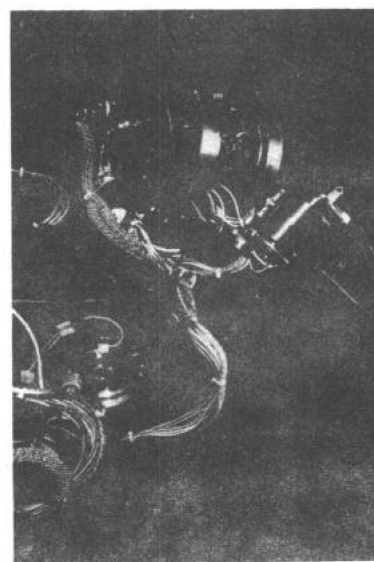


图 1.5 CMU 直接驱动臂 I 号

馈控制来提高机器人的定位精度和自适应性，消极被动的方法是对机器人手臂机械结构进行重新设计。可以这样认为，就开发新型机器人的需求而言，80年代不是一个伟大革新的时代，期间研究的主体工作主要是掌握机器人控制算法、轨迹规划以及传感器的综合运用。所建立的第一代主动控制算法主要是基于比较有效的递推拉格朗日方程和关于机器人动力学方程中重力、哥氏力的算法。与此同步的研究工作是利用计算力矩的方法通过状态反馈将多关节机器人动力学作以比较准确的线性化。从计算的需要来看，这种方法具有能给出操作手瞬态精确边界条件的优点，而且还能精确地消去非线性项，这在近似或自适应的实际操作中或是由近似方法，或是由自适应方法来实现的。与环境作用时机器人的位置/力控制策略方面，也研究出一些其他方法，如混合控制或柔顺控制。为使机器人操作手的控制更为精确，机器人连杆采用轻质材料，其关节用谐波传动装置，而不是轮系，这就使关节和手臂变得柔性。由此关于柔性杆、柔性关节机器人控制算法的研究就显得很有必要。

90年代机器人的发展趋势是使其能适应不同的装配任务。其中的一种称为“机器人世界”，由 Automatrix 制造，它具有如下特点；在 Sawyer 电动机的定子上安装空气轴承，由空气轴承支撑组合式四自由度的杆系，通过在杆系末端安装不同的末端执行器，即能用于不同的装配任务。对于危险环境的作业，移动机器人（图 1.6）的发展可算是迈出了一大步，它能用于卫星探测，危险的废料处理以及农业生产中。除了可重构形机器人或适用于危险环境的机器人研究项目外，当今机器人学研究主要是在微小型传感器和作动器方面的一些大型技术的进步，以及计算与控制技术的发展。本书将在第九章探讨机器人学的这些前沿研究。

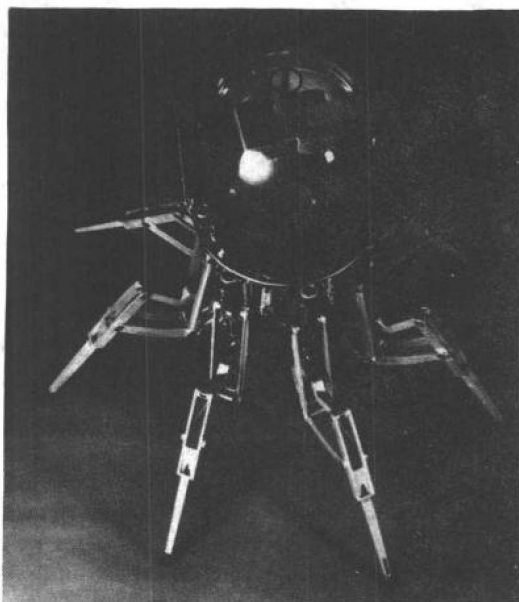


图 1.6 Odex I 号六足移动机器人

2 多指手和灵巧操作

当今实际应用中的机器人大多数是由六个转动或移动关节组成，它们用简单的末端执行器夹持工件。其应用范围从抓取操作，移动相机或检修设备，到可完成含有配合件的复杂装配任务。这不是早期想象中科幻小说中的故事，而是在许多领域已发挥作用的实实在在的事实。它们被用于焊接、喷漆、搬运物体、组装印制电路板以及在危险环境中的检修。

出于拟人化的想象，用术语手或末端执行器来描述机器人与环境之间的相互接触关系。大多数的手是简单的，如夹持器（两爪或三爪）、钳子、夹子或特定作业时的自适应柔顺装置。而大多数末端执行器是针对特定任务、特定被夹零件而设计的。例如，吸杯可用来吸附玻璃制品，但不能用于吸附金属件；而气动爪可用于夹持金属物体，但不能夹持易碎的塑料制品。进一步讲，实际应用过程中通常遇到的问题是，仅安装这些简单手的六自由度机器人

是很笨拙的，主要体现在如下几个方面。

1) 缺少灵活性。简单的夹持器夹持工件很可靠，但不能对被夹工件进行操作。

2) 夹持方式有限。对于不同的工作任务，需要频繁地更换末端执行器。

3) 即使末端执行器仅需要较小的运动量，也要通过机器人臂部较大的运动量来实现。因为机器人臂部上离末端执行器越远的电动机其功率越大，所以运动最早的电动机就会显得缓慢，并且效率不高。

4) 缺少精确的力控制。这就使得装配作业只能局限于一些最基本的任务。

多指手有助于解决以上问题，它使机器人更加灵活，也更通用。多指手由于具有自适应性，能实现多种不同的夹持，而无需更换末端执行器。多自由度手使用了大量的轻质驱动装置，从而有利于夹住物体实现快速、精确和高效的运动。高带宽精确运动的力控制技术也因此发展起来。实际上，多指手是真正意义上的拟人化并能实现灵活操作的手：我们人类先通过臂部的运动使手部在给定空间内定位，然后再用腕部和手指以一种比较复杂的方式来操作对象，只要改变抓取方式，即可通过手指实现捏、抱或固定物体。哺乳类动物的智能在于他们的运动表皮组织有助于手的控制。神经生理学家画出了这些运动表皮的组织图（图 1.7）。对人类而言，运动表皮的大部分（约 30%~40%）是用手的控制的。相比而言，多数猴子是 20%~30%，而狗和猫则低于 10%。

多指手最先用作假肢。Childress^[18]提及了在 1509 年为武士 Berlichingen 制作的一种装置，这位武士年轻时在战争中失去了一只手。这种弹簧驱动装置在战斗中是很有用的，但在日常生活中却很不方便。在 Berlichingen 手之后，从 1509 年至今，已设计和制作了许多其他的假手，其中几种至今仍然可用。它们中有些是被动型的（使用弹簧），有些则是主动型的（通过臂部的弯曲或耸肩进行控制）；有的可以随意锁合，有的则不能随意锁合。Childress 把手划分为以下四种类型：

1) 装饰型。这类手没有真正意义上的运动，不能被驱动，但它们可用来推动物体或与其他手的配合使用。

2) 被动型。这类手需要人手（非假手）的帮助来调整其抓取动作，早期的手即属此类，如 Berlichingen 手。

3) 身体驱动型。这类手通过身体的运动进行驱动。两个最常见的动作是：通过臂部向前运动来拉电缆（臂部弯曲控制），或肩部的圆弧运动来拉电缆（耸肩控制）。事实上，经常可以见到被截肢者耸肩或上臂关节这类运动。

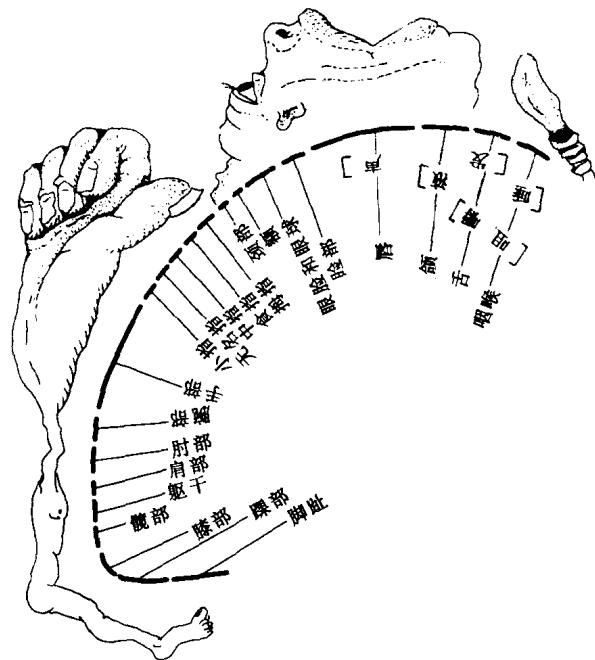


图 1.7 运动表皮的组织图

4) 外部动力型。这类手从储能装置如电池或压缩空气中获得能量。在假肢应用中常取代身体驱动型手。

动力型手从 1920 年开始流行。但其广泛应用却是从 20 世纪 30 年代开始的。由 Tomovic 和 Boni 研制的 Belgrade 手最初是为南斯拉夫的一位因伤寒而失去手臂的人设计的。其他手是用作四肢残缺畸形儿的肢体。Utah 大学开发了一系列肌电控制假肢，主要用于抓取物体。这些装置在机构方面是相当先进的，其灵巧性来源于使用者的视觉导向反馈训练，而不是靠装置内部的反馈。

在机器人发展史中，适应于危险或难于接近环境（如核辐射、水下、太空、探矿，甚至外科医疗）的远程操作手为灵巧多指手的发展奠定了基础，这些装置使操作者能在远处用自己的手来完成简单的操作，并能将命令传给远程多指操作手。在外科医疗中，远程操作手是一个安放在病人体内的手术装置。

在设计某种能介于远程操作手、假肢和灵巧末端执行器之间的多指手方面已做了许多尝试。这些手真正代表了从拟人（仿人手）到智能化末端执行器（赋予机器人更大的灵活性）之间的折中观点。有关多指手的研究例子可在 Skinner^[107]、Okada^[85]和 Hanafusa & Asada^[39]的工作中见到。Okada 手是一个由绳索驱动的四指手，它能完成将螺栓拧进螺母之类的任务。Hanafusa & Asada 手有三个弹性手指，由一个电动机驱动，带有三个爪子，从而可稳定抓取一些形状特殊的物体。

近期研制出来的多指手有：Salisbury 手（也称 Staford/JPL 手）^[70]、Utah/MIT 手^[45]、NYU 手^[24]、研究型手 Stgx^[77]。Salisbury 手（图 1.9）有三个手指，每个手指有三个自由度，所有关节都采用绳索驱动，其中的一个手指（拇指）与其他两个手指相对配置。Utah/MIT 手（图 1.8）有四个手指（三个小指和一个拇指），手指配置类似于人手，其中每个手指有四个自由度，采用绳索驱动。以上两种手在驱动方面的差异在于如何驱动绳索（腱），前者使用电动机，而后者使用气缸。NYU 手是一种非拟人型的平面手，由步

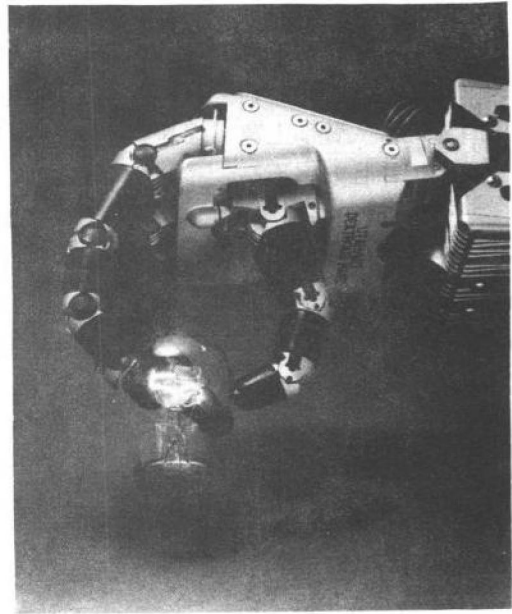


图 1.8 Utah/MIT 手

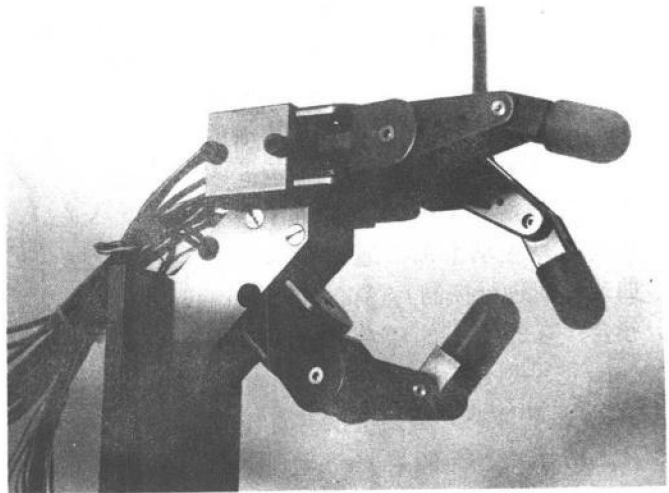


图 1.9 Salisbury 手（由 Kenneth Salisbury 设计）

试读结束：需要全本请在线购买：www.ertongbook.com