

国外名校最新教材精选

Springer

机器人学 建模、规划与控制

Robotics: Modelling, Planning and Control

布鲁诺·西西里安诺

洛伦索·夏维科

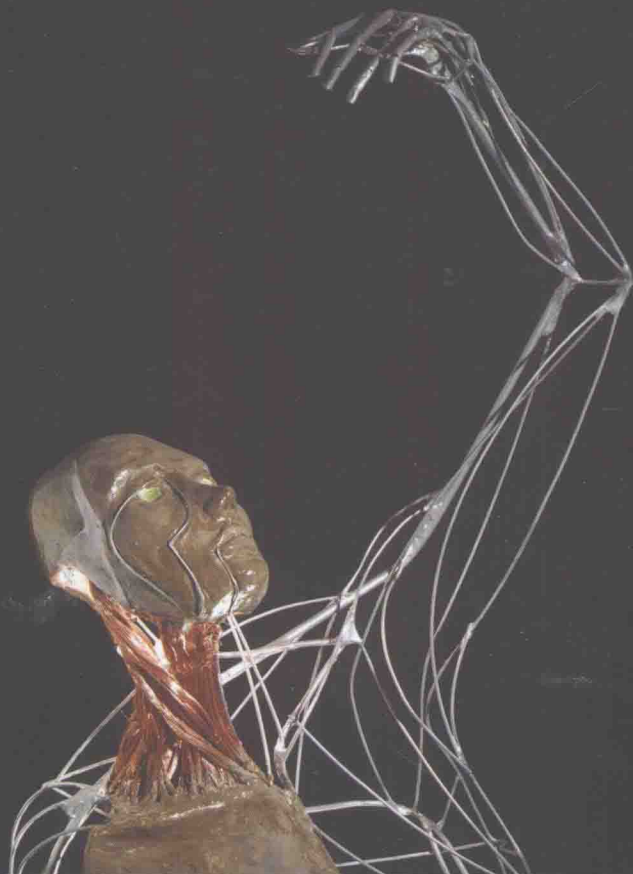
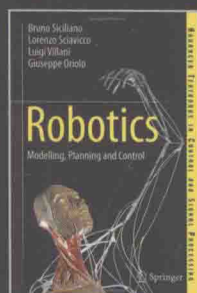
路易吉·维拉尼

朱塞佩·奥里奥洛

[意]

著

张国良 曾静 陈励华 敬斌 译



Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 国外名校最新教材精选

机器人学 建模、规划与控制

Robotics: Modelling, Planning and Control

布鲁诺·西西里安诺

(Bruno Siciliano)

洛伦索·夏维科

(Lorenzo Sciavicco)

[意]

路易吉·维拉尼

(Luigi Villani)

朱塞佩·奥里奥洛

(Giuseppe Oriolo)

著

张国良 曹 静 隰励华 敬 斌 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

Translation from the English language edition:

“Robotics; Modelling, Planning and Control”

By Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo (Edition: 1)

Copyright ©2009 Springer, London

as a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书中文简体字版由施普林格科学与商业媒体集团授权西安交通大学出版社在中国境内出版发行。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2011-212

图书在版编目(CIP)数据

机器人学:建模、规划与控制/(意)西西里安诺(Siciliano, B.)等著;张国良等译. —西安:西安交通大学出版社, 2013. 11

(国外名校最新教材精选)

书名原文:Robotics; modelling, planning and control

ISBN 978-7-5605-5784-7

I. ①机… II. ①西… ②张… III. ①机器人学-高等学校-教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 259606 号

书 名 机器人学:建模、规划与控制
著 者 布鲁诺·西西里安诺,洛伦索·夏维科,路易吉·维拉尼,朱塞佩·奥里奥洛
译 者 张国良 曾 静 陈励华 敬 斌

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82669097
印 刷 陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本 787mm×1 092 mm 1/16 印张 30 字数 722 千字
版次印次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-5784-7/TP·594
定 价 86.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

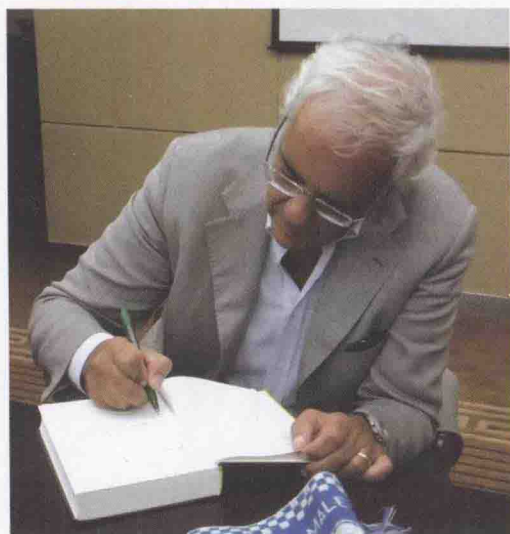
版权所有 侵权必究



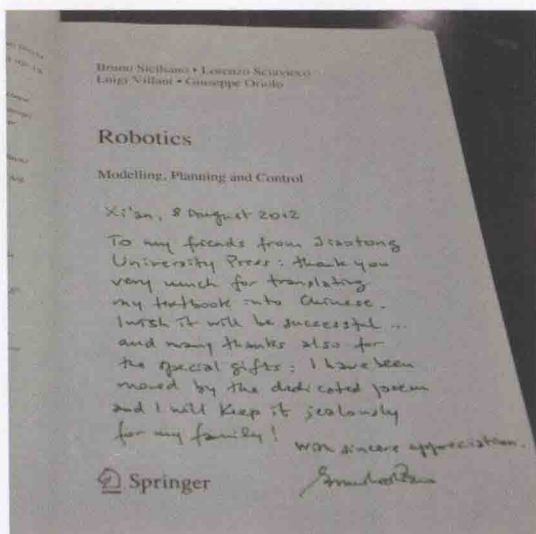
2012年8月8日,本书原著者布鲁诺·西西里安诺教授(前排中)来访西安交通大学,与本书译者张国良教授(左一)、曾静副教授(后排)、敬斌副教授(右一)及编辑们就译稿进行交流。



译者们赠送布鲁诺·西西里安诺教授一幅书法作品,内容是张国良教授专为布鲁诺·西西里安诺教授来访所作的一首古体诗《题机器人——赠布鲁诺·西西里安诺教授》:“翩舞周穆阶,赞吟达芬奇。闻道凭眺海,结缘因传译。浮槎渡远途,长安论今昔。携手致大同,佳音天下期。”



布鲁诺·西西里安诺教授为本书出版题写祝语



布鲁诺·西西里安诺教授题写的祝语

布鲁诺·西西里安诺教授题写的祝语：

Xi'an, 8 August 2012

To my friends from Jiaotong University Press; Thank you very much for translating my textbook into Chinese. I wish it will be successful... and many thanks also for the special gifts; I have been moved by the dedicated poem and I will keep it jealously for my family!

With sincere appreciation
Bruno Siciliano

参考译文：

西安, 2012年8月8日

致来自交通大学出版社的朋友: 非常感谢你们把我编写的教材翻译为中文。我预祝它成功! 并感谢这一特别的礼物: 我被这首专为我而写的诗*感动了, 我会为我和我的家人珍藏它!

怀着诚挚谢意的
布鲁诺·西西里安诺

* 指前页下图照片中展示的译者张国良教授赠布鲁诺·西西里安诺教授的书法作品中专为他来访而作的古体诗。

作者简介



布鲁诺·西西里安诺(Bruno Siciliano),1982年和1987年在意大利那不勒斯大学(Università degli Studi di Napoli Federico II)分获硕士和博士学位;1983—2000年在该校电气工程与信息技术系任教;2000—2003年为意大利萨勒诺大学(Università degli Studi di Salerno)教授;2003年起任那不勒斯大学终身教授,并担任PRISMA实验室主任。他是美国机械工程师协会会员(ASME Fellow);国际自动控制联合会会员(IFAC Fellow);美国电气与电子工程师协会会员(IEEE Fellow),并于2008—2009年担任该协会机器人与自动化学会(IEEE RAS)会长,2010年获得该学会授予的杰出贡献奖(2010 IEEE RAS Distinguished Service Award),2015年又获得该学会授予的乔治·萨里迪斯领导奖(2015 IEEE RAS George Saridis Leadership Award)。2013年他带领的研究团队获得欧洲研究委员会高级研究人员基金(ERC Advanced Grant)。他还曾任Springer出版社多个学术丛书的主编及IEEE多种学术期刊的主编,并著述颇丰,已被翻译为多种文字出版,并发表了两百余篇学术论文。

洛伦索·夏维科(Lorenzo Sciavicco),1963年毕业于意大利罗马第一大学(Università di Roma La Sapienza),获硕士学位;1968—1995年在那不勒斯大学(Università degli Studi di Napoli Federico II)工学院任教,1995年后为罗马第三大学(Università degli Studi “Roma Tre”)计算机工程与自动化系机器人学专业教授。他是意大利机器人控制领域的开拓者和奠基人,他所带领的研究团队曾获许多学术奖项。他著有多部学术著作,并发表了近百篇学术论文。



路易吉·维拉尼(Luigi Villani),1996年获意大利那不勒斯大学(Università degli Studi di Napoli Federico II)博士学位;现为该校电气工程与信息技术系系务委员,自动控制专业副教授;2005年他已获得教授任职资格;2000—2010年担任IEEE Control Systems Society学术会议文集编委会副主编,2007—2011年担任IEEE Transactions on Robotics副主编,2005—2011年担任IEEE Transactions on Control Systems Technology副主编,2015年6月起担任IEEE Robotics and Automation Letters副主编。他是多部学术著作的作者,并发表了上百篇学术论文。

朱塞佩·奥里奥洛(Giuseppe Oriolo),1992年获罗马第一大学(Università di Roma La Sapienza)博士学位;1994年起在该校任教,现为该校信息工程与自动控制系副教授;曾任IEEE Transactions on Robotics副主编(2001—2005)和主编(2009—2013)及IEEE多次国际学术会议的组织委员会主席或论文集主编。他还是多部学术著作和上百篇学术论文的作者。



谨以此书献给我们的家人

丛书序

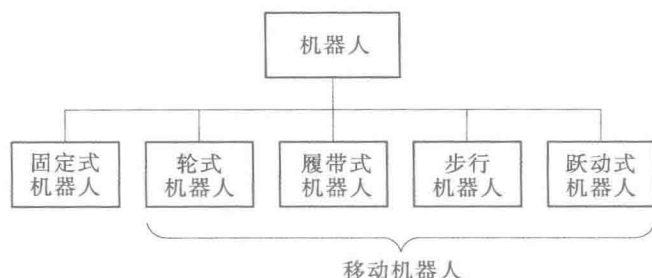
控制工程与信号处理正在不断繁荣与发展。和一般科学研究一样,新思想、新概念、新阐释自然而然出现后,会被讨论、应用、放弃或归入主流学科范例中。有时这些创新的概念会与控制和信号处理这一大学科类别中的一个新子类结合。新旧之间的交战最初会发生在学术会议上,或通过互联网和学术期刊呈现。新概念再成熟一些后,会出现科学或工程方面的专著。

当控制与信号处理的某一个新概念相关资料足够丰富,这些资料就会发展成为一本专门指南,或成为大学生、研究生或工程师的一门课程。“控制与信号处理高级教程”(Advanced Textbooks in Control and Signal Processing)正是这样一套对该学科时兴与创新内容系统介绍的课程教材。希望著者能够喜欢这样的出版机会,在这一教材系列对新出现的控制与信号处理技术的某些方面进行结构化的系统介绍。

机器人早已经在科幻作品中大量出现了。机器人这一名称来自于剧作家 Karel Capek 的戏剧 *Rossum's Universal Robots* (1920 年)。艺术家关注的是机械外表如同人的两足机器人(通常称为 androids),这毫不令人惊奇。这一关注点也是这一类电影作品的主题,比如根据艾萨克·阿西莫夫小说改编的电影《我,机器人》(*I, Robot*),还有斯坦利·库布里克的电影《人工智能》(*A. I.*)。不过,本书中所要告诉读者的是已经广泛应用于工业之中的机器人技术以及商业应用中原型阶段的快速入门。如下图所示,当前机器人可根据其移动特性进行分类:

机器人中最大的一类是固定机器人。这类机器人通常用于重复性的精密机械作业或是体力工作,可以说遍及现代工业自动化的许多领域。对这一类机器人主要关注结构化环境中的任务实现。目前看来极有可能的是随着技术的发展,移动机器人的应用数量将显著增加,而且,机器人技术在非结构化环境中的任务和应用越多,这类趋势越明显。

那么什么是机器人学呢?《简氏词典》(*The Chamber's Dictionary*, 2003 版)



给出的简洁定义为：解决机器人设计、构造和使用的技术分支。这一定义当然抓住了“控制与信号处理高级教程”这一系列中“机器人学”部分的精髓，这部分由布鲁诺·西西里安诺、洛伦索·夏维科、路易吉·维拉尼、朱塞佩·奥里奥洛所著，是先前版本《机械手建模与控制》(Modelling and Control of Robot Manipulators, 2000, ISBN:978-1-85233-221-1)的扩展与修订版。由上图可以看出，机器人覆盖了很广泛的类型，这本书则试图展现一种机器人学的统一方法，同时重点关注两种主要类型的机器人：固定机器人和轮式机器人。教程的出版卷次遵循新的学科分类，该分类具有自身的新特征，机器人学当然属于这一类别的学科。机器人学总的研究范围涉及机械、电子、信号处理、控制工程、计算机、数学建模的交叉，而在这一极为广泛的框架下，作者选择的是“建模、规划与控制”的主题，余下的部分还有多年来机器人设计与操作的基础部分。教材中还包括轮式机器人的材料，机器人控制中所用到的视觉等一些有趣的创新。因此，这本书提供了在新应用中所包含和发展技术领域的完整理论基础。

该系列是用于高级课程的教材，系列卷次具有有益的教育特点。本卷共有12章，涉及基础和专业主题，每章最后还有习题部分。5个附录可提供书中所用部分高级方法更为深入的资料。还有参考文献与索引。引用和索引的详细资料可作为参考资料使用，也可以作为课程学习内容。希望学生、研究者、学者、工程技术人员能够通过这本书获得机器人学研究的巨大帮助。

前 言

最近 25 年里,机器人领域引起很多学者越来越多的兴趣,致力于机器人学研究的文献也颇为丰富,包括教科书和专著以及专业文章。浓厚的兴趣也来自于机器人学的多学科特征,机器人学是一门根源于不同领域的科学。控制论、机械学、计算机、生物工程、电子学(这些都是最重要的,其它的尚未提及)毫无疑问共同推动了这门科学的发展。

尽管机器人学是相对年轻的学科,不过其基础理论已经在经典教科书中广为传播。在机器人学中,不管是传统的工业机器人领域,还是先进的特定领域以及最近 15 年引起研究团队持续增长的关注的服务机器人中,建模、规划和控制都起着最基础的作用。

本书的前两位作者在 1995 年出版了《机械手建模与控制》,并在 2000 年推出了第二版,这本书是该书的后续。原书部分内容在基础理论与技术方面以及更进一步的教学目标已经以一种严格的形式被跟进和肯定。

本书基本原理与技术方面主要集中在前六章,关注的是机械手结构,包括运动学、静力学与轨迹规划,机器人执行元件、传感器、控制单元技术。

接下来的六章是提高部分的内容,主要是机械手动力学和运动控制、根据外部传感器数据(力与视觉)与环境交互、移动机器人与运动规划。

书中内容划分为 12 章,并包括 5 个附录。

第 1 章中,在一般的机器人叙述里点明了工业与提高应用的不同之处,介绍了最常见的机械手的机械结构和轮式移动机器人,接下来的章节中要讲述的主题也会在此处介绍。

第 2 章中,以系统、概括的方式介绍了运动学,也就是 Denavit-Hartenberg 法。用公式表示了运动学正解方程,公式建立了关节空间变量和操作空间变量的关系。采用该方程可得到机械手工作空间以及运动学校准技术。分析运动学反解问题,对典型机械手结构得出闭合形式的解。

第3章介绍了微分运动学,采用几何雅克比矩阵描述了关节速度与末端执行器线速度、角速度的关系,指出了几何雅克比矩阵与解析雅克比矩阵的不同之处,雅克比矩阵成为表征机械手的基本工具,因为该矩阵可以进行独特位形的确定、冗余分析、力与施加在末端执行器上的力矩、可操作性椭圆上所求关节转矩之间关系的表达。此外,即使对没有闭合形式解的机械手,雅克比矩阵也可以用公式表示运动学反解问题的求解算法。

第4章探讨的是轨迹规划技术,该技术涉及到根据期望点序列完成多项式插值计算,处理的计算包括点对点运动和点列运动两种情况。在关节空间和操作空间生成轨线的技术都有所介绍,特别是操作空间。

第5章主要是执行元件与传感器。执行系统总的特征描述了之后,介绍的是电器与液压驱动器的控制方式。叙述了机器人中最常见的本体感觉与外部感觉传感器。

第6章介绍机器人控制系统的功能体系结构。描述了编程环境的特征,特别强调了示教与面相机器人编程。最后讨论了工业机器人控制系统的通用硬件体系模型。

第7章推导了机械手动力学,这在运动学仿真、机械手结构分析与控制算法综合中起到基础作用。考虑执行元件可得动力学模型,用到了两种方式,一种基于拉格朗日公式,一种基于牛顿-欧拉公式。前者从概念上来说更为简单也更成体系,而后者可以用递归方式计算动力学模型。介绍了动力学模型的典型特性,包括参数的线性性,这一特性可用于模型辨识技术。最后解释了操作空间中表达动力学模型的变换。

第8章处理的是自由空间运动控制问题,指出了关节空间分散与集中控制策略之间的区别。对于前者,介绍了独立关节控制技术,该技术典型应用于工业机器人控制中。作为集中控制的前提,介绍了计算转矩前馈控制技术。介绍的先进方式包含重力补偿 PD 控制、逆动力学控制、鲁棒控制与自适应控制。集中技术可扩展到操作空间控制。

第9章解决的是与工作环境接触的机械手力控制问题。机械柔量与阻抗概念定义为操作空间控制方式到受约束运动情况的自然扩展。最后结合描述交互任务的自然与人工约束公式介绍了混合力/运动控制策略。

第10章介绍的是应用机器人系统周围环境性信息的视觉控制。根据场景中

目标估计相机位置与方向的问题可通过解析与数值两种技术解决。介绍了立体视觉与适当的相机标度所获得的优点之后,讨论了两种主要的视觉控制策略,即操作空间和图像空间,混合视觉控制方案有效组合了两方面各自的优点。

第 11 章是轮式移动机器人,在此扩展了前几章建模、规划和控制几个方面的内容。至于所关心的建模,需要区分运动学模型与动力学模型,前者表现出很强的转轮所施加的约束类型的特征,后者考虑的是作用在机器人上的力。运动学模型的特定结构被巧妙应用于路径规划和轨迹规划。控制问题可固定为两种主要的运动任务:轨线跟踪与位形调节。进一步指出如何应用里程定位方式实现控制方案。

第 12 章是障碍物在工作空间表示的情况下,重新完成第 4 章和第 11 章分别处理过的机械手与移动机器人规划问题。这一框架下,运动规划是在位形空间的有效公式化表达。介绍了用于移动机器人的几种规划技术:回缩、单元分解、概率规划、人工势场。最后探讨了机械手实例的扩展。

这一章总结了本书的主要内容,接下来的 5 个附录包括了背景方法的回顾。

附录 A 主要是线性代数,介绍的是矩阵、向量以及相关运算的基本概念。

附录 B 介绍的刚体力学的基本内容,这部分是学习机械手运动学、静力学和动力学的预备知识。

附录 C 是线性系统反馈控制原理,还介绍了非线性系统基于李亚普诺夫理论的一些总的控制方法。

附录 D 是机械系统受不完全约束控制中所需要的微分几何的一些概念。

附录 E 关注图搜索算法及其在运动规划方法应用上的复杂度。

根据以上所介绍方法,内容组织可将书作为自动化、计算机、电气、电子或机械工程专业高年级本科生或研究生在机器人学方面的参考书。

从教学角度来看,书中不同主题按照实用方式展开,而且逐步加大难度。所出现的问题及确定的合适工具都是用来寻找以工程为目标的求解方法。每一章都有简短的导言,用于说明基本原理和章节目的。书中用于研究需要的部分放在 5 个附录中介绍,其目的在于为不同专业学生提供相同学习背景。

书中包含超过 310 张插图和 60 余个计算实例,具有仿真的实例研究贯穿整本书。介绍了机械手逆运动学算法、轨迹规划技术、逆动力学计算、运动、力和视觉控制算法,以及移动机器人运动控制的计算机实现结果的相当多细节,以帮助

理解理论的发展,同时实际问题应用中的灵活性。另外,章节后给出了将近 150 个习题,有些包括了对内容更进一步的研究,本书还配有 Matlab 程序完成的电子解答手册(可从 www.springer.com/978-1-84628-641-4 下载),对选用本书教学的读者可免费提供。本中还在每一章最后给出了和该领域发展相关的参考文献(超过 250 篇)。

最后,作者要感谢所有对本书的准备提供帮助的人。

原书中的工作是现在这本书的基础,感谢 Pasquale Chiacchio 与 Stefano Chiverini 分别撰写轨迹规划和力控制部分,感谢 Fabrizio Caccavale 与 Ciro Natale 对第 2 版内容的修订给予的极大帮助。

特别感谢 Alessandro De Luca 对本书大部分内容提出的意见,感谢 Vincenzo Lippiello, Agostino De Santis, Marilena Vendittelli 与 Luigi Freda 对一些章节给予的贡献。

布鲁诺·西西里安诺(Bruno Siciliano)

洛伦兹·夏维科(Lorenzo Sciavicco)

路易吉·维拉尼(Luigi Villani)

朱塞佩·奥里奥洛(Giuseppe Oriolo)

于那不勒斯和罗马

2008 年 7 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 引言 (1)

- 1.1 机器人学 (1)
- 1.2 机器人机械结构 (3)
 - 1.2.1 机器人机械手 (3)
 - 1.2.2 移动机器人 (7)
- 1.3 工业机器人学 (10)
- 1.4 先进机器人学 (18)
 - 1.4.1 野外机器人 (18)
 - 1.4.2 服务机器人 (19)
- 1.5 机器人建模、规划与控制 (22)
 - 1.5.1 建模 (22)
 - 1.5.2 规划 (22)
 - 1.5.3 控制 (23)
- 参考资料 (24)

第 2 章 运动学 (28)

- 2.1 刚体的姿态 (28)
- 2.2 旋转矩阵 (29)
 - 2.2.1 基本旋转 (29)
 - 2.2.2 向量的表示 (30)
 - 2.2.3 向量的旋转 (32)
- 2.3 旋转矩阵的合成 (32)
- 2.4 欧拉角 (34)
 - 2.4.1 ZYZ 角 (35)
 - 2.4.2 RPY 角 (36)
- 2.5 角和轴 (37)
- 2.6 单位四元数 (39)
- 2.7 齐次变换 (40)
- 2.8 正运动学 (41)
 - 2.8.1 开链 (43)

2.8.2 Denavit - Hartenberg 法 (44)

2.8.3 闭链 (46)

2.9 典型机械手结构运动学 (49)

- 2.9.1 三连杆平面臂 (49)
- 2.9.2 平行四边形臂 (51)
- 2.9.3 球形臂 (53)
- 2.9.4 拟人臂 (54)
- 2.9.5 球形腕 (55)
- 2.9.6 斯坦福机械手 (56)
- 2.9.7 带球形腕的拟人臂 (57)
- 2.9.8 DLR 机械手 (59)
- 2.9.9 类人机械手 (61)

2.10 关节空间与操作空间 (62)

- 2.10.1 工作空间 (64)
- 2.10.2 运动学冗余 (65)

2.11 运动学标定 (66)

2.12 逆运动学问题 (67)

- 2.12.1 三连杆平面臂的求解 (68)
- 2.12.2 带球形腕机械手的求解 (70)
- 2.12.3 球形臂的求解 (71)
- 2.12.4 拟人臂的求解 (71)
- 2.12.5 球形腕的求解 (74)

参考资料 (74)

习题 (74)

第 3 章 微分运动学和静力学 (77)

- 3.1 几何雅可比矩阵 (77)
 - 3.1.1 旋转矩阵求导 (78)
 - 3.1.2 连杆速度 (79)
 - 3.1.3 雅可比矩阵计算 (81)
- 3.2 典型机械手结构的雅可比矩阵 (83)
 - 3.2.1 三连杆平面臂 (83)
 - 3.2.2 拟人臂 (84)
 - 3.2.3 斯坦福机械手 (85)

3.3 运动学奇点	(85)	5.2 驱动	(144)
3.3.1 奇点解耦	(87)	5.2.1 电气驱动	(144)
3.3.2 腕奇点	(87)	5.2.2 液压驱动	(147)
3.3.3 臂奇点	(88)	5.2.3 传动装置影响	(148)
3.4 冗余分析	(89)	5.2.4 位置控制	(150)
3.5 逆微分运动学	(91)	5.3 本体传感器	(152)
3.5.1 冗余机械手	(91)	5.3.1 位置传感器	(152)
3.5.2 运动学奇点	(93)	5.3.2 速度传感器	(155)
3.6 分析雅可比矩阵	(94)	5.4 外部传感器	(155)
3.7 逆运动学算法	(97)	5.4.1 力传感器	(155)
3.7.1 (广义-)逆雅可比矩阵	(98)	5.4.2 距离传感器	(158)
3.7.2 雅可比矩阵转置	(99)	5.4.3 视觉传感器	(162)
3.7.3 方向误差	(101)	参考资料	(166)
3.7.4 二阶算法	(104)	习题	(166)
3.7.5 逆运动学算法之间的对比	(105)	第6章 控制体系	(167)
3.8 静力学	(108)	6.1 功能体系	(167)
3.8.1 运动静力学二元性	(109)	6.2 编程环境	(170)
3.8.2 速度和力变换	(110)	6.2.1 示教	(171)
3.8.3 闭链	(111)	6.2.2 面向机器人编程	(172)
3.9 可操纵性椭球体	(112)	6.3 硬件体系	(173)
参考资料	(116)	参考资料	(175)
习题	(116)	习题	(175)
第4章 轨迹规划	(118)	第7章 动力学	(177)
4.1 路径和轨迹	(118)	7.1 拉格朗日公式	(177)
4.2 关节空间轨迹	(119)	7.1.1 动能计算	(178)
4.2.1 点对点运动	(119)	7.1.2 势能计算	(182)
4.2.2 通过系列点的运动	(123)	7.1.3 运动方程	(183)
4.3 操作空间轨迹	(131)	7.2 动力学模型的典型性质	(184)
4.3.1 路径基元	(132)	7.2.1 矩阵阵 $\dot{B}-2C$ 的反对称性	(184)
4.3.2 位置	(134)	7.2.2 动力学参数的线性性	(186)
4.3.3 指向	(136)	7.3 简单机械手结构的动力学模型	(189)
参考资料	(137)	7.3.1 两连杆笛卡儿臂	(189)
习题	(138)	7.3.2 两连杆平面臂	(190)
第5章 执行器与传感器	(139)	7.3.3 平行四边形臂	(198)
5.1 关节执行系统	(139)	7.4 动力学参数辨识	(202)
5.1.1 传动装置	(140)	7.5 牛顿-欧拉公式	(204)
5.1.2 伺服发动机	(140)	7.5.1 连杆加速度	(206)
5.1.3 功率放大器	(143)	7.5.2 递归算法	(207)
5.1.4 能源	(143)	7.5.3 示例	(209)

7.6 动力学正解与逆解问题	(211)	9.6.1 任务分析	(285)
7.7 轨迹的动态标度	(213)	9.7 混合力/力矩控制	(288)
7.8 操作空间动力学模型	(214)	9.7.1 柔性环境	(289)
7.9 动力学可操作椭圆	(216)	9.7.2 刚性环境	(292)
参考资料	(217)	参考资料	(294)
习题	(218)	习题	(294)
第 8 章 运动控制	(220)	第 10 章 视觉伺服系统	(296)
8.1 控制问题	(220)	10.1 用于控制的视觉	(296)
8.2 关节空间控制	(221)	10.1.1 视觉系统配置	(297)
8.3 分散控制	(224)	10.2 图像处理	(298)
8.3.1 独立关节控制	(225)	10.2.1 图像分割	(298)
8.3.2 分散前馈补偿	(232)	10.2.2 图像解释	(301)
8.4 计算转矩前馈控制	(235)	10.3 位姿估计	(303)
8.5 集中控制	(237)	10.3.1 解析解	(303)
8.5.1 重力补偿 PD 控制	(238)	10.3.2 相互作用矩阵	(307)
8.5.2 逆动力学控制	(239)	10.3.3 算法解	(310)
8.5.3 鲁棒控制	(241)	10.4 立体视觉	(314)
8.5.4 自适应控制	(246)	10.4.1 核面几何	(314)
8.6 操作空间控制	(249)	10.4.2 三角测量	(315)
8.6.1 总体方案	(249)	10.4.3 绝对定向	(316)
8.6.2 重力补偿 PD 控制	(250)	10.4.4 根据平面单应性实现的 3D 重建	(317)
8.6.3 逆动力学控制	(252)	10.5 相机标定	(318)
8.7 不同控制方案的比较	(253)	10.6 视觉伺服问题	(320)
参考资料	(263)	10.7 基于位置的视觉伺服	(322)
习题	(263)	10.7.1 重力补偿 PD 控制	(323)
第 9 章 力控制	(265)	10.7.2 速度分解控制	(323)
9.1 机械手与外部环境的交互	(265)	10.8 基于图像的视觉伺服	(325)
9.2 柔量控制	(266)	10.8.1 重力补偿 PD 控制	(325)
9.2.1 被动柔量	(266)	10.8.2 速度分解控制	(326)
9.2.2 主动柔量	(267)	10.9 不同控制方案之间的比较	(328)
9.3 阻抗控制	(271)	10.10 复合视觉伺服	(333)
9.4 力控制	(275)	参考资料	(337)
9.4.1 包含内位置回路的力控制	(276)	习题	(337)
9.4.2 包含内速度回路的力控制	(277)	第 11 章 移动机器人	(339)
9.4.3 并联力/位置控制	(277)	11.1 非完整约束	(339)
9.5 约束运动	(280)	11.1.1 可积性条件	(341)
9.5.1 刚性环境	(280)	11.2 运动学模型	(344)
9.5.2 柔性环境	(283)	11.2.1 独轮车	(345)
9.6 自然约束与人工约束	(284)		

11.2.2 两轮车	(346)	附录 A 线性代数	(403)
11.3 链式系统	(348)	A.1 定义	(403)
11.4 动力学模型	(351)	A.2 矩阵运算	(404)
11.5 规划	(353)	A.3 向量运算	(407)
11.5.1 规划和时间律	(354)	A.4 线性变换	(409)
11.5.2 平滑输出	(355)	A.5 特征值与特征向量	(410)
11.5.3 路径规划	(356)	A.6 双线性型与二次型	(411)
11.5.4 轨迹规划	(360)	A.7 广义逆	(412)
11.5.5 最优轨迹	(361)	A.8 奇异值分解	(413)
11.6 运动控制	(363)	参考资料	(414)
11.6.1 轨迹跟踪	(364)	附录 B 刚体力学	(415)
11.6.2 校正	(369)	B.1 运动学	(415)
11.7 里程定位	(372)	B.2 动力学	(416)
参考资料	(374)	B.3 功与能	(419)
习题	(375)	B.4 约束系统	(419)
第 12 章 运动规划	(377)	参考资料	(421)
12.1 问题的规范描述	(377)	附录 C 反馈控制	(422)
12.2 位形空间	(378)	C.1 线性系统单输入/单输出控制	(422)
12.2.1 距离	(379)	C.2 非线性机械系统的控制	(426)
12.2.2 障碍	(380)	C.3 李亚普诺夫直接法	(427)
12.2.3 障碍举例	(380)	参考资料	(429)
12.3 基于回缩的路径规划	(383)	附录 D 微分几何	(430)
12.4 基于单元分解的路径规划	(386)	D.1 向量场与李氏括号	(430)
12.4.1 精确分解	(386)	D.2 非线性可控性	(432)
12.4.2 近似分解	(388)	参考资料	(434)
12.5 概率规划	(390)	附录 E 图搜索算法	(435)
12.5.1 PRM 方法	(390)	E.1 复杂度	(435)
12.5.2 双向 RRT 方法	(391)	E.2 广度优先搜索和深度优先搜索	(436)
12.6 基于人工势场的规划方法	(393)	E.3 A* 算法	(436)
12.6.1 引力势场	(393)	参考资料	(437)
12.6.2 斥力势场	(394)	参考文献	(438)
12.6.3 总势场	(396)	索引	(453)
12.6.4 规划方法	(396)		
12.6.5 局部极小值问题	(397)		
12.7 机器人机械手情形	(399)		
参考资料	(401)		
习题	(401)		