

 Springer

机器人 Springer

Handbook of Robotics

第2卷 机器人技术 手册

[意] Bruno Siciliano (布鲁诺·西西利亚诺) 编辑
[美] Oussama Khatib (欧沙玛·哈提卜)
《机器人手册》翻译委员会 译



原书荣获 The AAP PROSE Award for Excellence in Physical Sciences & Mathematics
The APP PROSE Award for Engineering & Technology

原书编者获得三项IEEE殊荣:

Bruno Siciliano 教授荣获 The IEEE RAS Distinguished Service Award

Oussama Khatib 教授荣获 The IEEE RAS Pioneer in Robotics and Automation Award

Alexander Zelinsky 教授荣获 The IEEE Inaba Technical Award



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

Springer Handbook of Robotics

机器人手册

第2卷 机器人技术

[意] Bruno Siciliano (布鲁诺·西西利亚诺)

[美] Oussama Khatib (欧沙玛·哈提卜) 编辑

《机器人手册》翻译委员会 译



机械工业出版社

《机器人手册 第2卷 机器人技术》共分3篇,详细介绍了机器人的传感与感知、操作与接口、移动式和分布式机器人技术。

传感与感知篇介绍用于生成机器人模型及外部环境的机器人的不同感觉形态和跨时空传感数据整合。包括力和触觉传感器、惯性传感器、全球定位系统和里程仪、声呐感测、距离传感器、三维视觉及识别、视觉伺服与视觉跟踪、多传感器数据融合。

操作与接口篇介绍了机器人与物体之间,机器人与人之间,机器人之间的交互。涵盖了面向操作任务的运动、接触环境的建模与作业、抓取、合作机械手、触觉学、遥操作机器人、网络遥操作机器人及人体机能增强型外骨骼。

移动式和分布式机器人篇介绍了轮式机器人运动控制、运动规划和避障、环境建模、同时定位与建图、基于行为的系统、分布式和单元式机器人、多机器人系统及网络机器人技术。

本手册内容深入浅出,并附有大量的科研实例,便于自学和应用,可作为机器人、人工智能、自动化、控制以及计算机应用等专业科研人员、高校师生的参考用书,也可作为相关专业本科生或研究生的参考教材,还可供机器人业余爱好者参考。

Translation from the English language edition: Springer Handbook of Robotics by Bruno Siciliano and Oussama Khatib © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008. Springer is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2009-1142 号。

图书在版编目(CIP)数据

机器人手册. 第2卷, 机器人技术/(意)西西利亚诺(Siciliano, B.), (美)哈提卜(Khatib, O.)编辑;《机器人手册》翻译委员会译. —北京:机械工业出版社, 2016.4

书名原文: Springer Handbook of Robotics

ISBN 978-7-111-53381-8

I. ①机… II. ①西…②哈…③机… III. ①机器人—手册 IV. ①TP242-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060696 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孔 劲 责任编辑:孔 劲 刘本明 杨明远

责任校对:刘秀芝 封面设计:张 静 责任印制:李 洋

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·29 印张·2 插页·998 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-53381-8

定价: 179.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

译丛序

一、机械工程高速发展

机械工程是以自然科学和技术科学为理论基础,结合在生产实践中积累的技术经验,研究和解决机械产品开发、设计、制造、安装、运用、修理及再制造等方面的全部理论和实际应用的学科。机械工程的学科内容包括:机械工程基础理论研究,机械产品开发、设计,机械产品的制造、装备、检验,机械产品的应用与维护,机械制造企业的经营和管理,机械产品的绿色生命周期等问题及技术措施。机械工程先进技术涉及设计、制造、应用、管理等相关环节的机械、电子、信息、材料、能源和管理科学等领域的先进技术。

20 世纪后期,特别是进入 21 世纪,计算机、信息技术在机械工程领域的广泛、深入应用,使机械工程技术高速发展。机械工程技术由线性到非线性、由静态到动态、由二维到三维的研究发展,为现代机械设计方法的研究、应用奠定了工程理论基础;虚拟技术、创新设计、绿色设计、并行工程等,为现代机械设计提供了技术基础;机床数控技术、工业机器人、柔性制造技术、传感技术、集成制造技术、自动检测及信号识别技术等,为机械制造工艺自动化提供了支撑技术;ERP(企业资源计划)、MES(制造管理信息系统)、CIMS(计算机集成制造系统)等,为机械制造企业的经营和管理提供了现代化的支撑平台;PLM(产品全生命周期管理)、IWM(废物管理一体化)、EMS(环境管理体系)等理念、技术的发展,已成为机械工程先进技术的重要组成部分。

机械工程先进技术是实现工业技术现代化重要的技术支撑之一。但是,机械工程先进技术的发展要受到自然条件、经济条件、社会条件、技术基础等的限制,我国作为发展中国家,在机械工程先进技术方面同工业发达国家还有很大差距。为了加快我国机械工程先进技术的发展进程,通过各种方式引进外国机械工程先进技术,是一条切实可行的发展之路。

二、图书交流传播知识

图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式。早在 20 世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络通信、计算机等信息传输和储存手段,但图书仍将以严谨性、系统性、广泛性、适应性、持久性和经济性而长期存在。纸质图书有更好的阅读优势,可满足不同层次读者的阅读习惯,同时它具有长期的参考价值和收藏价值。

近年来,国际间的交流与合作对机械工程技术领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,对机械工程技术领域科技人员及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、取得的最新成果及应用情况等,发挥了积极作用。

机械工业出版社希望通过引进、翻译国外机械工程技术领域的先进技术图书,传播国外机械工程领域的先进技术,推动国内学者和技术人员对国外机械工程先进技术的引进、消化、吸收和创新发展,从而提升我国机械工程技术自主创新能力,提高我国装备制造业的技术水平,加速实现我国工业的现代化。

三、精挑细选精雕细刻

为真正实现翻译国外机械工程技术领域先进技术图书、推动我国机械工程技术发展的战略目标,机械工业出版社将认真执行:

(1) 精挑细选 坚持从机械工程技术比较发达的国家、国外优秀出版社引进优秀技术图书,组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。本套译丛将涵盖机械工程的基础理论研究,产品开发、设计、制造、运用、维修、再制造和资源、环保、信息、管理等相关学科。

(2) 精雕细刻 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员把关,以充分保证图书内容的先进性、适用性和翻译质量。内容翻译力争达到信、达、雅,真正实现传播国际机械工程先进技术,服务于国内机械工程技术的发展。

(3) 精益求精 本套丛书作为我社的精品重点书,将统一封面装帧设计,在版式编排、内容编校、图书印制等方面追求高质量,把“精品”体现到书的整体中去,力求为读者奉献一套高品质的《国际机械工程先进技术译丛》。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢广大积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者,积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐翻译的知名专家;特别要感谢承担翻译工作的译者所付出的辛勤劳动;同时要感谢从事图书版权贸易的工作人员的辛勤工作。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助,欢迎广大读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社《国际机械工程先进技术译丛》编委会

作者序一

我对机器人学的首次了解是源自 1964 年的一个电话。打电话的人是 Fred Terman，世界著名的《无线电工程师手册》的作者，当时任斯坦福大学教务长。Terman 博士告诉我计算机科学教授 John McCarthy 刚获得一大笔研究经费，其中的一部分将用于开发计算机控制的机械臂。有人向 Terman 建议，如果以数学为方向的 McCarthy 教授和机械设计师联手，这将会是很聪明的做法。由于我是斯坦福教员中唯一有机械设计专长的人，Terman 打算给我打个电话，尽管我们从未谋面，而且我还是个刚刚研究生毕业、在斯坦福只工作了两年年轻助理教授。

Terman 博士的电话使我与 John McCarthy 和他创建的斯坦福人工智能实验室（SAIL）有了紧密的联系。机器人成了我整个学术生涯的支柱，直到今天，我一直保持着对这一主题的教学与研究兴趣。

机器人控制的近代历史要追溯到 20 世纪 40 年代后期，当时伺服控制的机械臂被开发出来，它与主从方式的机械臂连接起来被用于处理核物质，从而保护相关人员。这一领域的发展一直延续到现在。然而在 20 世纪 60 年代初期，还很少有关于机器人学的学术活动和商业活动。首个学术活动是 1961 年麻省理工学院 H. A. Ernst 的论文。他用装有触觉传感器的从动机械臂在计算机控制下工作。他的研究思想就是利用触觉传感器中的信息来引导机械臂运动。

之后斯坦福人工智能实验室随之开展了相关项目，麻省理工学院 Marvin Minsky 教授也启动了类似的项目，这些研究在当时是在机器人学领域为数不多的学术冒险。这些尝试中的少数是在商业机械臂方面，大部分与汽车工业生产相联系。在美国，在汽车工业中对两种不同的机械臂设计进行了实验：其中一种来自 AMF 公司，另一种来自 Unimation 公司。

另外还有一些制造成手、腿和臂部假肢的机械装置，不久之后，为了提高人的能力还出现了外骨骼装置。那时还没有微处理器，所以这些装置既不受计算机控制，也不受远程的所谓微机所遥控，更不用说大型计算机控制了。

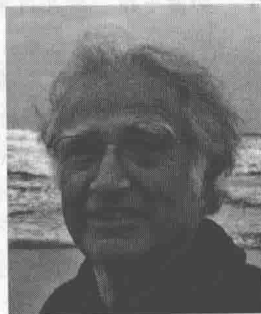
最初，计算机科学领域中的一些人认为计算机已足够强大，可以控制任何机械设备，并使其完美执行。但我们很快发现并非如此。我们分两条路线进行。其一是为斯坦福人工智能实验室（SAIL）开发特殊设备装置，以保证刚刚起步的机器人团队开展实验达到硬件证明与概念验证系统。另一条路线或多或少与斯坦福人工智能实验室的工作相关，是发展机器人的基础机械科学。我有一种强烈的感觉，可能会发展出一项有意义的科学。我们最好从基本概念的方面思考，而不是专门集中在特定的设备上。

幸运的是，两种路线竟然相互间非常和谐融洽。更重要的是，研究者们对这一领域的研究很感兴趣。硬件开发为更多的基本概念提供了具体的例证，研究者们能够同时开发硬件和理论。

起初，为了尽快开始研究，我们购买了一只机械臂。在洛杉矶的 Rancho Los Amigos 医院有人在销售一种开关控制型电动机驱动的外骨骼机械臂，用来帮助那些臂部失去肌肉的患者。我们购买了一台，把它连接在 PDP-6 型分时计算机上。这套设备被命名为“奶油手指”，它是我们的第一个实验机器人。一些电影展示的视觉反馈控制、堆垛任务和避障都是由这台机器人作为明星演员完成的。

第一个由我们自主设计的操纵器被简单认为是“水压臂”。正如它的名字所指，它是由水力驱动的。要建立一个非常快的手臂，我们设计了特殊的旋转驱动器，这个手臂工作得非常好。它成为了最早测试机器人手臂的动态分析和时间最优化控制的实验平台。然而，当时普遍来说，计算、规划和传感性能都都很有限，由于设计速度比要求速度快得多，使得这项技术的应用很受限制。

我们尝试去开发一个真正的数字化手臂。从而产生了一个蛇形结构，取名为 Orm（挪威语中的蛇）。Orm 有若干节，每节有膨胀的气动驱动器阵列，它们要么完全伸展，要么完全收缩。基本思想是：虽然在工作空间



Bernard Roth

美国斯坦福大学机械工程教授

中 Orm 仅可达到有限数量的位置,但是如果达到的位置有很多,那么这也是足够的。一个经过概念验证的小型原型 Orm 被开发出来,然而我们发现这种类型的手臂不能用于斯坦福人工智能实验室团队。

我们实验室第一个真正具有功能的手臂是由当时的研究生 Victor Scheinman 设计的,它就是非常成功的“斯坦福手臂”。有十几个这种手臂作为研究工具用于不同的大学、政府和工业实验室。它有六个独立驱动关节,均由计算机控制的直流伺服电动机驱动。其中一个关节是棱柱的,另外五个是旋转的。

鉴于“奶油手指”的几何学需要逆运动学的迭代解,因此选择“斯坦福手臂”的几何构型,即可以通过编程获得其逆运动学的迭代解,应用起来简单而高效。而且,这个机械设计是特别制作的,以兼容分时计算机控制固有的局限性。不同的末端执行器被连接到机械臂末端作为手。在我们的版本中,手被做成钳夹的形式,还有两只滑动手指,两只手指由一台伺服驱动器驱动,因此,手臂的实际自由度数目有 7 个。它也有一个特别设计的六轴腕部力传感器。Victor Scheinman 继续开发了其他重要的机器人:首先是一个有六个旋转关节的小型仿人手臂。最初设计是由麻省理工学院人工智能实验室 Marvin Minsky 资助的。Victor Scheinman 建立了 Vicarm 公司,这是一家小公司,为其他实验室制造了这个手臂和“斯坦福手臂”。Vicarm 后来成为了 Unimation 公司的西海岸分部,在那里,通过 Unimation 公司在通用电机公司资助下他设计了 PUMA 机械臂。后来,Victor Scheinman 为 Automatix 公司开发了全新的 Robot World 多机器人系统。在 Victor Scheinman 离开 Unimation 后,他的同事 Brian Carlisle 和 Bruce Shimano 重组了 Unimation 公司的西海岸分部——Adept 公司,该公司现在在美国最大的装配机器人制造商。

很快,精密机械和电子设计、优化的软件,以及完整系统集成的现代化趋势成为常态。到现在,这些结合是最高级机器人装置的标志。这是在“机械电子”(又译“机电一体化”或“电子机械”,mechatronic)背后的基本概念。“机械电子”这个词发源于日本,它代表机械和电子两个词的串联。依赖于计算的机械电子,正如我们今天所知的,是机器人固有技术的实质。

随着机器人技术在全世界的发展,很多人开始在与机器人相关的领域工作,一些特有的附属专业得到了发展。首先最大的分化是进行机械臂工作的人和视觉系统工作的人。早期,视觉系统在给出机器人周围环境的信息方面看起来比其他方法更有前途。

视觉系统是通过摄像机来捕获周围物体的图片,然后使用计算机算法对图像进行分析,从而推断出物体的位置、方位和其他特性。图像系统最初的成功在于解决定位障碍物问题、解决物体操作问题和读取装配工程图。人们感到视觉用于与工厂自动化和太空探索有关的机器人系统中具有很大潜力。这致使人们开始研究可以通过视觉系统识别机器零件(特别对于部分封闭的零件,发生在所谓的“拾箱”问题中)和形状不规则的碎石的软件。

在“看”和移动物体的能力被建立以后,下一个合理的需要就是让机器人做一系列事件的规划、去完成一项复杂的任务。这使得规划的发展成为机器人技术非常重要的分支。在固定的环境中制定固定的计划相对来说是很直接的。然而,在机器人技术中,面临的挑战之一就是,由于误差或者未计划的事件,环境发生了未预料到的变化,此时,机器人会发现环境的变化并且修改自身的行动。在此领域的一些里程碑事件是通过使用一台叫做 Shakey 的车辆来开展的,开始于 1966 年,由斯坦福研究所(现在称为 SRI)的 Charlie Rosen 小组开发。Shakey 有一台摄像机、距离探测器、碰撞传感器,通过无线电和视频连接到 DEC PDP-10 和 PDP-15 计算机上。

Shakey 是第一台可以思考自己行动的移动机器人。它利用程序获得独立感知、周围环境模仿和产生动作的能力。低级别的操作程序负责简单的移动、转动和路径规划。中级别的操作程序包含若干个低级别程序,可以完成更复杂的任务。最高级的操作程序能够制定和执行计划来实现用户提出的高级目标。

视觉系统对于导航、物体定位和确定它们之间的相对位置与方位非常有用。然而,当在具有环境约束力的地方,对于装配零件或者与其他机器人一起工作,只有视觉系统通常是不够的。因而产生了一种需求:对环境施加到机器人上的力和力矩进行测量,并利用测量结果来控制机器人的行动。多年以来,力控制操作成为了斯坦福人工智能实验室和遍布世界的其他几个实验室的主要研究课题之一。力控制在工业实践中的使用始终落后于该领域的研究发展。这是由于尽管高级的力控制系统对于通用的操作问题非常有效,但限制非常苛刻的工业环境的特殊问题经常只能在有限的力控制甚至没有力控制时解决。

在 20 世纪 70 年代,行走机器、机械手、自动汽车、多传感器信号融合和恶劣环境设计等专门领域开始快速发展。今天有大量的、不同的以机器人为主题的专门性研究,其中有一些是经典的工程学科领域,如运动

学、动力学、控制学、机器设计、拓扑学和轨迹规划。每一个学科在研究机器人技术之前都已经走过了一段漫长的路程，而为了发展机器人系统和应用，每一个学科已成为深入研究机器人技术的一个方面。

在理论正在发展的同一时间里，工业机器人，尽管稍微有些分离，也有了并行的发展。在日本和欧洲，商业开发强劲，美国也相继发展。相关的工业协会纷纷成立（日本机器协会在1971年3月成立，美国的机器人工业协会（RIA）在1974年成立），定期举行协会展览会，并召开了应用导向的技术会议。其中最重要的有工业机器人国际研讨会（ISIR）、工业机器人技术会议（现在称为工业机器人技术国际会议（ICIRT））以及国际机器人和视觉展览与会议（这是由RIA每年举办的贸易展览会）。

第一个定期的系列会议在1973年召开。它强调机器人技术的各个研究方面，而不仅仅是工业上的。它由在意大利乌迪内的机械科技国际中心（CISM）和机械与机器理论国际联合会（IFTToMM）共同赞助（尽管IFTToMM仍在使用，但是意义已经变为机械与机器科学促进国际联合会）。该会议的名称是机器人与机械臂的理论与实践大会（RoManSy），明显特征是强调机械科学和来自东欧、西欧，还有北美和日本的科研人员们的积极交流、分享成果，会议现在仍然每半年举行一次。在我个人的笔记里，就是在RoManSy会议中，我首次遇到了这本手册的各位编辑：1978年遇到了Khatib博士，1984年遇到了Siciliano博士。他们当时都是学生：Bruno Siciliano攻读他的博士学位已经差不多一年了，Oussama Khatib那时刚刚完成了他的博士学位研究。两个事件，都让人产生一见钟情的感觉！

众多其他新的会议和研讨会迅速加入到RoManSy里面。如今，每年有大量机器人研究导向的会议在许多国家举行。当前，最大型的会议是一般吸引了超过1000位参会者的IEEE机器人与自动化国际会议（ICRA）。

在20世纪80年代初期，Richard Paul撰写了美国第一本真正关于机器人操作的教材《机器人操作——数学、编程与控制》出版社（Richard P. Paul, MIT, 1981）。它把经典力学学科的理论应用到机器人领域。另外，书中有一些主题是从他在斯坦福人工智能实验室的论文研究中直接发展而来（在书里面，许多例子基于Scheinman的“斯坦福手臂”）。Paul的书是美国的一个里程碑事件，它为将来一些有影响力的教材开创了一个模式，还鼓励众多的大学与学院开设专门的机器人课程。

差不多与此同时，一些新的期刊创刊，这些期刊主要发表机器人相关领域的论文。在1982年的春天，《机器人研究国际期刊》创刊，三年之后，《IEEE机器人与自动化期刊》（现在的《IEEE机器人学报》）创刊。

随着微处理器的普及，关于什么是或什么不是机器人的问题更加凸显出来。在我的脑海里，这个争论从来没有被很好地解决过。我认为永远不会有大家都普遍同意的定义。当然，存在着科幻小说中各种各样的外太空生物和戏院、文学以及电影中的机器人。早在工业革命之前，就有过想象中的类似机器人生物的例子，但实际的机器人又会是怎样的呢？我认为关于机器人的定义实质上是一个随着科技进步而不断改变其本体特征的移动靶。例如当船上的陀螺仪自动罗盘第一次被开发出来时就被认为是一个机器人。现在，当我们罗列在我们世界中的机器人的时候，总是无法完全囊括所有的机器人。机器人的定义已经被降级了，现在机器人被看做是一种自动控制装置。

对于很多人来说，机器人包含着多功能的概念，机器人即意味着在设计 and 制造时就具备了容易适应或者可被重新编程以完成不同任务的能力。在理论上，这种想法应该可以实现的，但在实际中，却是大多数的机器人装置只能在非常有限的领域里实现多功能。人们很快发现，在工业中一般而言，一台具有专门用途的机器要比一台具有广泛用途的机器表现好得多。而且在制造加工时，当产品的产量足够高的时候，一台具有专门用途的机器要比一台具有广泛用途的机器花费少。因此，人们开发出专业机器人用于喷漆、铆接、零部件装配、压力加载、电路板填充等方面。在一些情况下，机器人被用于如此专一的用途，以至于很难划清一台所谓的机器人与一条可调整的“固定的”自动化流水线的界限。人们理想中的机器人应该是能做“所有事”的万能机器，因此这种机器人在大量出售以后价格将相对便宜。但是，许多机器人的实际情况则恰好与之相反。

我认为机器人的概念应该与在给定的时间内什么活动是与人相关，以及什么活动是与机器相关联系起来。如果一台机器突然变得能够完成我们通常和人联系在一起的工作时，这台机器就能在定义上被提升而定义为一个机器人。过了一段时间以后，人们习惯于这件工作由机器来完成了，这个装置就从“机器人”降级为“机器”。那些没有固定底座和那些具有胳膊或腿状附件的机器人更有优势，也更有可能被称作机器人，但是很难让人想到一套始终如一的定义标准，并适合目前所有的命名惯例。

在包括家用机器的所有机器中，拥有微处理器来指导其行动的都可以认为是机器人。除了真空吸尘器，还

有洗衣机、冰箱以及洗碗机都能很容易地作为机器人被推向市场。当然,还存在着很多的可能性,包括那些具有环境感知反馈和判断能力的机器。在实践里,那些被看做是机器人的装置中,传感器的数量和判断能力可能由很多、很强一直变化到完全没有。

在最近的几十年里,对机器人的研究已经由一个以机电整合装置研究为中心的学科壮大为一个宽广得多的交叉性学科。被称作以人为本的机器人领域便是这样的一个例子。在这个领域里,人们研究人和智能机器的相互作用。这是一个发展中的领域,其中,对机器人与人的相互影响的研究已经吸引了来自经典机器人研究领域之外的专家们。人们正在研究一些诸如人和机器人的情感之类的概念;而且一些像人体生理学和生物学等古老的研究领域正在被合并成机器人研究的主流。这些研究活动将新的工程和科学层面引进到了研究著述中,从而丰富了机器人研究领域。

最初,初期的机器人界主要关注让机器去干活。对于那些早期的机器人装置,人们完全只关注它们能不能干活,而很少去在意它们有限的性能。现在,我们拥有精细的、可靠的装置作为机器人系统现代阵列的一部分。这一进步是全世界成千上万人的工作成果,这些工作很多都是在大学、政府的研究实验室和企业里进行的。这一成就创造了包含在本手册 64 章中的大量的信息,这是对全世界工程界和科学界的致敬。显然这些成果并非由任何中央规划或者一个整体有序的计划产生。因此本手册的编者面对着将这些材料组织成一个有逻辑而且清晰明了的整体的艰巨任务。

编辑将稿件划分为三层结构。第一层论述这门学科的基础。这一层由 9 章组成。作者在其中详细讲述了机器人学科、运动学、动力学、控制学、机构学、架构、编程、推理和传感。这些是组成机器人研究和发展的基本技术。

第二层有四个部分。第一部分(第 2 篇)阐述了机器人的结构,包括臂部、腿、手和其他大多数机器人的组成部分。乍一看,腿、臂部和手这些硬件可能相互之间差异巨大,但它们共有一套属性,使他们能够用相同的或很接近的、在第一层中描述过的原理去分析。

该层的第二部分(第 3 篇)涉及传感和感知,它们是什么真正独立的机器人系统所必需的基本能力。正如先前指出,实际上许多所谓的机器人设备只有少量的上述能力,但显然更先进的机器人不能离开它们,并且很大趋势是把这些能力合并到机器人设备中。该层第三部分(第 4 篇)讲述了这门学科领域和设备控制与接口技术的联系。该层第四部分(第 5 篇)由 8 章组成,探讨了移动机器人和不同形式的分布式机器人。

第三层由两部分共 12 章组成,涉及当今研究和开发前沿的高级应用。一部分(第 6 篇)论述现场和服务机器人,另一部分(第 7 篇)讲述以人为本和仿真机器人。对于外行读者,这些章节是先进机器人的全部。然而必须意识到这些非同寻常的实现如果没有前两层所介绍的发展,就可能不会存在。

理论和实践的紧密联系促成了机器人技术的发展,并成为现代机器人的一种特征。这两个互补的方面,对于我们当中那些同时拥有机会研究和开发机器人设备的人,是个人成就感的源泉。本手册极好地反映了学科的两个互补方面,并展现近五十年来的大量研究成果。一些人将要发明更有能力的多样的下一代机器人设备,当然,本手册的内容将作为他们一个有价值的工具和导引。向编辑和作者致以祝贺与崇敬。

Bernard Roth

美国斯坦福大学

2007 年 8 月

作者序二

翻开这本手册，纵观其 64 章丰富的内容，我们不妨从个人的视角，对机器人学在概念、趋势及中心问题等方面的演变作一个概述。

现代机器人学大约开始于半个世纪以前，并向两个不同的方向发展。

首先，让我们了解一下机械臂涉及的范围，从对遭受辐射污染产品的远程作业到工业机械手，无不包含在其领域中，而这之中标志性机器 UNIMATE 是通用机械手的代表。产品的工业发展，大多围绕六自由度串联图景以及积极的研究和开发，将机械工程与控制专业化联系在一起，成为其发展的主要推动力。当今特别值得关注的是，通过对先进的功能强大的数学工具的运用，在新颖的应用优化结构设计方面的努力终于获得了回报。类似的，为实现制造出与人类友好的机器人的梦想，一项关于未来认知机器人的臂和手的设计与实际建造也引起了人们的重视。

其次，还未被人类充分认识但我们应该清楚的是涉及人工智能相关主题的系列工作。在此领域中具有里程碑意义的项目便是斯坦福国际集团开发的移动机器人 Shakey。这项旨在集计算机科学、人工智能和应用数学于一身发展智能机器的工作，至今作为一个子领域已经有一段时间了。20 世纪 80 年代期间，通过对围绕包括从极端环境下的探测器（如星球探测，南极洲等）到服务机器人（如医院，博物馆引导等）等宽广范围的个案研究获得的建设强度，引发了大范围的研究，从而也奠定了智能机器人的地位。

因此机器人学的研究能够将这两个不同的分支联系起来，将智能机器人以一种纯粹的计算方式分类为有限理性机器，这是在 20 世纪 80 年代第三代机器人定义的基础上进行了扩展：

“（机器人）……作为一个通过智能将感知和行动联系在一起，而被赋予了对一项工作拥有理解、推断并执行能力的机器，在三维的世界里执行操作。”

作为一个广泛认可的测试平台，自主机器人领域最近从机器人设计方面的突出贡献中受益颇多，而这些贡献是通过在环境建模及机器人定位上运用算法几何及随机框架法（SLAM，同步定位和建模），以及运用贝叶斯估计和决策方法所带来的决策程序的发展等综合取得的。

在千禧年的过去十年间，机器人学主要处理智能机器人图景，在一个覆盖了先进传感和知觉、任务推理和规划、操作和决策自动化、功能性整合架构、智能人机接口、安全和可靠性等项目的主题内，将机器人和机器智能通用研究结合起来。

第二个分支数年来被认为是非制造机器人学的，涉及大量有关现场、服务、辅助以及后来的个人机器人的、以研究为驱动的真实世界的案例。这里，机器智能在其多个主题内是中心研究方向，使得机器人能够在以下三个方面得以行动：

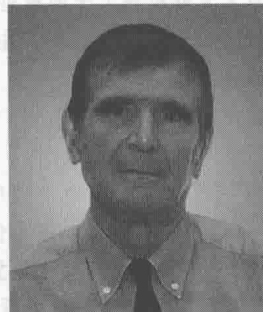
1) 作为人类的替代者，尤其是对于远程或恶劣环境中的干预工作。

2) 通过与人类友好机器人学或以人为本机器人学的所有实际应用，与人类的亲近交互及在人类环境中的操作。

3) 与使用者的紧密协同，从机械外骨骼辅助、外科手术、保健和康复扩展到人类隆胸。

因此，在千年之交，机器人学已经成为一个广泛的研究主题，不仅有对于工程化很好的工业领域支持市场产品，同时也有大量在危险环境中操作的领域导向的应用案例，如水下机器人、复杂地形车、医疗/康复机器人学等。

机器人学的发展水平重点看理论方面所扮演的角色，目前它已经从应用领域发展到技术和科学的领域。这本手册的组织构架很好地阐释了这些不同的水平。此外，为了未来认知型机器人，除了大量的软件系统，人们还需要考虑与人类友好的环境中的机器人物理性质和新奇附件，包括腿、臂和手的设计。



Georges Giralt

法国拉斯-国家科学研究中心
(LAAS-CNRS) 研究主管，
图卢兹

在当前千禧年的前十年，前沿的机器人学正在取得突出的进步，通常由以下两个方向组成：

- 1) 中/短期面向应用的案例研究。
- 2) 中/长期一般情况的研究。

为了完整性，我们需要提到大量外围的、激发机器人学灵感的学科，这些学科经常是关于娱乐、广告和精致的玩具。

与人友好机器人学的前沿领域包括几个一线的应用领域，在这些领域里，机器人（娱乐、教育、公共服务、辅助和个人机器人等）在人类环境或者在和人类密切相互作用的环境里运作。这里也就介绍了人机交互的关键性问题。

正是在这个领域的中心，浮现出来个人机器人的前沿的课题，对此，在这里我们着重强调它的三个总体特征：

- 1) 它们可能由非专业使用者操作。
- 2) 它们可能被设计来和使用者分享高水平的决定。
- 3) 它们可能包含环境装置和机器附件、遥远的系统，还有操作者。这种分享决策的观念暗示这里呈现出一些前沿研究课题和伦理问题。

个人机器人的概念，正扩大为机器人助手和万能“伴侣”，对于机器人学来说确实是一项重大的挑战。机器人学作为科学和技术领域的一个重要分支，提供了在中长期对社会和经济产生重大影响的理念。这里介绍和质疑前沿课题包括以下认知的方面：可协调的智能人机交互、感觉（场景分析、种类识别）、开放式学习（了解所有的行为）、技能获取、大量的机器人世界的数据处理、自主决定权和可靠性（安全性、可靠性、交流和操作稳定性）。

上面提到的两种方法有很明显的协同性，尽管必要的框架存在时差。这种科学上的联系不仅集合了问题和获得结果，而且也在事物两方面创造出和谐的和给技术带来进步。

事实上，这种相应的研究趋势和应用领域的发展获得了爆炸性的实用技术的支持，其中包括计算机处理能力、通信学、计算机网络设计、传感装置、知识检索、新材料、微纳米技术。

今天，展望中长期的未来，我们正面对非常积极的议题和观点，但是也必须对有关机器人的批评性意见和隐存的风险做出回应，这种风险就在于人们担心机器人在和人接触的过程中也可能出现不需要的或者不安全的行为。因此，存在一个非常清晰的需求，那就是研究级别安全性和可靠性与相应的系统限制课题。

《机器人手册》的出版非常及时，充满了挑战性的成果。它由165位作者在64章中总结了大量的难题、问题和方方面面。就其本身而言，它不仅是全世界研究者所获得的基本课题和结果的一个高效展示，而且进一步给每一个人提供了不同的观点和方法。这确实是一个可以带来进步的很重要的工具，但是，更重要的是，它将在这个千禧年的头二十年成为建立机器人学的开端，在机器智能的核心领域成为科学的学科。

Georges Giralt

法国图卢兹

2007年12月

作者序三

机器人学领域诞生于20世纪中期，当时新兴的计算机科学正在改变科学和工程中的每一个领域。机器人学经历了不同的阶段，从婴儿期，童年期到青年期，再到成年期，已经完成了快速而稳健的成长。机器人学现在已经成熟，人们希望它在未来的社会里提高他们的生活质量。

在机器人学的婴儿期，它的核心被认为是模式识别、自动控制和人工智能。带着这些新的挑战，这个领域的科学家和工程师聚集在一起来审查新奇的机器人传感器和驱动器、规划和编程算法以及连接各部分组件的最优结构。在此过程中，他们创造出在真实世界中可以和人进行交互作用的机器人。这些早期的机器人学集中于研究手-眼系统，也就是人工智能研究的试验平台。

“童年时期”机器人的活动场地是在工厂。工业机器人被研究出来，并且应用到工厂进行自动喷涂、点焊、打磨、材料操作和零件装配。拥有传感器和记忆功能的机器人使工厂更加自动化，使机器人的操作更加柔性化、更加可靠和精确。机器人的自动化将人从繁重和乏味的体力劳动中解放出来。汽车、家电和半导体工业迅速将其生产线重整为机器人集成化系统。英文单词“机械电子”（又称为“机电一体化”、“电子机械”）最早是由日本人在20世纪70年代末期提出来的。它定义了一个新的机器观念，在这种观念里，电子和机器系统相融合，这种融合使很多工业产品变得更加简单、却又更加多功能，而且可编程和智能化。机器人学和机械电子学在制造过程的设计、操作和工业产品上都产生了非常积极的影响。

随着机器人学进入它的青春期，研究者雄心勃勃地去探索它新的起点。运动学、动力学和系统控制理论变得更加精妙，同时它们也被应用到真正的复杂机器人的机构中。为了进行规划和完成真实的任务，机器人必须能够认知它所处的环境。视觉——外部感觉的主要的途径，作为机器人了解其所处外部环境的最普通、最有效的、最高效的手段，被开发出来。已经发展起来的高级算法和强有力的装置将会用来提高机器人视觉系统的速度和稳定性。触觉和力的传感系统也需要发展，这样机器人可以更好地操控物体。在建模、规划、认知、推理和记忆方面的研究扩大了机器人的智能化特性。机器人学逐渐被定义为传感和驱动之间的智能连接的研究。这种定义覆盖了机器人学的所有方面：三大科学核心和一个整合它们的综合方法。事实上，由于系统综合使仿生机器的创造成为可能，所以它已经成为一个机器人工程的关键性方面。创造这种仿生机器人的乐趣吸引了很多学生投身到机器人学领域。

在发展机器人学的过程中，科学的兴趣被导向到去理解人类的精妙。人类和机器人的比较研究在科学研究人的功能建模方面开辟出了一条新路。认知机器人学、仿生行为、生物激发的机器人和机器人生理心理学方法，在扩大机器人潜力方面达到了极限。总的来说，在科学探索中，不成熟的领域是稀少的。20世纪80和90年代，机器人学就处于这样一个年轻的阶段，它吸引了大量充满好奇心的研究者进入这个新的前沿领域。他们对该领域持续的探索形成该本富含科学内容的综合性手册。

随着机器人学科前沿知识的掌握，进一步的挑战为我们打开了将成熟的机器人技术应用于实际的大门。早期的机器人的活动空间给工业机器人的场所让路。内科机器人、外科机器人、活体成像技术给医生做手术提供了强有力的工具，这使许多病人免于病痛的折磨。人们期望诸如康复、卫生保健、福利领域的新机器人能够提高老龄化社会的生活质量。机器人必将会遍布于世界的每一个角落——天上、水下、太空中。人们希望能和机器人在农业、林业、矿业、建筑业、危险环境及救援中联手工作，并发现机器人在家务及在商店、饭馆、医院服务中的实用性。在无数的方式中，人们还是希望机器人可以支持我们的生活。然而，从这方面来看，机器人的应用主要受到结构化环境的限制，在这些环境中，出于安全考虑，机器人和人是相互隔离的。在下一个阶段，机器人所处的环境将扩展为非结构化的世界，在这里，人享受服务，将总是和机器人一起工作和生活。在这样的环境中，机器人将必须具备高性能的传感器、更加智能化、强化的安全性和更好的人类理解力。在寻求



Hirochika Inoue

日本东京大学教授

阻碍机器人发展问题的解答过程中，不仅应该考虑技术上的问题，还应该考虑社会问题。

自从我最初的研究——使机器人变成一个奇想，到现在，四十年已经过去了。从最开始就见证了机器人技术的成长我感到幸运和高兴。为了机器人学的诞生，从其他学科引进了基础的技术。没有教科书和手册是现成的。为了达到目前的这个阶段，许多科学家和工程师已经挑战了新的领域。在推进机器人学的同时，他们从多维度的视角丰富了知识本身。他们努力的成果都已经编辑在这本机器人手册中了。这本出版物是百多位世界领军专家共同合作的结果。现在，那些希望投身于机器人学研究的人就能够找到一个可以建构自己知识体系的坚实的基础。这本手册必将会用于进一步发展机器人学，强化的工程教育和系统的知识编辑可以促进社会和工业的知识创新。

在老龄化社会里，人类和机器人的角色是科学家和工程师需要考虑的重要问题。机器人能够对保卫和平、促进繁荣和提高人们生活质量做出贡献吗？这是一个尚未解决的问题。然而，最近个人机器人、家用机器人和仿人机器人的进步间接表明机器人从工业部门到服务业部门的转移。为了实现这种转移，机器人学不可回避这样的观点，那就是机器人学工作的基础包含了社会学、生理心理学、法律、经济、保险、伦理、艺术、设计、戏剧和运动科学。将来的机器人学应该被作为包含人类学和技术的学科来研究。这本手册有选择地提供了推进机器人学这个新兴科学领域的技术基础。我期待机器人学持续不断的进步，期待它能够促进未来社会的繁荣。

Hirochika Inoue

日本东京

2007年9月

作者序四

机器人已经让人类着迷了几千年。在 20 世纪之前制造的机器人没有将传感和动作联系起来，只是通过人力或者是重复性的机器来驱动。直到 20 世纪 20 年代，电子登上舞台之后，才制造出了第一台真正感知世界并能恰当工作的机器人。在 1950 年前，我们开始看到流行杂志中出现了对于真正机器人的描述。20 世纪 60 年代，工业机器人进入了人们的视野。商业压力迫使它们对环境越来越不敏感，而在它们自己的工程化世界中，动作却越来越快。20 世纪 70 年代中期，在法国、日本和美国，机器人再一次在少数研究实验室出现。现在我们已经迎来了一个世界性的研究热潮和遍布世界的智能机器人大规模研究的蓬勃发展。本手册汇集了目前多个领域机器人的研究现状。从机器人的机械装置、感应和知觉处理、智能、动作到许多应用领域，本书都有涉及。



Rodney Brooks
美国麻省理工学院教授

我非常幸运地生活在过去 30 年来机器人的研究革命之中。在澳大利亚，当我还是一个少年的时候，在 1949 年和 1950 年我受到 Walter 在《科学美国人》中所描述的乌龟的启发，制作了一个机器人。当我在 1977 年抵达硅谷时，恰好是计算机个人化革命真正开始的时候，但是我转向了更为模糊的机器人世界的研究当中。在 1979 年我已经可以协助斯坦福人工智能实验室（SAIL）的 Hans Moravec 工作了，当时他正在耐心地使他的机器人“The Cart”在 6 个小时之内行驶 20 米。就在 26 年之后的 2005 年，在同样的实验室——斯坦福人工智能实验室，Sebastian Thrun 和他的团队已经可以使机器人在 6 个小时之内自动行驶 200000 米了，在仅仅 26 年之中就提高了 4 个数量级，比每两年就翻一番的速度还快一点。但是，机器人不仅仅是在速度上提升了，它们在数量上也增加了。我在 1977 年刚到斯坦福人工智能实验室的时候，世界上只有 3 台移动机器人在运行。最近，我投资建立的一个公司制造了第 3000000 台移动机器人，并且我们制造的步伐还在加快。机器人的其他领域也有类似的壮大发展，尽管提供一个简洁的数字化的描述更难一些。以前，机器人太不清楚它们周围的环境，所以人们和机器人近距离一起工作非常不安全，而且机器人也根本意识不到人们的存在。但是近些年，我们已经远离了那样的机器人，还制造出了可以从人们的面部表情和声音韵律当中领悟其暗示的机器人。近期，机器人已经穿过了肉体 and 机器的界限，所以现在我们正在看到一系列的智能机器人，包括从会修复牵引术的机器人到为残疾人设计的康复机器人。最近，机器人已经成为了认知科学和智能科学研究中受尊敬的贡献者。

本手册介绍的研究结果提供了推动机器人伟大进步的关键想法。参与和部分参与工作的编辑们和所有的作者把这些知识汇集起来，完成了一项一流的工作。这项工作将会为机器人的进一步研发提供基础。谢谢你们，并祝贺所有在这项关键工作中付出劳动的人们。

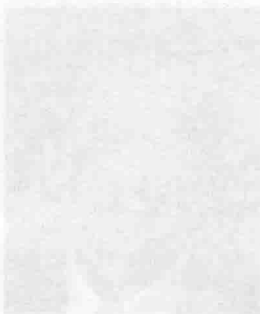
对一些未来机器人的研究将通过采用和改善技术得以增加。未来机器人研究的其他方面将会更具革命性，这些研究的基础会与一些观念以及本书所述的现有技术发展水平相反。

当你在研究本书，寻找一些领域来通过你自己的才华和努力对机器人研究做出贡献的时候，我想提醒你，我相信能力和灵感会使机器人更加有用，更加高产，更容易被接受。我把这些能力按照一个小孩子拥有同等能力时的年龄描述为：

- 一个两岁小孩子的物体认知能力。
- 一个四岁小孩子的语言能力。

- 一个六岁小孩子的灵巧能力。
- 一个八岁小孩子的社会理解能力。

达到上述每一个程度都是非常困难的目标。但是即使是朝向以上任何一个目标的微小进步也将会立即应用在外在世界的机器人上。当你进一步对机器人学有所贡献之时，好好阅读本书并祝你好运。



Robert M. Arp

美国麻省理工学院

Rodney Brooks

美国麻省理工学院，剑桥

2007年10月

前言

机器人在达到人类前沿的同时,积极应对着新兴领域中出现的各种挑战。新一代机器人和人类互动,和人类一起探索、工作,它们将会越来越多地接触人类及其生活。实用机器人的前景令人信服是半个世纪的机器人科学发展的结果,这种发展将机器人作为现代科学学科建立起来。

机器人领域的快速发展推动了这本《机器人手册》的诞生。随着期刊、会议论文集和专著的增加,参与机器人科学技术研究的人,特别是刚进入该领域的人,很难跟得上它大范围发展的脚步。由于机器人技术是多学科交叉的技术,这个任务就显得尤为艰难。

这本手册依据 20 世纪 80、90 年代机器人学的发展成果,这些成果对机器人领域的研究很有参考价值:《机器人策略:规划和控制》(Brady, Hollerbach, Johnson, Lozano-Perez, 和 Mason, MIT 出版社, 1982),《机器人科学》(Brady, MIT 出版社, 1989), 机器人评论 1 和 2 (Khatib, Craig, 和 Lozano-Pérez, MIT 出版社, 1989 和 1992)。随着机器人领域更大的扩展以及向其他学科的日渐延伸,人们对一部包含机器人基本知识和先进发展的综合性参考手册的需求越来越强烈。

这本手册是世界各国多位积极参与机器人研究的作者的努力成果。将各位作者组织成一个目标明确、能力卓越的团队,卓有见地地介绍覆盖机器人各个领域的知识,这是一项艰巨的任务。

这个工程开始于 2005 年 5 月,我们和施普林格欧洲工程主管 Dieter Merkle 及 STAR 的资深编辑 Thomas Ditzinger 一起参加会议期间。一年以前,我们和 Frans Groen 一道发行了“斯普林格先进机器人技术”系列小册子,这个小册子迅速成为及时传播机器人技术研究信息的重要媒介。

正是在这种背景下,我们开始了这个具有挑战性的任务,满腔热情地开始规划开发技术结构和构建作者团队。我们构思了一部由 3 层架构、共 7 篇内容的手册,在机器人领域已经建立了的学术中心、目前正在进行的研发,以及新兴应用中获取该领域多层面的信息。

第一层即第 1 篇是机器人学基础。综合的方法和技术包含在第二层的四篇中,涵盖了机器人的结构、传感和感知,操作和接口,移动和分布式机器人。第三层,包括机器人技术在两个领域先进的应用,分别是:服务机器人和以人为中心的仿人机器人。

为了展开上述各部分,我们设想建立一个编辑团队,来整理作者的稿件,以组成各个章节。一年后我们的七人编辑团队形成了:David Orin, Frank Park, Henrik Christensen, Makoto Kaneko, Raja Chatila, Alex Zelinsky 和 Daniela Rus。有这样一批杰出的学者致力于这个手册的编辑工作,该手册在学术领域一定是高质量、大跨度的。

到 2005 年初,我们的作者超过了 1150 位。为了方便内部以及各个章节的交叉参照,把握手册的编写进度,我们制作了内部网站。第二年,就认真协调了手册的内容。尤其是在 2005 年和 2006 年春季的两个全日制举行的讲习班,大部分作者都出席了。

本手册的每一章都由至少 3 个独立的审稿人员进行审稿,通常都会包括那一章的编辑和两位相关章节的作者,有时候也会由一些该领域的其他专家进行审阅。必须阅读两遍,有时候甚至是三遍。在这个过程中,只要认为有必要,就会加入几位新的作者。本书大部分章节在 2007 年夏季之前已定稿,在 2008 年早春之前书稿已全部完成——那时候,我们收到了 10000 多份电子邮件,汇集了来自 165 位作者的 7 篇总共 64 章 1650 多页的内容,有 950 幅插图,5500 篇参考文献。

我们对作者们的脑力劳动深表谢意,也同样感谢审稿人员和各部分编辑的尽职尽责。感谢“施普林格科学和工程手册”的高级经理 Werner Skolaut,他全力支持稿件的编辑加工工作,将手册的编辑和审稿、出版相结合,很快成为了我们团队很投入的一名队员。感谢 Le-Tex 的工作人员的高度专业化的工作,他们重新排版了所有的文字,重绘和完善了很多图稿,同时在校对材料时及时地和作者互动。

在出版手册这个想法产生六年之后，这本手册终于面世了。除了它对研究人员的指导意义以外，我们也希望这本手册能够吸引一些新的研究者进入机器人领域，激励这个充满魅力的领域几十年的蓬勃发展。每一次努力的完成，总会带来新的令人振奋的挑战。在这种时候我们都会提醒我们的研究员——保持前进的梯度。

Bruno Siciliano

Oussama Khatib

意大利那不勒斯大学、美国斯坦福大学

2008年4月