

[美] 凯文·M. 林奇 (Kevin M. Lynch)
美国西北大学

著

[韩] 朴钟宇 (Frank C. Park)
韩国首尔大学

于靖军 贾振中 译

现代机器人学

机构、规划与控制

MODERN ROBOTICS

MECHANICS, PLANNING, AND CONTROL



机械工业出版社
China Machine Press

机器人学译丛

[美] 凯文·M. 林奇 (Kevin M. Lynch)

美国西北大学

著

[韩] 朴钟宇 (Frank C. Park)

韩国首尔大学

于靖军 贾振中 译

现代机器人学

机构、规划与控制

MODERN
ROBOTICS

MECHANICS, PLANNING, AND CONTROL



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

现代机器人学: 机构、规划与控制 / (美) 凯文·M. 林奇 (Kevin M. Lynch), (韩) 朴钟宇 (Frank C. Park) 著; 于靖军, 贾振中译. —北京: 机械工业出版社, 2019.10
(机器人学译丛)

书名原文: Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control

ISBN 978-7-111-63984-8

I. 现… II. ①凯… ②朴… ③于… ④贾… III. 机器人学 IV. TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 224742 号

本书版权登记号: 图字 01-2019-0729

This is a Simplified-Chinese edition of the following title published by Cambridge University Press:

Kevin M. Lynch, Frank C. Park, Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control (978-1-316-60984-2).

© Kevin M. Lynch and Frank C. Park 2017.

This Simplified-Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Machine Press in 2020.

This Simplified-Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorized export of this simplified Chinese is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and China Machine Press.

本书原版由剑桥大学出版社出版。

本书简体字中文版由剑桥大学出版社与机械工业出版社合作出版。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

此版本仅限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) 销售。

本书系统地介绍了机器人学的基础理论知识, 重心放在机器人机构、规划与控制 3 个方面, 为机器人学的入门教材, 可纳入机器人导论的范畴。

全书以现代数学分支之一——旋量理论为工具和桥梁, 衔接全书知识体系。这既是书名定为现代机器人学的主要依据, 也是本书区别于其他机器人导论类教材的重要特征。

全书总共 13 章。第 1 章为绪论; 第 2 章主要介绍与机器人机构有关的若干基本概念; 第 3 章作为全书的理论基础, 详细讨论如何应用旋量理论构建刚体运动模型; 第 4 ~ 7 章主要讲述有关机器人运动学方面的基础内容, 包括开链机器人正向运动学 (第 4 章)、一阶运动学与静力学 (第 5 章)、逆运动学 (第 6 章) 和闭链机器人运动学 (第 7 章); 第 8 ~ 11 章主要讲述有关机器人动力学、规划与控制方面的基础内容, 包括开链机器人动力学建模 (第 8 章)、轨迹生成 (第 9 章) 与运动规划算法 (第 10 章) 以及经典的机器人控制方法 (第 11 章); 第 12 ~ 13 章主要介绍机器人的两种典型形态——操作手与移动机器人的基础知识与原理。此外, 本书还提供 4 个附录作为正文的补充, 包括书中的重要公式、刚体姿态描述方法、D-H 参数法以及优化算法等。

本书可作为机器人工程专业本科生或研究生教材, 也可作为相关科研人员与工程技术人员的参考用书。

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: 李永泉

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2020 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 25.75

书号: ISBN 978-7-111-63984-8

定价: 139.00 元

客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

投稿热线: (010) 88379604

华章网站: www.hzbook.com

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

21 世纪是机器人的时代。从学术研究到工程应用，机器人引起了学界和工业界越来越多的关注和兴趣。这种日益浓厚的兴趣也来源于机器人学作为一门综合性学科的多学科交叉特征，后者是创新的源泉，给社会发展带来了动力。随之而来的是大量科研文献的产生，如教材、专著和学术论文等。

最近 30 年，国内外先后出版了多本机器人学导论方面的入门级教材，其中不乏经典之作。如 Craig 教授所著的《机器人学导论》已到第 4 版，国内熊有伦院士等所著的《机器人学》也影响了很多学者。不过，这些教材目前多作为相关专业的研究生教科书。

随着近几年“机器人工程”成为新工科热门专业，与之配套的教材建设便成为当务之急，尤其是适合本科中、高年级使用的导论性教材，还极其匮乏。

本书就是一本可以为本科生使用的，系统讲授机器人机构、规划与控制等方面基础知识的教材，也是两位作者历经多年科研与教学实践的呕心之作。Lynch 教授与 Park 教授都是当前机器人学领域享誉世界的资深学者和知名专家，IEEE 机器人学与自动化学会的资深讲师。

类似于大多数机器人学导论教材，本书选取了机器人学中最为经典也最为基础的几个主题（机构学、轨迹生成、运动规划与控制）进行阐述。但译者的感受是，与其他同类教材不尽相同，本书以旋量理论这一现代数学工具作为主线，串连起机器人机构、规划与控制等主题，既能直观地反映机器人本质特性（学生容易学懂），又能抓住学科的前沿，本书书名（现代机器人学）大抵也源于此。此外，本书还具有优秀教材的共同特点：不仅提供了反映最新学科进展的大量研究型题目，还提供了可免费下载的软件和讲课视频。不过，在译者看来，本书最可贵的地方在于对机器人基本概念及经典理论的解读非常细致翔实，而且深入浅出——这点很方便学生自学。

全书总共 13 章，按内容可分为 4 部分。第 1 章为绪论，也是全书的总论。第 2~8 章为机器人机构学基础，其中第 2~6 章介绍机器人运动学基础知识，也是全书的理论基础，而第 7~8 章是对前面内容的补充，涵盖闭链机器人运动学与开链机器人动力学方面的基础知识。第 9~11 章是有关机器人规划与控制方面的概述，侧重算法方面的介绍。第 12、13 两章为应用篇，介绍两个重要的典型机器人分支——机器人操作手与移动机器人的基本原理。

本书可作为机器人工程专业本科生或研究生教材，也可作为相关科研人员与工程技术人员的参考用书。

本书的两位译者均为从事机器人学研究的中青年学者，也都具有编著及翻译机器人方面教材和专著的经验。值得说明的是，本书的翻译工作也是在 Lynch 教授的大力支持下开展并完成的。

本书的出版得到了机械工业出版社的大力支持，翻译工作同时得到了国家自然科学基金会（项目编号：51575017）的大力资助。在此一并表示诚挚的谢意！

在翻译过程中，为了尽量保持原文的风格和科学的严谨性，部分语句可能有直译的痕迹。如有不妥或错误之处，敬请读者和专家批评指正。

读者信箱：hzjsj@hzbook.com。

译者

2019年6月20日

19世纪70年代, Felix Klein 提出了影响深远的 Erlangen 纲领, 该纲领巩固了几何与群论概念之间的关系。Sophus Lie 几乎在同一时间创建了连续(李)群理论; 之后人们提出了基于李代数思想的无限小分析的重要新工具, 它们可用来研究非常广泛的几何问题。即使在今天, 这些想法背后的思想也依然指导着数学中重要领域的发展。当然, 机构不只是几何, 它们需要加速、避免碰撞等, 但它们首先是几何对象, 其中 Klein 和 Lie 概念依旧适用。二维或三维刚体运动群, 正如它们在机器人学中那样, 是 Klein 和 Lie 工作的重要例子。

在数学文献中, 使用指数来表示李群元素, 通常采用两种不同形式。这两种形式被称为第一类指数坐标和第二类指数坐标。对于第一类指数坐标, $X = e^{(A_1x_1 + A_2x_2 \dots)}$ 。对于第二类指数坐标, $X = e^{A_1x_1} e^{A_2x_2} \dots$ 。到目前为止, 第一类指数坐标在运动学研究中几乎没有用处; 而在正交群的欧拉参数化中已出现的特殊情形, 第二类指数坐标已被证明非常适合于由单自由度连杆构成的开链机器人的运动学描述。本书的第4章中对此做了很好的解释。结合 $Pe^AP^{-1} = e^{PAP^{-1}}$ 这一事实, 第二类指数坐标可以非常简洁地表达各种运动学问题。从历史角度来看, 正如本书作者在本书中所做的那样, 使用指数积来表示机器人运动, 可以被看作是对 Klein 和 Lie 等几何学家在150年前所提出概念的实用化证明。

1983年, 我被邀请参加在以色列 Beer Sheva 举办的三年一度的网络数学理论与系统会议, 经过一番思考, 我决定尝试解释一下我从最近的经历中学到了什么。那时, 我在运动学与机器人课程教学方面有一些经验, 其中包括使用运动链的指数积表示。从20世纪60年代起, e^{At} 就在系统理论和信号处理中发挥了核心作用, 所以在这个会议上, 期待人们只要熟悉矩阵指数甚至对它有些了解即可。考虑到这一点, 我自然选择了与 e^{At} 相关的东西来做演讲。虽然我没有理由认为观众会对运动学有兴趣, 但我仍然希望讲述一些有趣的东西, 甚至可能激发更多的发展。结果就是之后前言中提到的论文。

在本书中, Frank 和 Kevin 已经为他们的主题提供了一个奇妙、清晰且耐心的解释。他们将 Klein 和 Lie 在150年前所建立的基础转化为机器人的现代实践, 并且其难度水平适合于本科生、工程师。在对位形空间的基本性质做了优雅的讨论之后, 他们介绍了刚体位形的李群表示, 以及整本书中使用的速度和力的相应表示。在整个机器人基础主题中保持了一致性视角, 包括开链机器人的正向、逆向和微分运动学, 机器人动力学, 轨迹生成, 机器人控制, 以及更专门的主题, 如闭链机器人的运动学、运动规划、机器人操作、轮式移动机器人的规划和控制、移动操作臂的控制。

我相信这本书将成为一代学生和机器人实践者的宝贵资源。

罗杰·布洛克特 (Roger Brockett)

美国马萨诸塞州剑桥市

2016年11月

机器人学涉及把概念想法转变为实际应用。机器人通过某种方式，将抽象目标转化为物理行为：向电机发送能量、监控动作并引导事情向目标前进。每个人都可以执行上述技法，但机器人学如此有趣，它吸引了包括笛卡儿^①在内的很多哲学家和科学家。

这中间的秘密究竟是什么？是源于某些机器人学者头脑里灵光一现的尤里卡^②时刻吗？是几个青少年企业家在车库里灵感迸发而得出了机器人学中的关键概念吗？相反，机器人学并不是一个单一概念，它是科学和工程经过数百年发展而积累出的大量结果。机器人学主要依赖于数学、物理、机械工程、电子工程和计算机科学，它还涉及哲学、心理学、生物学等领域。

机器人学是这些概念的聚集地。机器人学提供动机。再通过机器人学对这些概念进行测试，并引导后续研究。最后，用机器人学进行证明。对机器人的行为进行观察，可为下列猜想提供令人信服的证据：它表明机器可以感知周围的环境，可以制定有意义的目标，并且可以有效地实现这些目标。通过恒温器或（蒸汽机里的）飞球调速器^③可以说明同样的原理，不过很少有人能通过观察恒温器而被说服。但几乎所有人都可以通过观看机器人足球比赛而被说服。

机器人学的核心是运动——受控制的编程运动，这将我们带入现在的语境。本书讲授机器人学中一些最重要的观点：运动的性质，刚体的可行运动，使用运动学与约束来组织运动，实现一般可编程运动的机构，机构的静态和动态特征，以及控制、编程和规划运动时的挑战和方法。本书对上述材料的介绍非常清晰，即使本科生也可以阅读。本书与其他本科生教材的重要区别体现在以下两个方面：

第一，在解决刚体运动方面，本书不仅介绍了经典的几何基础和表征，而且还提出了使用现代矩阵指数积的表达式，以及与李代数的联系。这对学生的回报是双重的：对运动的更深理解，以及更好的实用工具。

第二，本书超越了“将注意力专注于机器人机构”这一传统做法，从而可以更好地解决机器人与周围世界中物体之间的相互作用。当机器人与现实世界接触时，其结果是一个具有相关静力学和动力学的特殊运动机构。该机构包括运动学环路、非驱动关节和非完整约束，所有这些概念都可以通过学习本书而熟悉。

即使本书是学生唯一的一门机器人课程教材，它也能使学生对多种类型的物理系统进行分析、控制和编程。由于对物理作用力学机制的介绍，本书对那些打算继续选修高阶机器人课程或进行原创研究的学生而言，也是一个很好的开始。

马修·T.梅森 (Matthew T. Mason)

美国宾夕法尼亚州匹兹堡市

2016年11月

① 近代法国哲学家、物理学家、数学家，被誉为“近代科学的始祖”。——译者注

② 尤里卡（希腊语是 εὕρηκα，拉丁化为 Eureka，词义是“我发现了”）是一个源自希腊、用以表达发现某件事物真相时的感叹词。该词如此出名，要归功于古希腊学者阿基米德在洗澡时发现浮力的故事。——译者注

③ 恒温器和飞球调速器是典型的控制系统，它们通过传感器探测外界信息，并通过反馈控制实现预定目标。——译者注

2008年在Pasadena举办IEEE ICRA (International Conference on Robotics and Automation)会议期间,我们决定为本科生编写一本机器人学方面的教材。从1996年开始, Frank就拿自己编写的讲义为首尔国立大学的本科生教授机器人运动学的知识;到2008年,这些讲义已演化为本书所涵盖的核心内容。Kevin也一直拿自己的讲义在美国西北大学讲授机器人学导论,其内容来自论文集和教科书。

我们相信,如果对机器人机构、规划与控制等主题进行单独研究,或者将其作为其他更传统主题的一部分,我们将失去一个独特而统一的视角。在2008年的会议上,我们注意到市面上尚缺少符合下述特征的教科书:(1)使用统一的框架去处理这些主题,同时辅以大量练习和配图;(2)最重要的是写出一本适用于本科生层次(差不多也是他们人生中第一本)的机器人课程的新教材,其中涉及的先修知识仅包括大学一年级的物理学、常微分方程、线性代数和一点儿与计算相关的内容。当时我们认为唯一明智的做法就是自己来写这样一本书。(我们当时并不知道这将会用掉我们8年多的时间来完成这一项目!)

写这本书的第二个动因,也是我们认为一个区别于其他机器人学导论类书籍的地方,是强调现代几何方法的使用。通常情况下,机器人最显著的物理特征由几何来描述效果最好。经典旋量理论的实践者对这种几何方法的优点已经认识了相当长的一段时间。但这些知识尚未触及本科生(本书的受众目标群)的层次,原因在于需要他们掌握一套全新的概念(旋量、运动旋量、力旋量、互易性、横贯、共轭等),以及那些经常需要对其进行处理和转换的复杂规则。另一方面,若采用旋量理论的代数运算方法,学生往往会最终沉浸在计算细节中,而失去那些在计算中处于中心地位的简单而优雅的几何解释。

让经典旋量理论惠及更多的人群,这一突破发生在20世纪80年代初。哈佛大学的Roger Brockett基于刚体运动的李群结构向读者展示了如何以数学方式来描述运动链(Brockett, 1983b)。该发现的重要性在于,只是简单地通过线性代数与线性微分方程的基本理论来重构旋量理论。有了“现代旋量理论”这一现代微分几何领域的强大工具,就可以涉及范围更为广泛的机器人问题,其中部分内容将展现在我们这本教材中,其他更优秀、更高级的内容可参考Murray等(1994)的教科书。

正如本书书名所示,这本书涵盖了我们所认为的机器人机构学基础知识,以及与规划和控制有关的基础理论。将本书所有章节全部讲完可能需要两个学期,特别是再加上编程或机器人的实验环节。不过,本书第2~6章的内容是最低限度的必学知识,而且要按顺序来学习。

接下来教师可以有选择地从剩下的章节中选择内容。在首尔国立大学,本科生机器人学导论(M2794.0027)课程安排在一个学期,主要讲授第2~7章,以及第10~12章部分内容。在美国西北大学,机器人操作(ME 449)课程用11周的时间讲完第2~6章和第8章,然后再根据学生和教师的兴趣触及第9~13章的部分内容。讲授有关机械

臂和轮式机器人运动学的课程可以选择第 2~7 章和第 13 章的内容,而要开有关运动学与运动规划的课程还需额外包括第 9 章和第 10 章的内容。关于机器人操作原理的课程将涵盖第 2~6、8 和 12 章,而机器人控制课程将涵盖第 2~6、8、9 和 11 章。如果教师不希望涉及动力学的主题(第 8 章),有关机器人控制的基础知识(第 11 章和第 13 章)即可涵盖对每个执行器的速度控制,而不是力和力矩控制。若课程只关注运动规划,内容可能包括第 2 章和第 3 章,更深入的知识在第 10 章(可能还要补充研究论文或其他参考文献)和第 13 章。

为了帮助教师选择讲授的主题并帮助学生梳理所学到的知识,我们在每章最后都包含“本章小结”,并在附录 A 中对全书中出现的重要概念和公式进行了总结。对于那些对章节内容感兴趣而想深入学习的读者,我们在每章末尾提供了一套相当全面(尽管并非详尽无遗)的“推荐阅读”。每章最后都提供了大量的习题,以便延伸读者对本章所涵盖基本内容的学习。本书中还包含一些较为前沿的学习材料,可用来支持独立的研究型项目。

这本书另一重要组成部分是软件,主要用来强化书中的概念,并使公式更具可操作性。该软件主要由 Kevin 在美国西北大学选择 ME 449 课程的学生开发,并可从 <http://modernrobotics.org> 免费下载。与教科书相配套的视频讲座也可在网站上找到[⊖]。上传视频的初衷是帮助教师实施“翻转课堂”,即学生利用课余时间观看简短的视频课(可根据需求重复观看),课上则集中更多的时间来协作解决问题。通过这种方式,当学生应用这些材料时教授可在现场答疑,并发现他们在理解上的差异。我们相信,教授在这个互动角色中能发挥最大的作用,而不是体现在年复一年、一成不变的讲座中。这种方法在 Kevin 教授的机电一体化课程中得到了很好的体现,具体见 <http://nu32.org>。

视频内容使用 Lightboard (<http://lightboard.info>) 生成,该工具由美国西北大学的 Michael Peshkin 创建而成。他分享了这个方便有效的工具制作此教学视频,对此非常感谢!

我们还发现,作为本书及其软件的补充,V-REP 机器人仿真软件也非常有价值。利用这个仿真软件,学生可以以交互方式来探索机械臂和移动机器人的运动学,并为运动学、动力学及控制结果创建动画轨迹。

虽然本书在介绍有关机器人机构、规划和控制入门基础知识方面充分表达了作者的观点,但还是要对那些已经出版和使用多年的优秀教材表示最诚挚的敬意。其中,我们要特别提到已产生广泛影响力的 Murray 等(1994)、Craig(2004)、Spong 等(2005)、Siciliano 等(2009)、Mason(2001)和 Corke(2017),以及 Latombe(1991)、LaValle(2006)和 Choset 等(2005)关于运动规划的著作。此外,Siciliano 和 Khatib(2016)以及 Kröger 编辑的《机器人学手册》的多媒体扩展(<http://handbookofrobotics.org>),是我们这个领域的一个里程碑,汇聚了数以百计研究人员的前沿研究,涉及与现代机器人相关的各个主题。

同时,我们对写这本书时提供帮助和带给我们灵感的人表示感谢。特别是,感谢我

⊖ 关于本书的教辅资源,只有使用本书作为教材的教师才可以申请,需要的教师可向剑桥大学出版社北京代表处申请,电子邮件 solutions@cambridge.org。——编辑注

们的博士导师 Roger Brockett 和 Matt Mason。Brockett 是我们这本书中所讲机器人几何方法的奠基人。Mason 对机器人操作分析与规划做了开创性贡献，奠定了现代机器人学的基石。我们也感谢很多学生对本书素材的不同版本提供了大量积极的反馈意见，包括选择首尔国立大学 M2794.0027 课程和美国西北大学 ME 449 课程的学生。Frank 特别感谢 Seungghyeon Kim、Keunjun Choi、Jisoo Hong、Jinkyu Kim、Youngsuk Hong、Wooyoung Kim、Cheongjae Jang、Taeyoon Lee、Soocheol Noh、Kyumin Park、Seongjae Jeong、Sukho Yoon、Jaewoon Kwen、Jinhyuk Park、Jihoon Song，以及他在加州大学尔湾分校任教时的学生 Jim Bobrow 和 Scott Ploen。Kevin 要感谢 Matt Elwin、Sherif Mostafa、Nelson Rosa、Jarvis Schultz、Jian Shi、Mikhail Todes、Huan Weng 和 Zack Woodruff。

我们也要感谢剑桥大学出版社的 Susan Parkinson 和 David Tranah，向他们在本书出版过程（编辑、校正、排版等）中的勤勉、敬业精神致敬！

最后，也是最重要的，感谢我们的爱人和家人，包括 Frank 家庭成员中的 Hyunmee、Shiyeon 和 Soonkyu 以及 Kevin 家庭成员中的 Yuko、Erin 和 Patrick，是他们忍受我们的熬夜和不近人情，并一如既往地支持我们，最终促成了这本书的出版。没有爱的支持，这本书根本不会存在。我们将这本书献给他们！

Kevin M. Lynch

美国伊利诺伊州埃文斯顿

Frank C. Park

韩国首尔

2016 年 11 月

声明：两位作者对本书具有同等贡献，作者顺序按字母排列。

作译者简介

Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control

作者简介

凯文·M. 林奇 (Kevin M. Lynch) IEEE 会士, 1989 年在普林斯顿大学获得电子工程学士学位, 1996 年在卡内基-梅隆大学获得机器人学博士学位。自 1997 年开始一直在美国西北大学任教, 还先后在加州理工大学、卡内基-梅隆大学、日本筑波大学和中国东北大学做访问学者。主要研究方向是机器人操作与移动的动力学、运动规划与控制, 自组织多智能体系统, 人机物理交互系统等。他获得过 IEEE 机器人学与自动化学会的早期职业奖、美国西北大学杰出教学奖, 即将担任 IEEE International Conference on Robotics and Automation 主编, 现为 IEEE Robotics and Automation Letters 高级编辑。本书为他的第 3 部教材。

朴钟宇 (Frank C. Park) IEEE 会士, 1985 年在 MIT 获得电子工程学士学位, 1991 年在哈佛大学获得应用数学博士学位, 之后到加州大学尔湾分校任教。从 1995 年开始担任首尔国立大学机械与航空工程系教授。主要研究方向是机器人机构学、规划与控制, 视觉与图像处理, 以及与应用数学相关的领域。他一直担任 IEEE 机器人学与自动化学会杰出讲师, 并担任纽约大学古兰特学院、佐治亚理工学院交互计算系以及香港科技大学机器人研究所兼职教授。现为 IEEE Transactions on Robotics 主编, EDX 课程《机器人机构学与控制 I、II》的开发者。

译者简介

于靖军 教授、博士生导师, 中国机械工程学会高级会员。1995 年和 1998 年在燕山大学分别获得机械工程学士和硕士学位, 2002 年在北京航空航天大学获得机械工程博士学位。从 2004 年开始一直在北京航空航天大学机器人研究所任教。主要研究方向是机器人机构学、柔性机构与智能结构, 以及与运动几何学相关的领域。著有《机械装置的图谱化创新设计》《柔性设计: 柔性机构的分析与综合》, 主编《机械原理》《机器人机构学的数学基础》等教材。

贾振中 助理教授、博士生导师。2005 年和 2007 年在清华大学分别获得机械工程学士和硕士学位, 2014 年在美国密歇根大学获得应用数学硕士、船舶和海洋工程博士学位。2015 ~ 2018 年在美国卡内基-梅隆大学机器人研究院跟随 Matthew T. Mason 教授从事博士后研究。2019 年开始在南方科技大学任教。主要研究方向是机器人、自动化、车辆控制。翻译了《机器人建模和控制》《机器人操作中的力学原理》和《地面车辆原理》等经典教材。

译者序

序一

序二

前言

作译者简介

第 1 章 绪论 1**第 2 章 位形空间** 8

2.1 刚体的自由度 9

2.2 机器人的自由度 10

2.3 位形空间: 拓扑与表达 15

2.4 位形与速度约束 18

2.5 任务空间与工作空间 21

2.6 本章小结 23

2.7 推荐阅读 24

习题 24

第 3 章 刚体运动 34

3.1 平面内的刚体运动 36

3.2 旋转与角速度 40

3.3 刚体运动与运动旋量 53

3.4 力旋量 67

3.5 本章小结 68

3.6 软件 69

3.7 推荐阅读 70

习题 71

第 4 章 正向运动学 84

4.1 指数积公式 86

4.2 通用机器人的描述格式 94

4.3 本章小结 98

4.4 软件 99

4.5 推荐阅读 99

习题 99

第 5 章 一阶运动学与静力学 106

5.1 机器人雅可比 110

5.2 开链机器人的静力学 118

5.3 奇异性分析 119

5.4 可操作度 122

5.5 本章小结 124

5.6 软件 125

5.7 推荐阅读 125

习题 125

第 6 章 逆运动学 134

6.1 逆运动学的解析求解 135

6.2 逆运动学的数值求解 138

6.3 逆向速度运动学 142

6.4 有关闭环的一点说明 143

6.5 本章小结 144

6.6 软件 144

6.7 推荐阅读 144

习题 145

第 7 章 闭链运动学 150

7.1 正、逆运动学 151

7.2 微分运动学 154

7.3 奇异 157

7.4 本章小结 160

7.5 推荐阅读 160

习题 161

第 8 章 开链动力学 164

8.1 拉格朗日方程 165

8.2 单刚体动力学 172

8.3 牛顿-欧拉逆动力学 178

8.4 封闭形式的动力学方程 181

8.5 开链机器人的正向动力学	183	11.5 力控制	276
8.6 任务空间中的动力学	184	11.6 运动-力混合控制	278
8.7 受约束动力学	185	11.7 阻抗控制	281
8.8 URDF 中的机器人动力学	187	11.8 底层的关节力/力矩控制	283
8.9 驱动、传动和摩擦	187	11.9 其他议题	285
8.10 本章小结	194	11.10 本章小结	286
8.11 软件	197	11.11 软件	287
8.12 推荐阅读	199	11.12 推荐阅读	288
习题	199	习题	288
第 9 章 轨迹生成	202	第 12 章 抓握和操作	294
9.1 定义	202	12.1 接触运动学	295
9.2 点到点的轨迹	202	12.2 接触力和摩擦力	309
9.3 多项式中间点的轨迹	208	12.3 操作	316
9.4 时间最优的时间标度	209	12.4 本章小结	321
9.5 本章小结	215	12.5 推荐阅读	321
9.6 软件	216	习题	322
9.7 推荐阅读	217	第 13 章 轮式移动机器人	328
习题	217	13.1 轮式移动机器人的类型	328
第 10 章 运动规划	221	13.2 全向轮式移动机器人	329
10.1 运动规划概述	221	13.3 非完整轮式移动机器人	333
10.2 基础知识	224	13.4 里程计测距	350
10.3 完整路径规划器	231	13.5 移动操作	352
10.4 网格方法	232	13.6 本章小结	354
10.5 采样方法	239	13.7 推荐阅读	355
10.6 虚拟势场	244	习题	356
10.7 非线性优化	248	附录 A 重要公式汇总	363
10.8 平滑	249	附录 B 转动的其他表示方法	369
10.9 本章小结	250	附录 C D-H 参数法	376
10.10 推荐阅读	251	附录 D 优化和拉格朗日乘子	383
习题	253	参考文献	385
第 11 章 机器人控制	255	索引	394
11.1 控制系统概述	255		
11.2 误差动力学	256		
11.3 速度输入的运动控制	261		
11.4 力或力矩输入的运动控制	267		

绪 论

作为一门学科，机器人学虽然相对年轻些，但目标高远，志在创造出能像人那样思考与行动的机器。这样的目标自然会让我们首先审视人类自身。例如，探究我们的身体为什么如此设计，我们的四肢如何协调动作，我们又如何学习和完成复杂的任务。“机器人学中基本的问题最终都是与我们自身密切相关的基本问题”这一感念是机器人学如此令人着迷的一个重要原因。

本书主要关注的是**机器人机构**（robot mechanism）、规划与控制问题。机械臂就是大家熟悉的一个例子，轮式机器人也是，而且机械臂可以安装在轮式机器人上。基本意义上，机构是由被称为**杆件 / 构件**（link）的刚体通过**关节**（joint）连接而成，其相邻杆之间能够相对运动。关节的**驱动**（actuation）主要通过电机来实现，保证机器人能够按预期的方式运动和施加载荷。

机器人机构中，各个杆件之间可以串接而成，诸如大家熟悉的图 1.1a 所示的开链机械手。当然，机器人机构中，杆件之间也可以形成闭链形式，如图 1.1b 所示的 Stewart-Gough 平台。开链情况下，所有关节都是驱动副；而闭链情况下，只有一部分关节是驱动副。

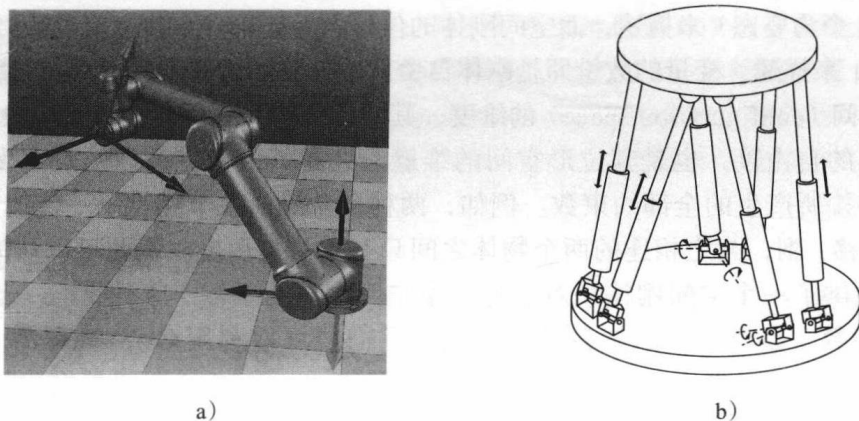


图 1.1 开链形式与闭链形式的机器人机构。a) 在软件 V-REP 中构建的开链式工业机械手 (Rohmer 等, 2013); b) Stewart-Gough 平台: 由基座 (或定平台) 通过腿 (或支链) 连接至动平台, 再通过另一条腿回到基座, 由此组成的多闭链结构

让我们进一步审视机器人机构以外的技术。杆件在驱动器作用下运动，典型的是电驱动（如直流或交流电机、步进电机、形状记忆合金等），也可以由气动或液压缸驱动。旋转电机理想情况下是轻质的，以较低的旋转速度（如在几百 RPM 的范围内）产生较大的力或力矩。由于目前大多数可用的电机都在低力矩下工作，转速高达数千 RPM，这种情况下，需要安装相应的减速器和力矩放大装置。可用的传动和传导装置有齿

1 轮、柔索、皮带、滑轮、链条和链轮等。这些减速装置应该具有零或较低的滑动和回差 (backlash, 可定义为减速装置在输入处没有运动的情况下, 其输出端的旋转量), 同时也安装有制动器 (也称刹车), 刹车这一名词在工业机器人中十分常见, 以保证发生意外时能使机器人快速停止动作, 并保持在静止状态。

机器人上还配备了传感器来测量关节处的运动。对于转动关节和移动关节, 通常用编码器、电位计或旋转变压器测量位移, 有时使用转速计测量速度; 机器人关节处或末端的力和力矩可以使用各种力传感器 (或力矩传感器) 来测量; 其他传感器可帮助目标定位或机器人自身定位, 如只有视觉的照相机、测量像素的颜色 (RGB) 和深度 (D) 的 RGB-D 相机、激光测距仪以及各种类型的声学传感器。

机器人学研究中, 通常也包括人工智能和计算机感知技术。不过, 无论哪种机器人, 共有的一个本质特征是它们都在物理世界中运动。因此, 作为本科生和研究生有关机器人学的第一门课程, 本书侧重介绍机器人机构、规划与控制。

下面简单介绍一下全书其余各章的主要内容。

第2章 位形空间

2 如上所述, 机器人在最基本的层面上是由刚体通过关节连接而成, 关节由驱动器驱动。而实际中的连接可能不完全是刚性的, 且关节可能受弹性、间隙、摩擦和迟滞等因素影响。本书中, 我们将忽略这些影响, 而且在大多数情况下, 假设所有构件都是刚性的。

有了这个假设, 第2章着重介绍如何表示一个机器人系统的位形 (configuration), 它是描述机器人中各点位置的指标。由于机器人由通过关节连接的多个刚体组成, 我们的研究便从理解刚体的位形开始。我们看到, 平面刚体的位形可以用3个独立变量 (2个为位置, 1个为姿态) 来描述, 而空间刚体的位形则需要用6个独立变量 (3个为位置, 3个为姿态) 来描述。变量的数量即是刚体自由度 (degree of freedom, dof) 数, 这也是刚体位形空间 (configuration space) 的维度, 其中位形空间为所有位形组成的空间。

机器人的自由度, 也是其位形空间的维度, 是指其中所有构件的自由度之和减去由于关节连接所产生的全部约束数。例如, 两种最常见的关节类型——转动 (旋转) 副和移动 (平移) 副, 与之相连的两个物体之间只有一个自由度。因此可以认为, 转动副或移动副提供了一个空间刚体相对于另一个空间刚体运动的5维约束。一旦知道了构件的自由度数, 以及各关节提供的约束数, 我们便可以利用 Grübler 公式 (Grübler's formula) 计算出该机器人机构的自由度。对于开链 (open-chain) 机器人, 如图 1.1a 所示的工业机械手, 由于每个关节都是独立驱动的, 因此自由度就是所有关节自由度的总和。对于如图 1.1b 所示的 Stewart-Gough 平台的闭链 (closed chain) 机器人, Grübler 公式是一种计算其自由度下界的便捷方法。这是因为与开链机器人不同, 闭链机器人中的一些关节不是驱动副。

除了计算自由度, 令人感兴趣的其他有关位形空间的概念还包括位形空间的拓扑 (topology, 或“形状”) 及其表达 (representation)。同一维度的两种位形空间可以具有不同的形状, 就像一个二维平面在形状上不同于二维球表面一样。当需要确定具体 (位形) 空间表达时, 这些差异就变得非常重要。例如, 单位球表面, 可以使用最小数量的独立坐标来表示, 如纬度和经度, 或者可以用满足约束 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 的3个参数 ($x, y,$

z) 表示。前者是一种**显式参数化** (explicit parametrization) 表达, 而后者则是对该空间的一种**隐式参数化** (implicit parametrization) 表达。虽然每种表达都有其各自的优点, 但在本书中, 我们将采用隐式参数化形式来描述机器人的位形空间。

机械臂通常配备有机械手或手爪, 更通用的说法是**末端执行器** (end-effector), 它是与周围世界的物体进行交互的载体。为了完成诸如物体拾取等任务, 我们更关心末端执行器相对参考基座的位形, 而非整个手臂的位形。我们将末端执行器的位姿空间称为**任务空间** (task space)。注意, 机器人位形空间与任务空间之间并非一一映射的关系。机器人的**工作空间** (workspace) 则可以定义为末端执行器所能达到的任务空间的子集。

第 3 章 刚体运动

本章主要讨论如何通过数学描述三维物理空间中刚体的运动。一种方便的做法是将参考坐标系附着在刚体上, 并建立起一种当刚体运动时可以定量描述参考坐标系的位置和姿态的方法。首先, 我们介绍用 3×3 矩阵描述坐标系的姿态, 该矩阵称为**旋转矩阵** (rotation matrix)。

旋转矩阵可通过 3 个独立的坐标实现参数化。其中, 对于旋转矩阵最自然也最直观的表达形式是基于**指数坐标** (exponential coordinate) 的表达。也就是说, 给定一个旋转矩阵 R , 总会存在某一单位向量 $\hat{\omega} \in \mathbb{R}^3$ 和角度 $\theta \in [0, \pi)$, 使得通过将初始单位坐标系 (与初始单位矩阵相连的坐标系) 通过绕 $\hat{\omega}$ 旋转一定的角度 θ 而得到该旋转矩阵。指数坐标定义为 $\omega = \hat{\omega}\theta \in \mathbb{R}^3$, 这是一个三参数表示。还有其他几种大家熟悉的姿态表示方法, 如欧拉角、Cayley-Rodrigues 参数和单位四元数等, 这些都在附录 B 中有介绍。

关注用指数表达转动的另一原因在于, 它直接导致了刚体运动的指数描述, 而这可以看作是对古典旋量理论的现代几何解释。为了尽可能地保留其中的经典概念, 我们会详细介绍旋量理论的线性代数结构, 包括集线速度与角速度于一体的物理量, 即**六维的运动旋量** (twist)——它也称为**空间速度** (spatial velocity), 以及与之类似的一个物理量, 即同时表示三维力和三维力矩的**六维力旋量** (wrench)——它也称为**空间广义力** (spatial force)。

第 4 章 正向运动学

对于一个开链机器人而言, 末端执行器的位置和姿态可通过关节位置唯一确定出来。其正向运动学问题就是当给定各关节位置, 求出附着在末端执行器上的物体坐标系的位姿。本章中, 我们将重点介绍用于描述开链机器人正向运动学的**指数积** (Product of Exponential, PoE) 公式。顾名思义, PoE 公式直接来自刚体运动的指数坐标表示。除了可对关节轴运动旋量的指数坐标进行直观且形象的描述之外, PoE 公式还有其他优点, 如无须建立连杆坐标系 (只有基坐标系和末端坐标系是必需的, 而且它们可以任意选择)。

在附录 C 中, 我们还介绍了用 Denavit-Hartenberg (D-H) 参数描述正向运动学。D-H 模型用到的参数更少些, 但需要按照某种指定的规则将局部坐标系附着到每个构件上, 显然是件很麻烦的事情。有关 D-H 参数与 PoE 公式的转换关系也可从附录 C 中找到。

第 5 章 一阶运动学与静力学

一阶运动学又称速度运动学, 主要目标是建立起关节线速度和角速度与末端执行器线速度和角速度之间的映射关系。一阶运动学的核心是正向运动学的**雅可比** (Jacobian)。

对关节广义速度向量左乘一个与位形相关的矩阵，即可得到任一位形下的末端运动旋量。**运动学奇异** (kinematic singularity) 是指末端执行器失去了某一方向或更多方向运动能力的位形，正好对应的是雅可比不满秩的情况。**可操作度椭球** (manipulability ellipsoid) 作为一种性能指标，主要用来形象化地描述机器人沿不同方向的运动能力，也可以从雅可比中导出。

雅可比也是机器人静力学分析的关键。在保持静平衡的前提条件下，给定末端执行器的预期力旋量，雅可比可用于确定需要在各关节处施加的力和力矩。

雅可比的定义还取决于末端执行器速度的表示形式，其中首选形式是将其表示成一个六维运动旋量。因此，我们也简单介绍一下其他形式及其对应的雅可比。

第6章 逆运动学

逆运动学问题是指机器人到达预期的末端位形时，如何确定相对应的一组关节位置。对于开链机器人，逆运动学通常比正向运动学复杂：我们知道，当给定一组关节位置，末端位姿通常是唯一确定的；而对于某一特定的末端位姿，对应的关节位置可能存在多组解，或根本没有解。

本章中，我们首先研究一个常用的六自由度开链机器人，其逆运动学具有闭式解析解。对于更一般的开链结构，则介绍一种基于迭代的数值算法，该方法充分利用了雅可比矩阵的逆来进行求解。如果该开链机器人**运动冗余** (kinematically redundant)，意味着它的关节数大于任务空间的维数，这种情况下需采用雅可比矩阵的伪逆形式。

第7章 闭链运动学

虽然开链机器人的正向运动学解往往是唯一的，但闭链机器人的正向运动学往往呈现多解性，甚至有时其逆运动学解也是如此。此外，由于闭链机器人同时具有驱动关节和被动关节，在对其进行运动学奇异性分析时也会呈现出开链机器人中不曾遇到的问题。在本章，我们将研究闭链机器人运动学分析中的一些基本概念和相关工具。具体从实例分析入手，研究对象为平面五杆机构和 Stewart-Gough 平台，分析结果可以扩展到更一般性的闭链机器人运动学分析。

第8章 开链动力学

动力学研究的是当有力和力矩作用时的运动情况。在本章中，我们将研究开链机器人的动力学。与机器人正向运动学和逆运动学的概念类似，**正向动力学** (forward dynamics) 问题是给定一组关节力和力矩，确定输出的关节加速度；**逆动力学** (inverse dynamics) 问题则是给定关节加速度，确定所需输入的力矩和力。将力和力矩与机器人的运动相关联，可得到一组用二阶常微分方程来表示的动力学方程。

可以使用以下两种方法中的任一种来推导开链机器人的动力学方程。拉格朗日法中，首先选择一组坐标，即经典动力学文献中的广义坐标，作为位形空间参数。机器人中所有构件势能与动能的总和表示成这些广义坐标的函数及其时间导数的形式，将其代入**欧拉-拉格朗日方程** (Euler-Lagrange equation)，然后得到一组二阶微分动力学方程式，它们是所选位形空间参数的函数。

牛顿-欧拉 (Newton-Euler) 法则建立在 $f=ma$ 的广义化基础上，即给定作用其上的力旋量，确定刚体加速度方程。给定关节变量及其时间导数，用牛顿-欧拉法求解逆动