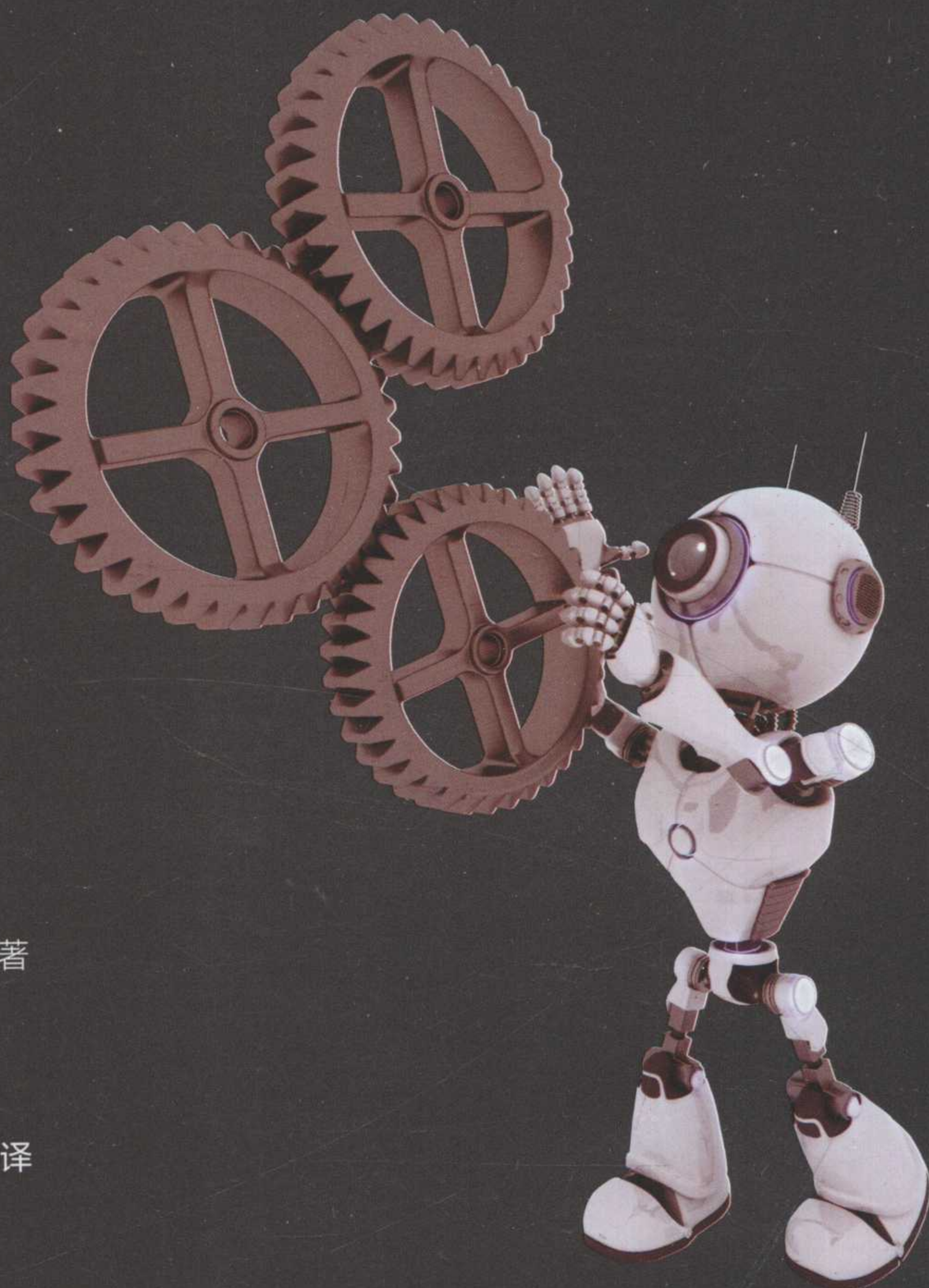




[美] 马修 T. 梅森 (Matthew T. Mason) 著
卡内基梅隆大学

贾振中
卡内基梅隆大学

译

万伟伟
日本大阪大学/日本产业技术综合研究所

机器人操作中的 力学原理

MECHANICS
OF
ROBOTIC
MANIPULATION



机械工业出版社
China Machine Press

机器人学译丛

[美] 马修 T. 梅森 (Matthew T. Mason) 著
卡内基梅隆大学

贾振中
卡内基梅隆大学

万伟伟
日本大阪大学/日本产业技术综合研究所

机器人操作中的 力学原理

MECHANICS
OF
ROBOTIC
MANIPULATION



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人操作中的力学原理 / (美) 马修·T. 梅森 (Matthew T. Mason) 著; 贾振中, 万伟伟译. —北京: 机械工业出版社, 2017.11

(机器人学译丛)

书名原文: Mechanics of Robotic Manipulation

ISBN 978-7-111-58461-2

I. 机… II. ① 马… ② 贾… ③ 万… III. 机器人 - 操作系统 - 力学 - 研究 IV. ① TP242 ② 03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 284048 号

本书版权登记号: 图字 01-2016-2385

Matthew T. Mason: Mechanics of Robotic Manipulation (ISBN 978-0-262-13396-8).

Original English language edition copyright © 2001 by Massachusetts Institute of Technology.

Simplified Chinese Translation Copyright © 2018 by China Machine Press.

Simplified Chinese translation rights arranged with MIT Press through Bardon-Chinese Media Agency.

No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system, without permission, in writing, from the publisher.

All rights reserved.

本书中文简体字版由 MIT Press 通过 Bardon-Chinese Media Agency 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。

本书是学习机器人操作的基础教材, 旨在介绍机器人操作过程中的力学原理和规划算法。在力学原理部分, 本书将从一个全新视角来审视经典力学, 包括运动学、静力学和动力学, 并使用新的方法 (如多种图形化方法) 来解决在其他书籍中没有出现过的一些特殊问题。在规划算法部分, 本书将使用基于状态空间的方法, 同时考虑如何处理以下两个难题: 使用经典力学得到的高维连续状态空间并不适合用于搜索算法; 由于机器人的感知和运动控制等系统以及周围环境因素而带来的不确定性。

本书可作为有一定机器人运动学、动力学和控制基础的本科生与研究生教材。

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: 张锡鹏

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 13.75

书号: ISBN 978-7-111-58461-2

定价: 59.00 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

近年来,随着科学技术的进步,机器人技术的研究在全球范围发展得如火如荼。2007年,比尔·盖茨曾在《科学美国人》上撰文指出机器人技术将会成为继信息技术之后的下一个热点。以美国为例:谷歌和优步的无人驾驶汽车、波士顿动力的足型机器人、NASA的火星车和机器人航天员等,无时无刻不在吸引着全球媒体的目光。欧洲、日本和中国等也出台了各自的机器人研究计划和路线图。例如:在德国提出的“工业4.0”和中国提出的“中国制造2025”计划中,机器人均作为核心技术受到了前所未有的重视。“中国智造”需要我们有一流的机器人技术和研究人才!

机器人是融合了数学、物理、机械、电子和计算机等科学的一门综合性学科。机器人涉及的研究范围非常广泛:从太空中的航天机械臂到深海大洋里的无人潜艇,从汽车生产线上的喷涂装配到医院里的外科手术机器人等。机器人在为其专门构建的结构化工厂环境中非常有用,但现有的机器人对于在不确定的、非结构化的混乱环境中执行复杂的操作任务却无能为力。要解决诸如此类的问题,有赖于我们对机器人操作的研究。机器人操作是机器人研究的终极前沿!

本书是学习机器人操作的基础教材,旨在介绍机器人操作过程中的力学原理和规划算法。在力学原理部分,我们将从一个全新视角来审视经典力学,包括运动学、静力学和动力学,并使用新的方法(如多种图形化方法)来解决在其他书籍中没有出现过的一些特殊问题。在规划算法部分,我们将使用基于状态空间的方法,同时考虑如何处理以下两个难题:使用经典力学得到的高维连续状态空间并不适合用于搜索算法;由于机器人的感知和运动控制等系统以及周围环境因素而带来的不确定性。

机器人的核心在于运动——机器人使用受控的可编程运动,通过抓取和投掷等多种手段把物体从初始位置移动到指定目标。操作的真正问题在于如何移动物体,而不是如何移动机械臂。本书与以往大多数机器人书籍最大的不同之处在于:侧重于操作过程本身而非机械臂。这种对过程本身而非对设备的侧重是一种更为基本的方法策略,它使我们的结果可以应用于更广泛的设备而不仅限于机械臂。需要指出,构建具有类人操作能力的机器人将会十分复杂,特别是建造出能与人相媲美的机器人可能会比历史上人类建造的任何东西都更有挑战!本书并不就该问题提出解决方案或方案大纲(这些有赖于机器人操作领域的持续发展和进步),相反,本书试图勾勒出一条科学探索的具体线路,从而使我们有希望解决机器人操作中的某些核心问题。

本书作者 Matthew T. Mason (马修 T. 梅森) 教授是机器人领域的世界知名专家,他曾担任卡内基梅隆大学机器人研究所(全球最大的机器人研究机构)的负责人。他在机

机器人操作领域有 40 多年的研究经验，培养了大量人才。本书译者均有幸跟随梅森教授从事博士后研究工作，他的言传身教使我们获益匪浅，在这里我们对梅森教授表示最诚挚的感谢！本书内容为卡内基梅隆大学机器人培养方向的核心课程之一（Mechanics of Manipulation），适用于研究生和高年级本科生。梅森教授在个人网页上（<http://www.cs.cmu.edu/~mason/>）提供了与本书配套的电子教案。

万伟伟（日本大阪大学、日本产业技术综合研究所）完成了本书第 8～10 章的初译稿，贾振中（卡内基梅隆大学）完成了本书其余部分及全书的审校和整理工作。本书对于专业词汇的翻译，主要借鉴了戴建生的《旋量代数与李群、李代数》和《机构学与机器人学的几何基础与旋量代数》、徐卫良和钱瑞明翻译的《机器人操作的数学导论》以及熊永家等人翻译的《装配自动化与产品设计》，在这里表示感谢！我们根据原书的勘误表对中译本进行了修正，并根据梅森教授的电子教案等加入了译者注来帮助读者加深理解。由于译者水平所限，书中翻译难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

译者

2017 年 9 月 30 日

本书是为所有被操作的神秘魅力而吸引的读者所写。从其广义形式来看，“操作”是指我们周边世界里的各种物理变化：移动物体，使用焊接、胶合或紧固等方式来连接两个或多个物体，使用切割、研磨或弯曲等方式改变物体的形状以及其他各种过程。然而，与绝大部分涉及操作研究的书刊一样，本书仅解决上述各种操作中的第一种方式：移动物体。即使在这一限制条件下，我们仍有许多不同的过程需要考虑：抓取 (grasping)、携带 (carrying)、推动 (pushing)、丢放 (dropping)、投掷 (throwing)、击打 (striking) 以及其他过程。

同样，我们仅解决机器人操作中的问题，而忽略人类或其他动物的操作（除了从中获取某些灵感以及偶尔的哲学思考之外）。但是“机器人”操作不应被限制得过于狭隘——或许“机器操作”是一个更好的表述。我们将涵盖任何形式的机器操作，从门挡（门塞）到自动化工厂。

本书借鉴了两个领域的内容：经典力学和经典规划。本书大部分内容致力于经典力学及其在操作过程中的应用。为了深入理解操作过程，我们需要从一个不同寻常的视角来审视经典力学，这将驱使我们解决一些在其他书籍中没有解决过的特殊问题。

本书的第二部分内容是经典规划。我们将使用基于状态空间的方法，即利用可能动作行为的显式模型使规划算法能够搜索各种序列，从而获得一个令人满意的解答。这方面有两个难点亟待解决。第一，经典力学的结果通常对应于连续状态空间，而非更适合于搜索算法的离散状态空间。第二，机器人通常无法获取完美的信息，并且机器人也许无法获知任务的实际状态。有时，规划算法需要能够处理机器人所预测的任务状态和实际状态之间的差异。这两个因素——高维的连续状态空间以及不确定性均增加了操作规划的复杂度。

本书与以往大多数书籍的不同之处在于侧重于操作（过程）本身而非机械臂。这种对过程本身而非对设备的侧重，是一种更为基本的方法策略，所以其结果可以适用于更为广泛的设备，而不仅仅是机器人手臂。操作的真正问题在于如何移动物体，而不是如何移动手臂。对于操作这个问题，人类的解决方案是尽可能使用周围可以利用的资源，比如使用适宜的平面以便对齐物体，敲击或晃动不方便抓取的物体，使用廉价的物体作为工具来进行捅或推等操作。当人类使用自己的双手进行操作时，最容易观察到这种能力，不过这种能力在人类编程控制机器人手臂时也体现得相当明显。旨在解释操作的任何可信尝试都必须能够处理各种不同的操作技法。

在机器人中，任何理论在达到某种成熟程度之后，都应该经得起检验。如果一个理论是完备的、建设性的，我们可以结合此理论建造一个机器人，而后通过相关实验来验证该理论的正确性以及有效范围。从原则上讲，结合经典力学和经典规划来建造机器人是个相对简单的任务。我们所建造的机器人系统中包含任务的计算模型，其中包括场景中对象的形状以及其他相关物理参数。采用经典力学，机器人还能够预测它想要执行的各种行为可能造成的对应结果。如果给机器人指定一些目标，它可以模拟各种动作序列，从中搜索出一个规划以实现指定目标。

这样的机器人是极端理性主义的——它严格遵循牛顿（亚里士多德或其他）力学，并且基于第一性原理来推导出能够满足其目标的动作模式。它是理论和实验之间近似完美的结合。为了解决理论问题，我们可以按照力学模型和搜索算法来设计机器人，从而得到一个可以接受理论验证的正式实体。我们可以根据机器人的表现证明与之相关的理论，我们也有规则的显式假说来评价其正确性。为了解决实验问题，我们可以将设计思路赋予实践，从而得到一个可通过实验检测的物理系统。当理论和实验相对应时，我们可以证明理论的有效性及其在实施中的高保真度。当理论和实验无法对应时，这提示我们需要对理论或实施方案进行合理的修正。

或许更重要的是此种方法在建立有效的建设性理论方面所具有的价值。有时候，“应该可行”的理论和“实际有效”的理论之间存在着巨大差异。如何减少这种差异是推进该领域前进以解决重要问题的一个重要动力。

我们应该试图建立什么样的理论呢？会不会有一个简洁的解决方案——能够使我们建造具有类人行为能力的机器人的一些简单想法？相关的工程实践表明此法并不可行，没人期望一个简洁的理论就可以解决如何建造汽车或火箭这样复杂的问题。只有依赖大量的科学和工程方面的成果，我们才能够建造十分复杂的人造物体。而可以与人类相提并论的机器人，它将比人们先前建造的任何东西都更为复杂。本书并不想提出解决方案，亦不想提出解决方案的大纲。相反，本书试图勾勒出一条科学探究的具体线路，从而使我们有希望解决机器人操作中的某些核心问题。

本书起初是作为“操作的力学原理”（Mechanics of Manipulation）这一研究生课程的课堂笔记使用的，该课程是卡内基梅隆大学机器人博士项目培养计划的一部分。选修本课程的学生来自不同的背景，但他们大部分都有工程、科学或数学方向的本科学位。偶尔会有高年级的本科生选修本课程，大多数学生表现还不错。在选修本课之前，大多数但并非全部学生已经修过一门有关机器人运动学、动力学和控制的课程。学期项目是本课程的一个重要组成部分，每个学生（有时组成小队）都将选择和探索一个操作问题，可选题目包括用卡片建造房屋、挥鞭子、扔飞盘、建造具有最大悬垂的多米诺塔牌、弹响指、扔陀螺、玩悠悠球（yoyo）、求解球在杯中（ball-in-cup）游戏、不同形式的杂耍等。一个典型的学期项目可能会分析这些问题的简化版本，制作一个简单的规划系统，或者侧重于操作过程中某些定义明确的方面。在《科学美国人》（Scientific American）

和《美国物理杂志》(American Journal of Physics)上或许能找到与上述问题相关的论文。某些学期项目解决更像样的操作问题,这些问题可以在《机器人研究国际期刊》(International Journal of Robotics Research)、《机器人及自动化国际会议》(Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation)或者其他文献中找到参考。

为了照顾那些使用本书进行教学或者解决问题的学者,我在个人网页(<http://www.cs.cmu.edu/~mason>)上给出了本书中的插图,或许还有用于教学的附加资料或者习题解答。

我十分感谢我的导师和同事: Berthold Horn、Tomas Lozano-Pérez、Marc Raibert、Mike Erdmann、Randy Brost、Yu Wang、Ken Goldberg、Alan Christiansen、Kevin Lynch、Srinivas Akella、Wes Huang、Garth Zeglin、Devin Balkcom、Siddh Srinivasa、John Hollerbach、Russ Taylor、Ken Salisbury、Dan Koditschek、Bruce Donald、Illah Nourbakhsh、Ben Brown、Tom Mitchell、Dinesh Pai、Al Rizzi、Takeo Kanade 以及 Allen Newell (人工智能先驱,图灵奖获得者)。

一些研究同仁阅读了本书草稿、使用本书教学或是通过其他方式表达了协助和鼓励,包括 Anil Rao、Howard Moraff、Carl Harris、Charlie Smith、Ian Walker、Mike McCarthy、Zexiang Li、Richard Voyles、Yan-Bin Jia、Terry Fong、Kristie Seymore、Elisha Sacks 以及选修 16-741 课程《操作的力学原理》的学生们。Jean Harpley 和 Mark Moll 帮助我准备了最终的手稿,Sean McBride 绘制了本书第 1 章的插图。

感谢 Mary、Timm 和 Kate 的鼓励和付出。

感谢自然科学基金的资助(IRI-9114208、IRI-9318496、IIS-9900322 和 IIS-0082339)。

感谢我所借鉴和参考的每一位研究者。某些时候,他们的贡献远比文献和索引中所罗列的要大得多。

目 录

Mechanics of Robotic Manipulation

译者序

前言

第 1 章 操作 1

- 1.1 实例 1: 人工操作 1
- 1.2 实例 2: 一种自动装配系统 3
- 1.3 操作中亟待解决的问题 4
- 1.4 操作技术的分类 6
- 1.5 文献注释 7
- 习题 8

第 2 章 运动学 9

- 2.1 基础知识 9
- 2.2 平面运动学 12
- 2.3 球面运动学 16
- 2.4 空间运动学 18
- 2.5 运动学约束 20
 - 2.5.1 非完整约束 23
 - 2.5.2 根据速度中心对平面约束进行分析 27
- 2.6 运动机构 29
- 2.7 文献注释 31
- 习题 31

第 3 章 运动学表示 34

- 3.1 空间旋转的表示 34
 - 3.1.1 轴线—角度 35
 - 3.1.2 旋转矩阵 36
 - 3.1.3 欧拉角 40
 - 3.1.4 四元数 42
- 3.2 空间位移的表示 49
 - 3.2.1 齐次坐标 50
 - 3.2.2 旋量坐标 51

- 3.3 运动学约束 58
- 3.4 文献注释 61
- 习题 61

第 4 章 运动学操作 65

- 4.1 路径规划 65
 - 4.1.1 实际中的抓取和放置 66
 - 4.1.2 位形空间变换 67
 - 4.1.3 路径规划——离散 C 空间内的启发式搜索 70
- 4.2 非完整系统的路径规划 71
- 4.3 接触的运动学模型 72
- 4.4 文献注释 74
- 习题 74

第 5 章 刚体静力学 78

- 5.1 刚体上的作用力 78
- 5.2 多面体凸锥 83
- 5.3 接触力旋量与力旋量锥 85
- 5.4 速度旋量空间中的锥 87
- 5.5 有向平面 88
- 5.6 瞬心和 Reuleaux 方法 91
- 5.7 力线和力矩标记 92
- 5.8 对偶力 94
- 5.9 总结 97
- 5.10 文献注释 97
- 习题 98

第 6 章 摩擦 101

- 6.1 库仑定律 101
- 6.2 单自由度问题 103
- 6.3 平面内的单点接触问题 105
- 6.4 摩擦锥的图形表示 106

6.5 静平衡问题	106	8.5 刚体动力学	153
6.6 平面滑动	108	8.6 角惯量矩阵	156
6.6.1 平面滑动的力和力矩	109	8.7 自由旋转体的运动	161
6.6.2 极限曲面	111	8.8 平面内的单点接触问题	163
6.7 文献注释	115	8.8.1 摩擦的不一致性	165
习题	115	8.8.2 摩擦的不确定性	167
第 7 章 准静态操作	118	8.9 平面动力学的图形方法	168
7.1 抓取和夹具固持	118	8.10 平面内的多点接触问题	170
7.2 推	121	8.11 文献注释	172
7.3 稳定的推进	125	习题	172
7.3.1 Peshkin 界限	127	第 9 章 碰撞	174
7.3.2 “平分线”界限	128	9.1 质点碰撞	174
7.3.3 “竖直带”界限	128	9.1.1 摩擦：一个不好的模型	176
7.3.4 计算稳定的推进动作	129	9.1.2 一个更好的模型	177
7.3.5 规划稳定的推进轨迹	131	9.2 刚体碰撞	179
7.4 零件定向	132	9.3 文献注释	184
7.4.1 半径函数和推函数	133	习题	184
7.4.2 旋转对称：定向到对称	135	第 10 章 动态操作	185
7.4.3 不确定性的建模	135	10.1 准动态操作	185
7.4.4 规划算法	136	10.2 短暂动态操作	188
7.5 装配	138	10.3 完全动态操作	189
7.6 文献注释	142	10.4 文献注释	191
习题	143	习题	193
第 8 章 动力学	148	附录 无限远点	194
8.1 牛顿定律	148	参考文献	197
8.2 三维空间中的一个质点	149	索引	201
8.3 力矩和动量矩 / 角动量	150		
8.4 质点系的动力学	151		

操 作

操作是指动手重新布置周围环境的过程。操作牵扯到很多方面。操作是一门艺术，因为我们每个人都可以实践，即使是在对操作过程没有任何系统性了解或缺乏基本了解的前提下。操作也是一门工程学科，这是因为存在一些系统性的工具使我们可以用机器人操作来解决各种问题。最后，操作也是一门科学，因为这个过程能够培养我们的好奇心，从而利用科学手段来进行探索。

操作可以通过多种不同的方式来完成。在本章的起始部分，我们将考虑两个操作系统的实例。据此，我们建立本书的研究主题——由一系列亟待探讨和解释的现象所组成的集合。本章的剩余部分，根据其底层力学机制的不同，我们对多样化的操作技术进行分类。在本章结尾处，我们会给出本书的提纲概要。

1.1 实例 1：人工操作

我们所举的第一个例子，其形式虽然类似于思维实验，但它源于我们日常生活中所熟悉的场景，如果感兴趣的话，读者可以亲自尝试图 1-1 中所示的过程。我们考虑扑克牌游戏中发牌者的一系列操作过程：把扑克牌集中起来，整理成整齐的一摞，然后洗牌和发牌，收手并进行整理。尽管任何试图对上述过程的精确分析最终都会变得十分困难，不过浅显的分析有时也会发人深省。发牌者首先将扑克牌围成一堆，然后通过挤压，同时将扑克牌堆在桌面上磕碰，直至形成整齐的一摞。最常见的洗牌方式是将这摞扑克牌分为两半，再把它们掰弯，然后将这两半摞扑克牌按顺序释放使得它们能够相互交错，最后通过挤压叩击，直至重新形成整齐的一摞扑克牌。

现在，发牌者的左手被塑造成一种机构，该机构依次递出已被隔离好的扑克牌，供右手抓取和抛掷。发牌者在抛掷扑克牌时，可以施加一定的旋转以稳定扑克牌的姿态。

现在，所有的玩家抓取并整理他们手中的扑克牌。他们通过抓取扑克牌并将其重新插入其他牌中，来排列和布置手中的扑克牌。再次挤压扑克牌使其变得整齐，然后使用有控制的滑移手法小心地将扑克牌展开。

上述过程中有几个特点耐人寻味。对于单张扑克牌的处理被保持在最低限度，除了在发牌时，有些扑克牌根本没有被当作个体而独立处理过。其次，没有任何一张扑克牌

是以单独固定在胳膊和手上的方式，从一个静止位置移动到另一个位置。相反，在该过程中，发牌者使用了难以通过简单语言来描述的技巧，包括打扫（sweeping）、叩击（tapping）、挤压（squeezing）、抛掷（throwing）、有控制的滑移（controlled slip）以及其他一些技术。



图 1-1 熟练人工操作的一个例子：收集、校直、洗牌和发放扑克牌

上述过程需要玩家拥有相当程度的技能。小孩子要生疏很多，而且学习该技术需要花费时间进行大量练习。

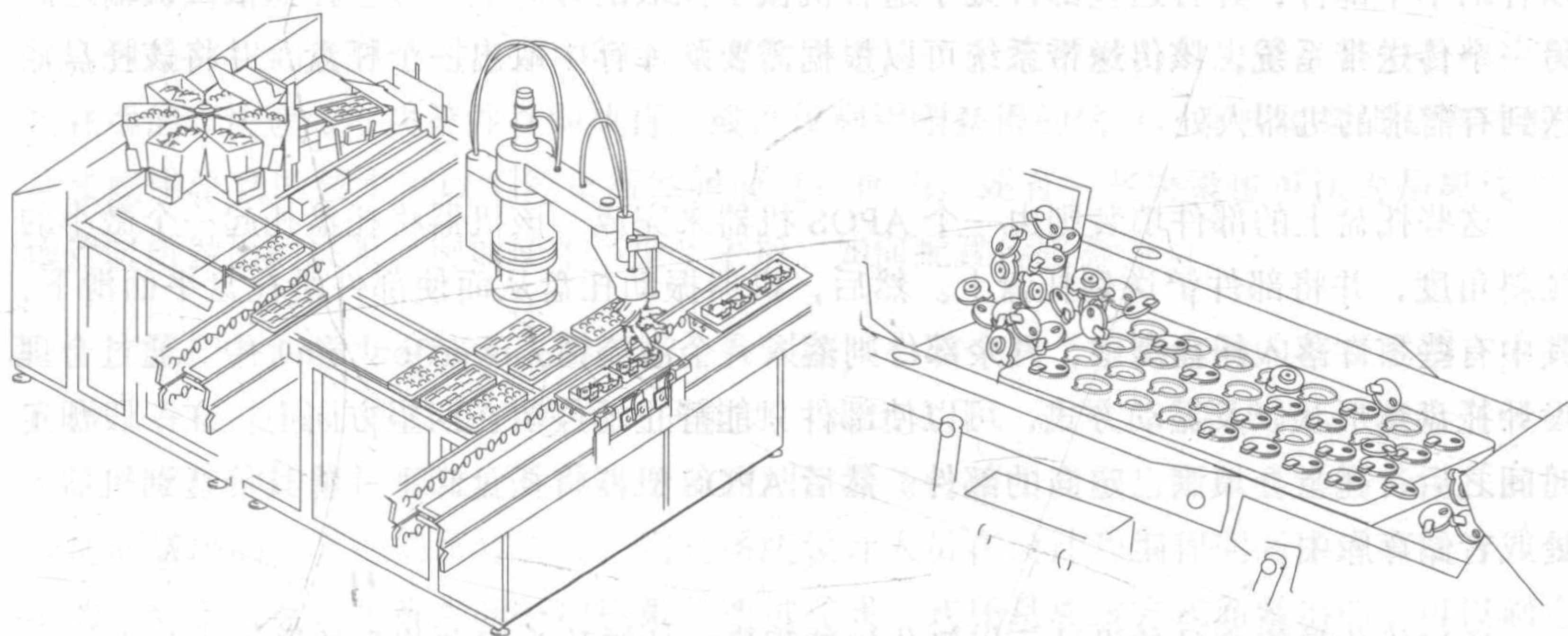
上述技术对扑克牌和桌子的特性较为敏感。新牌因为太滑太硬而难以处理，脏的扑克牌却又太粘，此外，扑克牌的尺寸和硬度要高度一致。对于采用普通手写纸进行人工切割而制成的扑克牌，在发牌时需要使用十分不同的手法来进行处理。

从某些方面来讲，发牌操作中具有很强的传感器驱动，比如当转动一叠扑克牌中还没对齐的牌或是聚拢散落在桌面上的扑克牌时。不过，有时候传感器发挥的作用则很小。例如，在最后整理这摞牌时，发牌者不需要使用视觉来辨认还没被对齐的扑克牌。相反，通过挤压和对着桌面叩击即可完成对扑克牌的整理，此时，玩家并不需要（使用视觉来）辨别它们。

上述过程中有两件事情尤其值得关注：一个是操作中所体现的效率和技能，另一个则是适应性。虽然装置中的变化可能会极大地影响效率，但人类能够适应这些变换，退而使用更加保守的技术。

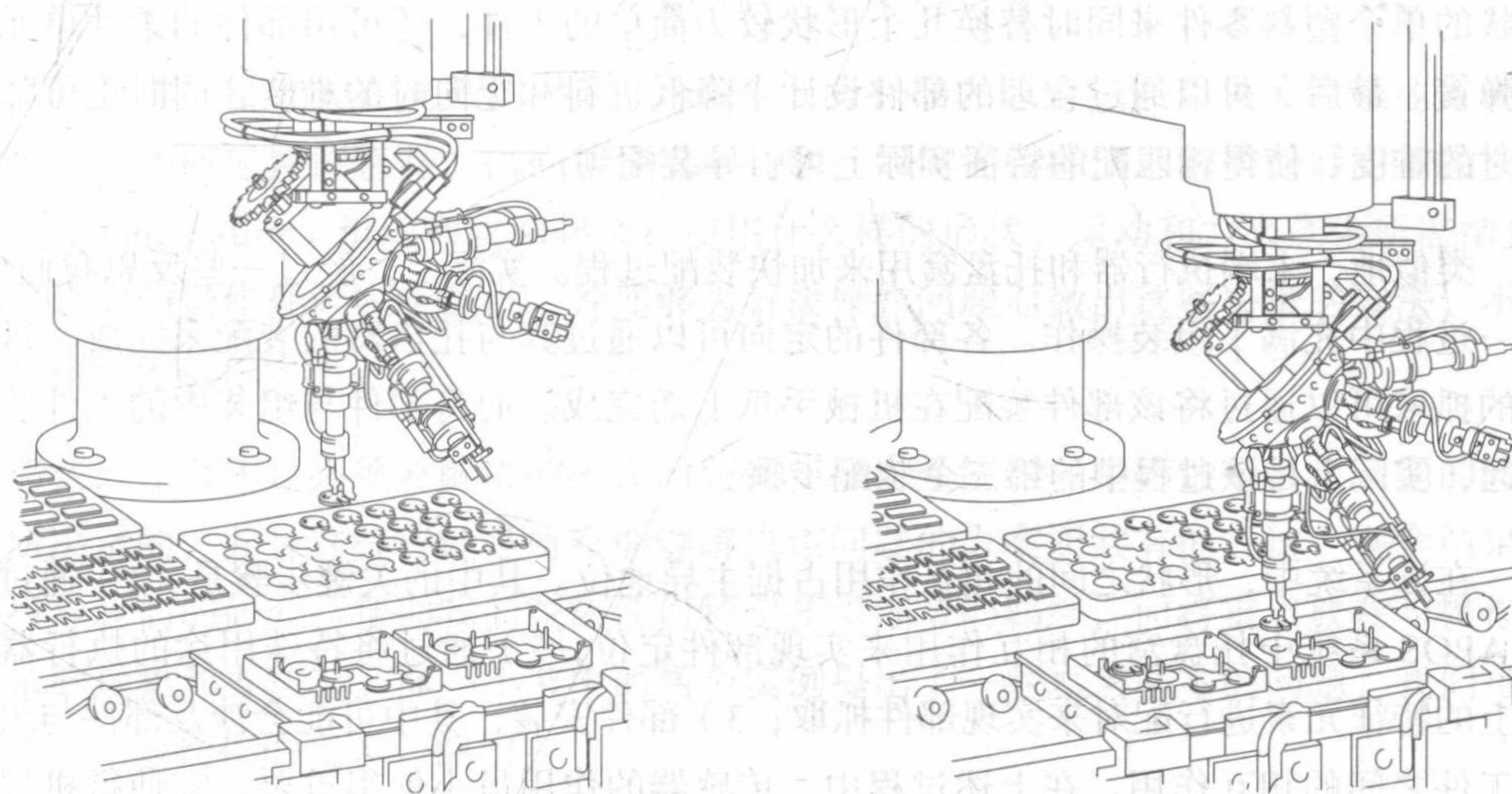
1.2 实例 2：一种自动装配系统

我们举的第二个例子是如图 1-2 中所示的自动装配线，其中集成了工业机器人臂以及各种用来运输、定向以及给机器人供给零件的设备。虽然我们以索尼的 SMART 系统作为例子，但是该系统中的基本元素与其他很多工业系统是相通的。



a) 系统布局，其中有工作传送带、零件托盘、带有转塔刀架的机器人、托盘传送带和 APOS 零件定向系统

b) APOS 系统向托盘里添加已排列好的零件



c) 拾取零件

d) 将零件装配到产品中

图 1-2 索尼的 SMART 系统

索尼的 SMART 系统需要解决的问题是：组装小型的消费电子机械产品，如磁带录音机或照相机。装配在一个工作夹具上进行。该夹具用于夹持设备，并将其从一个工作站准确地运送到下一个工作站。在每个工作站，机器人会进行一系列相应的操作。为了

尽量减少工作站的数量，每个机器人装备有多达 6 个不同的末端执行器，所有这些执行器都被安装在一个转塔刀架（也称转塔头，turret head）上。因此，通过需求来选择合适的末端执行器，每个机器人便可以执行 6 个或更多不同步骤的操作。

各个部件通过托盘上料供给机器人。每个托盘都有窝（nest）阵列，其中的每个窝可以容纳单个部件，并且这些部件处于适合机械手抓取的方向上。这些托盘依次被输送到另一个传送带系统，该传送带系统可以根据需要从库存中取出一个托盘，并将该托盘输送到有需求的机器人处。

这些托盘上的部件填装则由一个 APOS 机器来完成。该机器将托盘托起一个微小的倾斜角度，并将部件铲送到托盘上。然后，机器振动托盘从而使部件沿托盘平面滑下，其中有些零件落入托盘窝中，其余部件则落入一个溢流桶（overflow bin）中。通过合理设计托盘窝形状以及振动方式，可以使部件只能静止地停留在期望方向上。在一段预定时间之后，托盘会填满已定向的部件。然后 APOS 机器将托盘卸下并将其传送到机器人处或者储存库中。

通过优化最终产品的设计可以简化组装程序，这被称为面向装配的设计（design for assembly）。具体来讲，产品被设计成如下形式：每次只组装一个部件，并且几乎所有的装配动作都在垂直方向上进行。其次，部件被设计得易为处理。例如，可以用具有复杂形状的单件塑料零件来同时替换几个形状较为简单的零件，还可用部件的柔性单元来替代弹簧。最后，可以通过合理的部件设计来降低进料和定向时的难度，同时也可降低装配时的难度，使得相匹配的特征实际上可引导装配到位。

类似地，末端执行器和托盘窝用来加快装配过程。实际上，经过一些反思我们可知：这一过程中充满了组装操作。各部件的定向可以通过其与托盘窝的装配来完成。每个部件的抓取可以通过将该部件装配在机械手爪上而完成。而将部件与组装中的工件装配在一起，实际上是该过程中的第三个装配步骤。

在该系统中，形状之间的相互作用占据主导地位。其中的关键步骤是：1）通过部件与 APOS 系统中托盘窝的相互作用来实现部件定位；2）通过将特殊用途的执行器与部件上的特征元素进行配对来实现部件抓取；3）部件安装，其中可能会涉及部件与组装中的工件之间的相互作用。在上述过程中，传感器的作用虽小但很重要，它使得机器人可以检测到无效抓取（grasp failure），并通过继续抓取托盘中的下一个部件来继续该装配过程。上述过程中，机械臂工作在最简单的状态，它被当作用来完成拾取及放置（pick and place）操作的一个装置。

1.3 操作中亟待解决的问题

人工扑克牌游戏和自动化工厂这两个例子之间存在着显著差异。人类具有成千上万

个传感器和执行器，还有将它们协调起来用于处理当前任务的智能。单个机器人只有很少的传感器和执行器，并且缺乏在没有人工帮助的前提下将这些传感器和执行器用于处理新任务所需的智能。即使我们将工厂（拥有成百上千的传感器和执行器）作为一个整体来考虑，人们仍然是相对于单个任务或密切相关的一组任务，来对这些传感器和执行器进行配置和编程。

但是，我们可以透过这些差异，而专注于这两个系统所做出的决策。其中有些决策是在线的：快速做出决策并立即执行，或许仅利用刚获得的信息。有些决策则是离线的：从实践中学到的技术可以不经重新发明而直接使用。还有一些决策也可认为是离线的：设计时所做出的决策，例如使用多少个手指、如何配置传感器等。

当我们将注意力专注于决策时，会看到前一小节中两个系统之间的主要区别：人类在做出在线决策方面具有极为强大的能力。相比之下，机器人系统则很少做出在线决策。其动作中的唯一变化要么是由于检测到错误条件而引发的，要么是根据特定托盘的到达而做出的。其他的所有决策，则是系统设计人员在设计和编程期间通过离线方式做出的。对于人类，很难判断一项决策是通过在线方式还是离线方式而做出的。可以确定的是：相比于工厂系统，人类会做出更多的在线决策。但是人类系统仍涉及很多离线决策，这一点毋庸置疑。至少，良好技能的养成需要长期实践，其中包括长时间的决策训练。当然，人类系统中更基本的方面则是随物种演化而来的。

5

尽管人类与机器人在决策的时间（time）方面有很大区别，但在决策的其他方面则非常相似：如何配置传感器、执行器和机械结构；如何将传感信息和执行器的神经支配（actuator innervation）组织和协调起来；使用什么样的形状、运动和力来产生所需结果。我们要研究的操作理论应该提供一种能够为解决操作问题而做出这些决策的方法，不论决策是离线还是在线的。

那么，什么才是必须要解决的操作问题呢？操作系统的一些特性是由该问题的固有特性所决定的，并且这些特性是所有能够解决该问题的方案所共有的。这一观察结果可用于指导我们的研究，帮助我们脱离任何特定技术细节的羁绊，而将重点放在与操作相关的基础现象和方法上。前一小节中的两个实例提出了一些相当基本的问题，我们可将它们作为一般操作的代表。例如：

- 证明一个物体或一组物体处于稳定位形。例如，当机器人在放入下一个零件时，组装的各个阶段必须是稳定的。
- 证明一个物体并非处于稳态位形。我们可以通过寻找一组手指运动，它能够使得所有不满足放置要求的扑克牌都是不稳定的，从而设计出一种对齐扑克牌的策略。类似地，APOS 系统托盘窝的设计应该具有同样的性质，即所有不满足放置要求的部件都是不稳定的。

- 给定一个固定物体、一个移动物体以及所施加的力，证明该移动物体可以局部收敛到相对于该固定物体的某个特定位置。例如，这种方法可用于分析手爪以可预测的方式抓取特定物体的能力。
- 给定一个固定物体和一个移动物体，设计一种振动方式，使得移动物体能够全局收敛到相对于该固定物体的某个特定位置。
- 构建一种投掷动作来准确地递送一个物体，并尽量减少碰撞后物体的能量。这可能是生成投掷扑克牌动作同时满足牌面朝上这一额外约束的一种好方法。

6

此类问题处于力学 (mechanics) 和规划 (planning) 之间，并且可以表述为分析型 (analysis) 问题或综合型 (synthesis) 问题^①。当把这类问题作为分析形式表述时，我们得到一个力学问题。不幸的是，对于许多诸如此类的问题，我们还没有一个通用的解决方案，特别是当用于解答的信息受到限制的时候。当把这类问题作为综合形式表述时，我们得到一个规划问题。这样做使我们可以做出一些选择来限制问题的范围，从而有可能得出解决方案。

我们将“机器人如何将目标转化为行动”这一问题作为压倒一切的问题。为了稍微缩小范围，我们假定机器人要完成一些既定目标，这通常需要重新布置其周围的物体。我们不必担心更高层次的问题，例如机器人如何将更高层次的目标（如利润）转为低层次的目标（如抓取扳手）。

1.4 操作技术的分类

我们将专注于一种被称为分析型操作 (analytical manipulation) 的方法。为了决定要做什么，机器人需要使用任务力学 (task mechanics) 的分析模型。在尝试某动作之前，机器人可以使用该模型来预测行动的后果。我们没有根据物理结构或者计算架构来对机器人进行分类，而是根据它们的任务力学模型来对机器人进行分类。因此，我们可以得到下述分类：牛顿型 (Newtonian) 机器人，它使用牛顿定律来推导得出其运动；亚里士多德型 (Aristotelian) 机器人，该型机器人认为物体只有在受到某些物体的推动时才能够运动。我们还可以得出一个经验型 (empirical) 机器人，这种机器人使用基于观察而建立的模型，而非基于公理系统的模型。

我们在这里将要探讨的所有机器人都是牛顿型机器人的变种，虽然其中的一些也可看作是亚里士多德型机器人。所有这些机器人都是依据经典力学中我们熟悉的技术而做出决策。经典力学通常按照下述顺序而讲述：起初是运动学，然后是静力学，最后是动

① 分析和综合是哲学家康德引入的逻辑思维的两种方式，指在认识中把整体分解为部分和把部分重新结合为整体的过程和方法。分析是把事物分解为各个部分、侧面、属性，分别加以研究。综合是把事物各个部分、侧面、属性按内在联系有机地统一为整体，以掌握事物的本质和规律。——译者注

力学。我们可以使用同样的顺序来建立一个关于操作技术的分层结构 (hierarchy):

- 运动学操作 (kinematic manipulation)。可以单独由运动学而推出的一个动作或动作序列。例如, 如果任务规范是末端执行器的特定运动, 那么机械臂结构的运动可以通过运动学而得到确定。
- 静态操作 (static manipulation)。可以根据静力学和运动学而推出的一个动作或动作序列。例如, 为了将一个物体放置在桌子上, 有必要确定该物体一个稳定的静止姿态 (静力学), 同时有必要确定将该物体移动到目标位置所需的运动 (运动学)。
- 准静态操作 (quasistatic manipulation)。在该操作任务中, 与惯性力相比, 摩擦力和冲击力通常占据主导地位。忽略惯性力而进行的分析, 通常被称为准静力学分析 (quasistatic analysis, 也称准静态分析)。例如, 通过挤压而整理一副扑克牌时, 作用在扑克牌上的惯性力可以忽略。
- 动态操作 (dynamic manipulation)。最后, 当惯性力成为操作过程中的一个重要组成部分时, 我们便有了动态操作。例如, 投掷扑克牌使其合理着地且不翻转, 这取决于纸牌的惯性性质。

7

在使用这种分类方法时需要留心。这种分类方法指的是动作是如何导出的, 而不是指动作本身。而且在大多数情况下, 我们并不知道动作是如何导出的, 这是因为推导过程是在人脑中进行的。这种分类方法实际上比较主观, 它取决于观察者自己采用的操作模型。

我们主要用这种分类方法来组织本书。我们可以按照从运动学到动力学这一传统进展思路, 抱着理解操作过程这一目的来探索其中的力学原理。本书的起始部分为运动学 (第2章和第3章), 紧接着是运动学操作。然后是静力学章节、摩擦力章节和紧随其后的准静态操作章节。最后是动力学章节、刚体碰撞章节和动态操作章节。

1.5 文献注释

要想对操作以及人手的作用有深入理解, 阅读文献 (Bronowski, 1976) 是必不可少的。此外, 我们强烈推荐 (Napier, 1993) 和 (Wilson, 1998) 这两篇文献。

尽管人类的操作技能看起来是最强的, 但是许多动物也都拥有给人留下深刻印象的操作技能。(Savage-Rumbaugh 和 Lewin, 1994) 给出了猿和人类之间的一些有趣对比。(Collias 和 Collias, 1984) 给出了关于鸟类筑巢的一个非常有意义的描述。

文献 (Fujimori, 1990) 描述了索尼的 SMART 系统。操作的分类由 Kevin Lynch 和 Matt Mason (本书作者) 于 1993 年首先提出。对于自动装配的更广泛的处理可参见文献 (Boothroyd, 1992)。