



马克 W. 斯庞 (Mark W. Spong)
[美] 赛斯·哈钦森 (Seth Hutchinson) 著
M. 维德雅萨加 (M. Vidyasagar)

贾振中 等译

机器人建模和控制

ROBOT MODELING AND CONTROL



机器人建模和控制

ROBOT MODELING AND CONTROL

马克 W. 斯庞 (Mark W. Spong)
[美] 赛斯·哈钦森 (Seth Hutchinson) 著
M. 维德雅萨加 (M. Vidyasagar)

贾振中 徐静 付成龙 伊强 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人建模和控制 / (美) 马克 W. 斯庞 (Mark W. Spong) 等著; 贾振中等译. —北京: 机械工业出版社, 2016.7

(机器人学译丛)

书名原文: Robot Modeling and Control

ISBN 978-7-111-54275-9

I. 机… II. ①马… ②贾… III. 机器人—研究 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 152786 号

本书版权登记号: 图字: 01-2016-0765

Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Robot Modeling and Control, ISBN 978-0-471-64990-8, by Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由约翰-威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

本书基于 Spong 和 Vidyasagar 两位教授所著的十分成功的经典教材《Robot Dynamics and Control》(Wiley, 1989), 对现代机器人的操作和控制进行了全面和精辟的论述, 所介绍的初级和高级内容不仅易读, 而且在数学推导上十分严谨。

本书适合机器人技术方面的多学季或单学期课程使用。前 6 章适合面向具有初步线性控制系统背景学生的初级/高级机器人技术介绍性课程使用, 后 6 章适合机器人技术及控制方向的研究生阅读。



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: 和 静

责任校对: 董纪丽

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

版 次: 2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm × 260mm 1/16

印 张: 17.25

书 号: ISBN 978-7-111-54275-9

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

近年来，随着科学技术的发展与进步，机器人技术及其研究在全球范围内发展得如火如荼。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信息技术之后的下一个发展热点和方向。以美国为例，谷歌公司的无人驾驶车辆、多足及仿人机器人，亚马逊公司的仓储自动导引车，以及美国太空总署的好奇号火星车等都在吸引着全球媒体的目光。欧洲、日本和中国等也纷纷出台了各自的机器人研究计划以及路线图。例如，在德国提出的“工业4.0”和中国的“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。

2015年，中国工业机器人的年装机数量已经跃居世界第一，并且还在以令人惊叹的速度继续增长！可惜的是，由于历史等多方面原因，中国与欧洲、美国、日本等发达国家和地区在机器人领域还有相当明显的差距，特别是很少有中国企业或科研单位能够掌握其中的核心技术。“中国智造”需要中国有第一流的机器人技术和研究人才！中国的机器人技术要与世界先进水平接轨，人才培养是重中之重，而人才培养的关键之一在于要使用第一流的教材！根据译者在中美两国多年的学习和研究经验，能够使用与世界一流大学同样的优秀教材，对学生今后的长期职业发展有着莫大益处。

机器人是融合了机械、电子以及计算机等技术的综合学科。从国际上来看，一本优秀教材通常需要该领域第一流专家横跨多个学科的广泛涉猎以及多达数十年的深厚积累。本书由机器人领域顶级专家 Mark Spong、Seth Hutchinson 和 M. Vidyasagar 合著，是一本难得的将机器人控制和力学原理都讲得很深入和系统的书籍。本书结构严谨、语言精练，特别是以双连杆机器人为例将本书所涵盖的内容融会贯通，包括运动学、雅可比矩阵、路径与轨迹规划、动力学、多变量控制及几何控制、力控制、计算机视觉及基于视觉的控制等。另外，本书附有大量习题，可以帮助读者深入理解和掌握所学知识。因而，本书被国外很多名校选作机器人方向的教材，包括伊利诺伊大学、约翰霍普金斯大学、密歇根大学、卡内基-梅隆大学、华盛顿大学、西北大学等。

本书由卡内基-梅隆大学机器人研究所(全球领先的机器人研究机构)的贾振中主持翻译，清华大学的徐静和付成龙、印第安纳大学-普度大学印第安纳波利斯分校(IUPUI)的伊强协助翻译了本书的部分章节，并参与了校正工作。我们根据原书勘误表对本书进行了修正。由于译者水平所限，书中难免有疏漏和错误，欢迎读者批评指正。

译者

2016年3月30日

自从 20 世纪 80 年代早期机器人机械臂被“吹捧”为自动化制造的终极解决方案以来，机器人领域发生了众多令人兴奋的变化。早期的预测是，如果必要的话未来整个工厂仅需要极少数人工操作者。有些人甚至预言连电力照明都是多余的，因为机器人会“很高兴地”在黑暗环境里完成工作。这些预言在今天看来有些可笑，尽管如此，寻找为什么此类预言没有实现的原因发人深省。第一个原因可简述如下：机器人很难代替或者在某种程度上等同于人类。人类十分擅长于自己的工作。自动化制造并不像安装一个机器人并将工人从产品装配线上移走这么简单，它涉及复杂的系统集成问题。通常，整个工作单元需要重新设计，包括对装配过程本身的分析、重新设计零件和设备、工作单元布局、传感器开发、控制系统设计、软件验证以及大量的相互连接问题。结果是：除去如点焊、喷涂和码垛等简单任务，（使用机器人）所节省的人工成本并不能抵消上述开发成本。

因此，机器人技术在 20 世纪 80 年代晚期不再受人欢迎。现在，我们正在见证机器人技术的一次复兴，不仅在制造领域，还包括很多其他领域，比如医疗机器人技术、搜索和救援、娱乐和服务机器人技术。近年来，我们看到机器人探测火星表面、定位沉船、搜索地雷以及寻找倒塌建筑物下的灾民。机器人技术被认为是更广泛的机电一体化 (mechatronics) 领域的一部分。机电一体化被定义为机械、电子、控制和计算机科学的有机结合。机器人是终极的机电一体化系统。

本书起初是作为由 John Wiley & Sons 公司于 1989 年出版的《Robot Dynamics and Control》(由 M. W. Spong 和 M. Vidyasagar 所著) 的第 2 版进行编写的。但在编写初期，我们发现由于第 1 版距今的时间跨度和本领域在此期间内的发展，本版最终将会是一本全新的书籍。我们在保留第 1 版的基本原理和优秀部分的基础上，增添了很多新内容。本书所涉及的运动规划、计算机视觉和视觉伺服控制都是全新的。我们重写了关于控制的章节，以反映 20 世纪 80 年末期到 90 年代初期机器人控制领域的逐步成熟。本书的运动学和动力学基础部分与第 1 版基本一致，但从教学方面对其进行了扩展和提高。

本书结构

本书分为 12 章，前 6 章是基础，后 6 章涉及高等内容。这些章节从概念上可以分为三组。在导论章节后，第 2 章到第 5 章涉及机器人运动的几何问题。第 6 章到第 10 章涉及动力学和控制。最后，第 11 和 12 章讨论了计算机视觉以及如何将其添加到机器人控制系统中。

下面是对各章更为详细的叙述。

第 1 章介绍机器人技术的历史和术语，并就最通用的机器人设计和应用进行了讨论。

第 2 章介绍刚性运动的数学知识，以及旋转、平移和齐次变换。

第 3 章介绍应用 Denavit-Hartenberg 方法对运动学进行正向求解，以及应用几何方法对运动学进行逆向求解，该几何方法十分适用于带有球形手腕的机械臂。

第 4 章篇幅较长，涉及速度运动学和机械臂的雅可比矩阵。几何雅可比矩阵由叉积形式推导得出。我们还介绍了分析型雅可比矩阵，它用于后续的任务空间控制。该章还讨论

了可操作性的概念。

第5章介绍运动规划和轨迹生成。该章介绍了有关运动规划和避障的几种最为流行的方法，包括人工势场法、随机算法以及概率路线图方法。我们把轨迹生成问题本质上当作多项式样条插补问题来介绍。对于关节空间内的插补，我们推导了基于三次和五次多项式的轨迹生成以及梯形速度轨迹。

第6章介绍独立关节的控制。我们用基于PD、PID和状态空间的线性控制来实现线性驱动器和传动系统动力学的跟踪和抗干扰等问题。为研究对时变参考轨迹的跟踪问题，我们介绍了前馈控制的概念。

第7章详细介绍了机器人动力学。基于第一性原理，本书推导了欧拉-拉格朗日方程，并且详细讨论了其结构特性。本书还介绍了机器人动力学的递推牛顿-欧拉形式。

第8章讨论多变量控制。该章综述了20世纪80年代末和90年代初有关机器人控制的大多数研究，介绍了最通用的鲁棒和自适应控制算法的简单推导，为读者进一步阅读有关机器人控制的大量文献打好基础。

第9章解决力控制问题，讨论了阻抗控制和混合控制。混合阻抗控制方法是其他书中很少涉及的，它适用于控制阻抗，并同时运动对力和进行调控。

第10章介绍了几何非线性控制。相比其他章节，该章内容要高深很多，适合研究生阶段的非线性控制和机器人学课程使用。尽管如此，该章内容在形式上可读性好，也适合高年级本科生阅读。我们推导和证明了单输入/单输出系统的局部反馈线性化的充要条件，并将其用于柔性关节控制问题。我们也简要讨论了周氏定理在非完整约束控制系统问题中的应用。

第11章介绍计算机视觉。我们主要介绍适用于机器人应用方面的计算机视觉，例如阈值、图像分割和相机标定。

第12章讨论视觉伺服控制问题，也就是利用安装在机器人上或工作空间内的相机的反馈来控制机器人。

本书适合机器人技术方面的多学季或单学期课程使用。前6章适合面向具有初步线性控制系统背景学生的初级/高级机器人技术介绍性课程使用。相比前一版，本版的一个主要变化是我们将独立关节控制置于动力学章节之前。独立关节控制融入了很多线性驱动器和传动系统动力学的控制，因此该部分的多数内容可以在没有欧拉-拉格朗日动力学等知识的情况下教授。

下面我们列出本书作为教材的两种课程大纲：

课程 1：机器人技术概论

水平：大三/大四本科生

对于单学季课程(10周)：

第1章：导论

第2章：刚性运动和齐次变换

第3章：正运动学和逆运动学

第4章：速度运动学——雅可比矩阵

对于单学期课程(16周)，增加：

第5章：路径和轨迹规划

第6章：独立关节控制

第 11 章：计算机视觉

课程 2：机器人动力学及控制

水平：大四本科生/研究生

对于单学季课程(10 周)：

第 1~5 章：运动学快速回顾(选择章节)

第 6 章：独立关节控制

第 7 章：动力学

第 8 章：多变量控制

第 9 章：力控制

对于单学期课程(16 周)，增加：

第 10 章：几何非线性控制

第 11 章：计算机视觉

第 12 章：基于视觉的控制

我们已经在伊利诺伊大学教授过上述两种单学期课程。选修第一种课程的学生来自计算机科学、电子及计算机工程、通用工程以及机械工程系。正因如此，我们尽可能使这些章节能够被多种工程学科的学生所接受。第二种课程的学生大多是机器人技术及控制方向的研究生，因此，这些章节写得较为高深。

致谢

特别感谢 Peter Hokayem 和 Daniel Herring，他们的工作十分出色，制作了本书中的大多数插图。此外，Benjamin Sapp 提供了第 11 章中的大部分插图，Nick Gans 提供了第 12 章中的大量插图。感谢 Francois Chaumette 对如何表述第 12 章中的交互作用矩阵的交流讨论，以及 Martin Corless 对第 8 章中鲁棒控制的交流讨论。

十分感谢审阅者十分详细且周到的校阅，特别是 Brad Bishop、Kevin Lynch、Matt Mason、Eric Westervelt 以及 Ning Xi。

感谢我们的学生 Nikhil Chopra、Chris Graesser、James Davidson、Nick Gans、Jon Holm、Silvia Mastellone、Adrian Lee、Oscar Martinez、Erick Rodriguez 以及 Kunal Srivastava，他们使用了本书的很多早期版本，并提供了反馈和建议；此外，他们还找出很多录入错误。

Mark W. Spong
Seth Hutchinson
M. Vidyasagar

译者序

前言

第 1 章 导论 1

1.1 机器人的数学模型 2

1.1.1 机器人的符号表示 2

1.1.2 位形空间 3

1.1.3 状态空间 3

1.1.4 工作空间 3

1.2 机器人作为一种机械装置 4

1.2.1 机器人机械臂的分类 4

1.2.2 机器人系统 5

1.2.3 精度和重复精度 5

1.2.4 手腕和末端执行器 6

1.3 常见的运动学配置 7

1.3.1 关节型机械臂(RRR) 7

1.3.2 球坐标机械臂(RRP) 7

1.3.3 SCARA 型机械臂(RRP) 8

1.3.4 圆柱型机械臂(RPP) 8

1.3.5 笛卡儿型机械臂(PPP) 9

1.3.6 并联机械臂 9

1.4 本书概要 10

习题 14

附注与参考 15

第 2 章 刚性运动和齐次变换 18

2.1 位置的表示方法 18

2.2 旋转的表示方法 19

2.2.1 平面内的旋转 19

2.2.2 三维空间内的旋转 21

2.3 旋转变换 22

2.3.1 相似变换 24

2.4 旋转的叠加 25

2.4.1 相对于当前坐标系的

旋转 25

2.4.2 相对于固定坐标系的

旋转 26

2.4.3 旋转变换的叠加定律 26

2.5 旋转的参数化 27

2.5.1 欧拉角 27

2.5.2 滚动角、俯仰角和

偏航角 29

2.5.3 转轴/角度表示 29

2.6 刚性运动 31

2.7 齐次变换 32

2.8 本章总结 33

习题 34

附注与参考 37

第 3 章 正运动学和逆运动学 38

3.1 运动链 38

3.2 Denavit-Hartenberg 约定 39

3.2.1 存在和唯一性问题 40

3.2.2 坐标系的配置 42

3.2.3 实例 43

3.3 逆运动学 49

3.3.1 一般的逆运动学问题 49

3.3.2 运动解耦 50

3.3.3 逆向位置: 一种几何

方法 51

3.3.4 关节型位形 52

3.3.5 球坐标型位形 54

3.3.6 逆向姿态 55

3.4 本章总结 57

习题 58

附注与参考 60

第4章 速度运动学——雅可比矩阵	61	5.4.2 连接位形对	96
4.1 角速度：固定转轴情形	61	5.4.3 增强	97
4.2 反对称矩阵	62	5.4.4 路径光滑化	97
4.2.1 反对称矩阵的性质	63	5.5 轨迹规划	97
4.2.2 旋转矩阵的导数	63	5.5.1 点到点运动的轨迹	98
4.3 角速度：一般情况	64	5.5.2 通过中间点确定的轨迹	103
4.4 角速度求和	65	5.6 本章总结	105
4.5 移动坐标系上点的线速度	66	习题	106
4.6 雅可比矩阵的推导	67	附注与参考	106
4.6.1 角速度	67	第6章 独立关节控制	108
4.6.2 线速度	68	6.1 驱动器的动力学	109
4.6.3 线速度和角速度雅可比矩阵的叠加	69	6.2 独立关节模型	110
4.7 工具速度	71	6.3 设定点跟踪	111
4.8 分析雅可比矩阵	72	6.3.1 比例-微分补偿控制器	111
4.9 奇点	73	6.3.2 比例-积分-微分补偿控制器	113
4.9.1 奇点解耦	74	6.3.3 饱和与柔性的影响	114
4.9.2 手腕奇点	75	6.4 前馈控制	115
4.9.3 手臂奇点	75	6.5 传动系统的动力学	116
4.10 静态力/力矩关系	77	6.6 状态空间设计	119
4.11 逆速度和加速度	78	6.6.1 状态反馈控制	120
4.12 可操作性	79	6.6.2 观测器	121
4.13 本章总结	81	6.7 本章总结	123
习题	82	习题	124
附注与参考	84	附注与参考	126
第5章 路径和轨迹规划	85	第7章 动力学	127
5.1 位形空间	85	7.1 欧拉-拉格朗日方程	127
5.2 基于势场的路径规划	88	7.1.1 动机	127
5.2.1 引力场	88	7.1.2 完整约束和虚功	129
5.2.2 斥力场	90	7.1.3 达朗贝尔原理	131
5.2.3 将工作空间力映射到关节力矩	91	7.2 动能和势能	133
5.2.4 梯度下降规划	93	7.2.1 惯性张量	133
5.3 逃离局部最小值	94	7.2.2 n -连杆机器人的动能	134
5.4 概率路线图方法	95	7.2.3 n -连杆机器人的势能	135
5.4.1 位形空间内的采样	96	7.3 运动方程	135
		7.4 一些常见位形	136

7.5 机器人动力学方程的性质	142	9.3.3 混合阻抗控制	179
7.5.1 反对称性和无源性	143	9.4 本章总结	181
7.5.2 惯性矩阵的界限	144	习题	182
7.5.3 参数的线性化	144	附注与参考	182
7.6 牛顿-欧拉方法	145	第 10 章 几何非线性控制	183
7.6.1 重温平面肘型机械臂	149	10.1 背景介绍	183
7.7 本章总结	151	10.1.1 流形、向量场和分布	183
习题	153	10.1.2 弗罗贝尼乌斯定理	186
附注与参考	154	10.2 反馈线性化	187
第 8 章 多变量控制	155	10.3 单输入系统	188
8.1 重温 PD 控制	155	10.4 n -连杆机器人的反馈 线性化	193
8.1.1 关节柔性的影响	157	10.5 非完整系统	195
8.2 逆动力学	158	10.5.1 对合和完整性	196
8.2.1 关节空间内的逆动力学	158	10.5.2 无磺控制系统	196
8.2.2 任务空间内的逆动力学	160	10.5.3 非完整系统实例	197
8.3 鲁棒和自适应运动控制	161	10.6 周氏定理	199
8.3.1 鲁棒逆运动学	161	10.7 无磺系统的控制	200
8.3.2 自适应逆运动学	164	10.8 本章总结	201
8.4 基于无源性的运动控制	165	习题	202
8.4.1 基于无源性的鲁棒控制	166	附注与参考	203
8.4.2 基于无源性的自适应 控制	167	第 11 章 计算机视觉	204
8.5 本章总结	168	11.1 成像几何	204
习题	171	11.1.1 相机坐标系	204
附注与参考	171	11.1.2 透视投影	205
第 9 章 力控制	173	11.1.3 成像平面和传感器 阵列	205
9.1 坐标系和约束	173	11.2 相机标定	206
9.1.1 对偶基	174	11.2.1 相机的外部参数	206
9.1.2 自然约束和人工约束	175	11.2.2 相机的内部参数	206
9.2 网络模型和阻抗	176	11.2.3 确定相机参数	207
9.2.1 阻抗操作符	177	11.3 阈值分割	208
9.2.2 阻抗操作符的分类	177	11.3.1 简略的统计回顾	209
9.2.3 戴维南和诺顿等效	177	11.3.2 自动选择阈值	210
9.3 任务空间内的动力学和控制	178	11.4 连通区域	213
9.3.1 任务空间内的动力学	178	11.5 位置和方向	214
9.3.2 阻抗控制	178		

11.5.1 图像矩	215	12.4 基于图像的控制律	226
11.5.2 物体的质心和中心矩	215	12.4.1 计算相机运动	227
11.5.3 物体的方向	215	12.4.2 比例控制方案	227
11.6 本章总结	217	12.4.3 基于图像的视觉伺服系统 的表现	228
习题	217	12.5 末端执行器和相机的运动	230
附注与参考	219	12.6 划分方法	231
第 12 章 基于视觉的控制	220	12.7 运动感知	233
12.1 设计要点	220	12.8 本章总结	234
12.1.1 相机位形	220	习题	235
12.1.2 基于图像的方法与基于 位置的方法	221	附注与参考	236
12.2 相机运动和交互作用矩阵	221	附录 A 三角函数	237
12.3 点特征的交互作用矩阵	222	附录 B 线性代数	238
12.3.1 固定点相对于移动相机的 速度	223	附录 C 动态系统	243
12.3.2 构建交互作用矩阵	224	附录 D 李雅普诺夫稳定性	245
12.3.3 点间交互作用矩阵的 性质	225	参考文献	250
12.3.4 多点的交互作用矩阵	226	索引	259

导 论

机器人技术是跨越传统工程界限发展而来的现代技术中一个相对年轻的领域。理解机器人及其应用的复杂性需要具备电气工程、机械工程、系统和工业工程、计算机科学、经济学和数学等方面的知识。工程实践中的新兴学科(如制造工程、应用工程以及知识工程)不断涌现,它们被用来应对机器人和工厂自动化领域内的复杂性。

本书侧重于机器人技术的基本原理,包括运动学、动力学、运动规划、计算机视觉和控制。我们的目标是介绍上述主题中最重要的概念,并将它们用到工业机械臂以及其他机械系统中。

机器人一词最早由捷克剧作家卡雷尔·恰佩克(Karel Čapek)在 1920 年的戏剧《Rossum's Universal Robots》中首次引入,robota 这个词在捷克语中是工作的意思。从此以后,机器人这个词被广泛应用到各种机械设备中,如遥控操作机器人、水下机器人、自主式地面机器人等。基本上任何具备自主操作能力的东西(通常是在计算机控制下)都可被称作是机器人。在本书中,机器人一词是指如图 1-1 中所示的由计算机控制的工业机械臂。

这种类型的机器人实质上是在计算机控制下运行的机械臂。这种设备尽管与科幻小说里的机器人相差甚远,但也是极其复杂的机电系统,需要使用高等方法来分析描述;这类机器人引入了很多具有挑战性且有趣的研究问题。美国机器人协会(Robot Institute of America, RIA)对此类机器人的官方定义为:

定义 机器人是一种可重复编程的多功能机械臂,它们通过可变量控运动来执行如移动材料、零件、工具或者特种设备等各种任务。

上述定义中的关键因素在于可重复编程,这使得机器人具有实用性,并能够适应各种环境。所谓的机器人革命,实际上属于范围更广的计算机革命的一部分。

即使上述机器人定义受到了限制,但仍有几个特点使得它在工业环境中具有吸引力。关于引入机器人应用,通常提到的优点包括:降低劳动力成本、提高精度和生产效率、比专用机器更好的灵活性、(给工人提供)更人性化的工作条件,因为枯燥、重复或危险的工作可由机器人替代人类来完成。

根据我们的定义,机器人实际上是两种早期技术结合的产物:遥控操作设备以及数控铣床。遥控操作设备,也称为主从操作设备,在第二次世界大战中开发,用来操持放射性物质。计算机数控技术(Computer Numerical Control, CNC)的开发源于某些零件加工过程中的高精度需求,比如高性能飞机中的零件。实际上,第一批机器人是把遥控操作设备里的

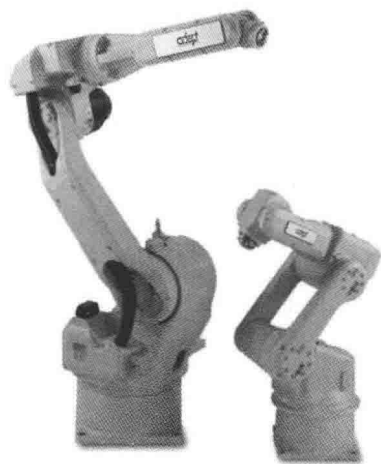


图 1-1 典型的工业机械臂实例, AdeptSix 600 机器人(左)和 AdeptSix 300 机器人(右)。这两种六轴高性能机器人均为物料传送或装配等应用而设计(图片来源: Adept Technology, Inc.)

1

2

机械连杆与数控机床的自主性和可编程性结合在一起而开发出来的。

机器人机械臂的首次成功应用一般都涉及某种形式的材料转移，如注射成型或冲压，在此应用中，机器人仅仅负责从冲压机械中卸货，并将成品部件转移或堆叠。第一批此类机器人可被编程以执行某动作序列，例如移动到位置 A、关闭夹持器、移动到位置 B 等，但是它们没有感知外部信息的能力。更复杂的应用，例如焊接、磨削、去毛刺以及装配，不仅需要更复杂的运动，而且需要某些形式的外部感知能力，如视觉、触觉或力觉，这是因为机器人和周围环境的互动增强。

全球目前(2005 年)装配有超过 80 万台工业机器人，它们主要集中在日本、欧盟和北美(见图 1-2)。经过 20 世纪 80 年代末一段时间的停滞之后，工业机器人的销售在 90 年代开始上升，并且其销量在接下来的十年内可能保持强劲增长态势^①。

应当指出，机器人的重要应用绝不仅限于那些使用机器人来直接代替工人的工业作业场合。实际上，当前(2005 年)有超过 60 万的家用人形机器人，其中主要为真空清洁和割草机器人。机器人有很多其他的应用领域，在这些应用场合里，不可能或不方便使用人类工作者。其中包括海底和行星探测、卫星回收和维修、解除爆炸装置、放射性环境中的工作。最后，假体(诸如人工假肢)本身就是机器人设备，它们需要使用与工业机器人类似的分析 and 设计方法。

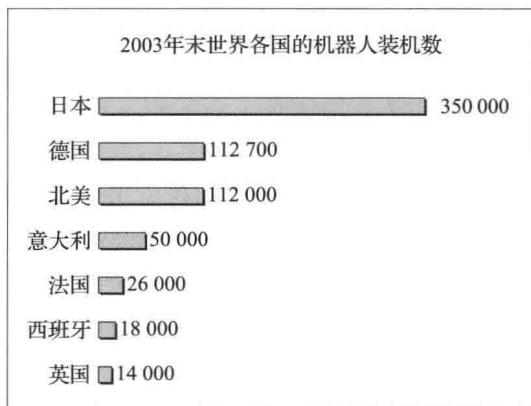


图 1-2 2003 年末机器人装机数量。日本的工业机器人装机数最多，其次是欧盟和北美^②(来源：联合国欧洲经济委员会(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)，2004 年 10 月)

1.1 机器人的数学模型

在本书中，我们将侧重于机器人数学模型的推导和分析。特别是，我们将开发一些方法，用来表示机器人操作的基本几何结构、操作的动力学以及现代机器人系统中常用的各种传感器。引入这些数学模型之后，我们将开发一些方法来规划和控制机器人的运动，从而完成各种特定任务。本节中，首先讲述一些基本的符号和术语，在后续章节中，我们将使用这些术语来推导机器人机械臂的数学模型。

3

1.1.1 机器人的符号表示

机器人机械臂是由一系列通过**关节(joint)**相连的**连杆(link)**组成的一个**运动链(kinematic chain)**。关节通常包括转动(旋转)和平动(移动或平移)两种。**转动(revolute)**关节就像是一个铰链，使得与其相连的两个连杆可以相互转动。**平动(prismatic)**关节使得与其相连的两个连杆之间可以相互平移。我们使用 R 来指代转动关节，用 P 来指代平动关节，如图 1-3 所示。例如，一个带有三个转动关节的三连杆机械臂可被称为 RRR 型机械臂。

① 这已成为事实。——译者注

② 近年来，中国工业机器人市场快速发展，2015 年工业机器人销量约占全球的 30%，保有量占全球的 1/10。——编辑注

每个关节代表两个连杆之间的连接情况。如果某关节被用来连接连杆 i 和连杆 $i+1$ ，我们用 z_i 代表转动关节的旋转轴线，或是平动关节的平移轴线。我们用**关节变量**来表示两个相邻连杆间的相对运动，其中 θ 对应转动关节， d 对应平动关节。在第 3 章中，我们将就此做详细讨论。

1.1.2 位形空间

机械臂的**位形**(configuration)是指机械臂上各点位置的一个完整规范。所有位形的集合称为**位形空间**(configuration space)。如果我们已知关节变量的取值(例如转动关节的转角或平动关节的移动距离)，那就容易推断机械臂上任何一点的位置，这是因为我们假定机械臂的各连杆均为刚性杆，并且底座是固定的。所以，在本书中，我们将使用关节变量值的集合来表示机器人的位形。我们用 q 来表示这个集合的向量；并且当关节变量依次取值为 q_1, \dots, q_n 时(转动关节对应 $q_i = \theta_i$ ，平动关节对应 $q_i = d_i$)，称机器人处于位形 q 。

如果一个物体的位形最少可以由 n 个参数来确定，我们称这个物体具有 n 个**自由度**(Degree Of Freedom, DOF)。因此，自由度的数目等于位形空间的维度。对于一个机器人机械臂，它的关节数目决定了自由度的数目。一个处于三维空间的物体具有 6 个自由度：包括 3 个对应**位置**(positioning)的自由度和 3 个对应**姿态**(orientation)的自由度。所以，一个机械臂通常最少具有 6 个独立的自由度。如果自由度小于 6，机器人手臂将无法以任意姿态到达工作空间中的每一点。某些应用，例如绕过障碍物或到达其后方，可能需要超过 6 个自由度。一般称自由度大于 6 的机械臂为**运动学冗余**(kinematically redundant)机械臂。

1.1.3 状态空间

位形为机器人机械臂的几何结构提供了一种瞬时描述，但它与动态响应无关。与此相反，机器人机械臂的**状态**(state)是指这样一组变量：结合机械臂的动力学描述以及未来输入，足以确定机械臂未来的时域响应。**状态空间**(state space)是所有可能的状态的集合。对于机械臂来讲，其动力学属于牛顿力学范畴，并且可以通过推广牛顿第二定律方程 $F=ma$ 来加以确定。所以一个机械臂的状态可以由关节变量 q 和关节速度 \dot{q} (加速度与关节速度的时间导数有关)来确定。

1.1.4 工作空间

一个机械臂的**工作空间**(workspace)是指当机械臂执行所有可能动作时，其末端执行器扫过的总体空间体积。工作空间受限于机器人的几何结构以及各关节上的机械限位。例如，一个转动关节的运动范围可能因为受到限制而小于 360° 。工作空间一般可以分为**可达工作空间**(reachable workspace)以及**灵活工作空间**(dexterous workspace)。可达工作空间是指机械臂可以抵达到的所有点的集合，而灵活工作空间是指机械臂可以以任意姿态抵达的所有点的集合。显然，灵活工作空间是可达工作空间的一个子集。本章的后续部分中将展示几种机器人的工作空间。

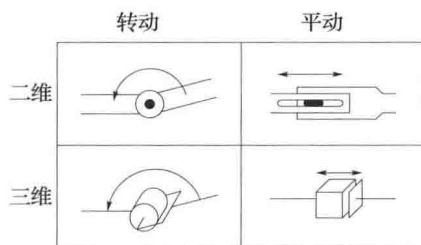


图 1-3 机器人关节的符号表示。每个关节对应机器人邻近连杆之间的一个相对运动自由度。转动关节(左边的二维和三维图示)导致邻近连杆之间的一个相对转动。平动关节(右边的二维和三维图示)导致邻近连杆之间的一个相对平移或伸缩运动

1.2 机器人作为一种机械装置

在推导数学模型时，我们一般不会考虑机器人机械臂的一些物理方面的特征。这些特征包括机械方面(比如关节实际上是如何实现的)、精度和重复精度，以及安装在末端执行器上的工具。本节中，我们将简要介绍其中的一些方面。

1.2.1 机器人机械臂的分类

机器人机械臂可以按照几个标准来进行分类，比如动力源或者关节的驱动方式，几何结构或者运动构造，控制方法，以及预期的应用领域。这种分类方式在决定选取何种机器人来满足给定任务时特别有用。例如，液压机器人可能并不适用于食品处理或无尘室应用，而 SCARA 机器人可能并不适用于汽车喷漆。我们将在下文中详细解释。

1. 动力源

大多数机器人依靠电力、液压或者气动方式进行驱动。液压驱动器有着其他方式无法比拟的响应速度以及扭矩性能，因此主要用于提取重物。液压机器人的缺点是可能泄漏液压油(密封问题)、更多的外围设备(如液压泵，这将增加维护成本)以及噪音。由直流或交流电机驱动的机器人越来越受欢迎，因为它们更便宜、更清洁、更安静。气动机器人成本不高而且结构简单，但是它们无法实现精确控制，因此应用范围和普及程度有限。

2. 控制方法

机器人按照控制方法可以分为**伺服(servo)**和**非伺服(nonservo)**两种。最早的机器人属于非伺服类型。这些机器人基本上是**开环(open-loop)**控制装置，运动范围受限于预先设置好的机械限位，并且它们主要用于材料传送。实际上，根据上述定义，(依靠)固定(限位装置)停止的机器人很难有资格被划分为机器人。伺服类型的机器人采用**闭环(closed-loop)**计算机控制来决定运动，因而可被看作真正的多功能、可编程器件。

对伺服类型的机器人来讲，我们可以根据其控制器对末端执行器引导方法的不同，来做进一步分类。最简单的伺服机器人是**点到点(point-to-point)**机器人。点到点机器人可以通过示教来设置一系列离散点，但末端执行器在这些点之间的轨迹则不受控制。对此类机器人，通常可使用**示教盒(teach pendant)**来设置这些离散点，然后对这些点进行存储和回放再现。点到点机器人的应用范围有限。与此相比，**连续路径(continuous path)**机器人末端执行器的整个路径都可被控制。例如，可以通过示教让机器人末端执行器来跟踪两个点之间的直线段，甚至是诸如焊缝之类的特定轮廓。此外，通常可以控制末端执行器的速度或加速度。它们属于最先进的机器人，通常需要开发极为复杂的计算机控制器和软件。

3. 应用领域

根据应用领域的不同，机器人机械臂通常可分为装配机器人和非装配机器人。装配机器人通常个头较小，依靠电力驱动，并且常采用转动关节型或是 SCARA 型(见下文)设计。迄今为止，典型的非装配应用领域有焊接、喷漆、材料搬运以及设备装卸。

装配应用和非装配应用之间的主要区别之一是：装配有较高的精度要求，这是因为在工作空间内的装配工件之间有显著的相互作用力。例如，一个装配任务可能需要进行部件插接(所谓的轴孔装配问题(peg-in-hole problem))或齿轮啮合。各部件间一个微小的配合不当便会导致楔入(wedging)和卡堵(jamming)，这将产生很大的作用力而使装配任务失败。因此，如果没有专用的夹具，或是无法测量和控制工件间的相互作用力时，将会很难

完成装配任务。

4. 几何结构

当前大多数工业机器人的自由度数目都不多于 6 个。根据机械臂的前三个关节(其余的腕关节单独考虑),可以对这些工业机器人做运动学上的划分。大多工业机器人可对应以下五种几何结构中的一种:关节型(RRR)、球坐标型(RRP)、SCARA 型(RRP)、圆柱型(RPP)或者笛卡儿型(PPP)。我们将在 1.3 节中详细讨论这些几何结构。

这五种机械臂都属于**串联连杆(serial link)**机器人。第六种机械臂具有完全不同的几何结构,即所谓的**并联式机器人(parallel robot)**。在并联机器人中,连杆组成一个封闭而不是开放的运动链。虽然本章中我们会简要讨论并联机器人,但相比串联式机器人,它们的运动学和动力学更为复杂;因此,关于此方面更详细的叙述请参考相应的高等书籍。

1.2.2 机器人系统

一个机器人机械臂不应仅被看作是机械连杆组成的集合。如图 1-4 所示,机械臂仅仅是整个机器人系统中的一个单元;而整个系统则包括机械臂、外部动力源、手臂末端工具、外部和内部传感器、计算机接口以及控制计算机。甚至编程软件也应该被看作是整个系统的一个组成部分,这是因为机器人的编程和控制方式对其性能以及接下来的应用范围都有着重要影响。

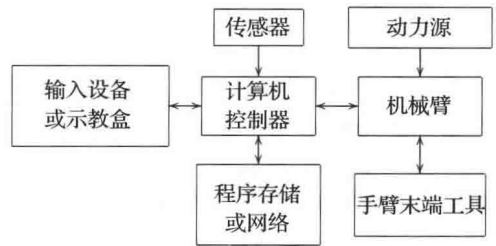


图 1-4 机械臂、传感、计算、用户界面和工具组成了复杂的机器人系统。许多现代机器人系统已经集成了计算机视觉、力/力矩传感以及先进的编程和用户界面功能

1.2.3 精度和重复精度

机械臂的**精度(accuracy)**是对机械臂能以何种接近程度到达工作空间内给定点的能力的一种度量。**重复精度(repeatability)**则是对机械臂能以何种接近程度返回先前示教点的能力的一种度量。测量定位误差的主要方法是使用位于关节部位的编码器,这些编码器可安装在用来驱动关节的电机轴上或者关节自身上。我们通常不会对末端执行器的位置和姿态进行直接测量;而是基于机械臂几何结构和刚体假设,根据测量的关节位置来计算末端执行器位置。因此定位精度会受到下列因素的影响:计算误差、机械臂制造过程的加工精度、机械连杆在重力或者负载作用下的柔性变形、齿轮间隙以及其他多种静态和动态因素(例如摩擦力等)。这也正是为什么机器人通常要采用极高刚度设计的主要原因。如果没有高刚度,机器人精度的提高只能依赖于对末端执行器位置的直接测量,例如采用计算机视觉技术。

当我们利用示教盒给机械臂设置示教点时,必须考虑上述因素的影响,同时控制计算机将会与给定点位置相对应的编码器取值存储起来。因此,重复精度主要取决于控制器的分辨率。**控制器的分辨率(controller resolution)**是指控制器可检测到的最小运动增量。此分辨率等于运动总距离除以 2^n ,其中 n 指代编码器的精度位数。在这种情况下,平动关节的分辨率通常高于转动关节,这是因为直线轴末端在两点间扫过的距离小于转动连杆扫过的弧线段长度。

此外,在后续章节中我们将会看到,旋转轴通常会引起连杆间大量的运动学和动力学耦合,因而会引起误差积累而使控制问题更加复杂。于是,人们可能想知道转动关节在机械臂

设计中到底有什么优势。答案的关键在于使用转动关节设计能增加灵活性并使结构变得紧凑。例如,图 1-5 中,要达到相同的运动范围,转动连杆的尺寸可以比平动连杆小很多。

因此,基于转动关节的机械臂,它所占用的工作容积比基于平动关节的机械臂要小。这增加了机械臂与其他机器人、设备和操作人员在同一空间内共同工作的能力。同时,转动关节机械臂能够更好地躲避障碍物,并且有着更广泛的应用前景。

1.2.4 手腕和末端执行器

在机械臂和末端执行器之间的运动链中的关节被称为手腕。手腕关节几乎全都是转动关节。在机械臂设计中越来越普遍的一种做法是使用球形手腕(spherical wrist),其中手腕的三个旋转轴相交于同一点,这一点被称为手腕中心(或腕心, wrist center point)。图 1-6 展示了一种球形手腕。

球形手腕大大简化了运动分析,让人们10 对末端执行器的位置和姿态可以进行有效的解耦。通常,机械臂具有三个自由度来做定位,这由机械臂上三个或者更多关节完成。因而,姿态的自由度数目取决于手腕的自由度数目。根据应用场合的不同,手腕通常设计有一个、两个或者三个自由度。例如,图 1-14 中所示的 SCARA 机器人具有四个自由度:手臂上的三个自由度,以及手腕上的一个关于最终 z 轴的转动自由度。

机器人的手臂和手腕组件主要用来定位手、末端执行器以及它携带的任何工具。实际上执行任务的是末端执行器或工具。最简单的一种末端执行器是手爪,如图 1-7 所示,它通常只能执行开启(opening)和闭合(closing)两种命令。虽然这能满足物料搬运、操持一些零件或者抓取简单工具的要求,但还达不到其他诸如焊接、装配、研磨等任务的需求。

因此,人们投入了大量的研究来设计专用的末端执行器以及可根据任务进行快速更换的工具。如图 1-8 所示,人们也在仿生手的开发中进行了大量研究。因为我们关心的是机器人本身的分析和控制,而不是特定的应用或末端

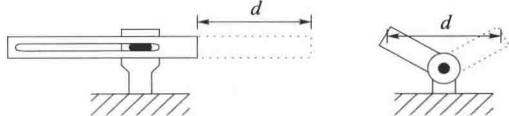


图 1-5 平动连杆与转动连杆的运动对比,该图表明,与较大的平动关节相比,较小的转动关节可以覆盖相同的运动距离 d 。平动连杆末端可覆盖的最长距离等于连杆长度 a ;与此相比,转动连杆末端可覆盖的最长距离等于 $2a$,也就是连杆转过 180° 时所对应的距离

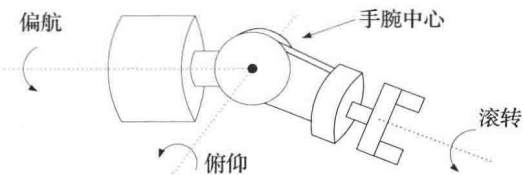


图 1-6 球形手腕。球形手腕的旋转轴线通常可被表示为滚转(roll)、俯仰(pitch)和偏航(yaw);并且这些轴线相交于同一点,该交点称为腕心



图 1-7 机器人手爪的例子。从左至右依次是双指平行夹持器、剪刀型夹持器以及垂直手爪(图片来源:ASG-Jergen's, 俄亥俄州,克利夫兰市)

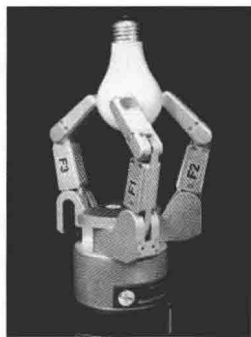


图 1-8 Barrett Technologies 开发的一种三指仿生手。这种手爪具有更好的灵活性,并且它拥有操纵不同尺寸和几何形状物体的能力(图片来源:Barrett Technologies)

10

11