

移动机器人系统

——建模、估计与控制

韩建达 何玉庆 赵新刚 著



科学出版社

移动机器人系统 ——建模、估计与控制

韩建达 何玉庆 赵新刚 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要阐述地面、水面、空中等移动机器人动力学建模、估计与控制共性方法。全书共 10 章:第 1、2 章是绪论和相关数学知识;第 3 章介绍广义移动机器人的建模方法,并给出了几种典型移动机器人动力学模型;第 4、5 章分别介绍无色卡尔曼滤波及集员滤波两种非线性估计方法;第 6~9 章为控制部分,分别阐述线性自适应鲁棒控制、加速度反馈控制、模型预测控制、非线性自适应控制等内容;第 10 章讨论在线估计与控制方法在几类移动机器人中的应用。书中不仅对多种创新方法进行了论述与分析,同时结合具体机器人平台给出了实现方案以及仿真、实验结果,为书中理论方法的实际应用提供了依据和参考。

本书内容丰富、叙述详细,可作为自动控制、机器人学等相关领域研究生、高年级本科生的教材或参考书,也可供有关科研技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

移动机器人系统:建模、估计与控制/韩建达,何玉庆,赵新刚著. —北京:科学出版社,2011.6

ISBN 978-7-03-031280-8

I. ①移… II. ①韩…②何…③赵… III. ①机器人技术 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 102107 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:张凤琴
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张:23 1/4

印数:1—2 500 字数:456 000

定价:82.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书系统地介绍了移动机器人这种典型非线性系统的动力学建模、模型不确定性估计以及高性能控制方法,特别注重理论方法与具体机器人平台相结合,是作者十多年来从事相关研究工作的总结。书中列举了大量的仿真以及实验实例,不仅可以加深读者对理论方法的理解,而且对于这些方法应用于工程实际也具有一定的指导意义。

继工业机器人之后,服务机器人的快速发展是近十年来机器人学领域的主要趋势。而作为服务机器人的最主要分支之一——特殊服务环境下的机器人,正在不断地走向成熟乃至实际应用。这种机器人最典型的特征之一是移动能力,特别是在动态、非结构环境下的移动能力。如何克服环境的不确定性(包括机器人自身动力学不确定性以及外部工作环境的不确定性)对机器人性能的影响,就成为当前机器人学研究领域的一个重要研究内容。这些机器人的动力学模型有哪些特点,有哪些新出现的方法和技术可以用于提高它们的控制品质,这些方法的可行性有效性又如何,这些可能都是相关专业的读者所关心的问题。本书的目的就在于使读者熟悉一些经过实验验证的方法和结论,帮助读者深入到这个领域并跟上新的进展。

本书的结构安排如下:第1、2章是绪论和相关数学知识,主要介绍本书的背景以及后面章节所需要的主要数学知识;第3章是建模部分,介绍广义移动机器人的建模方法,并给出了几种典型移动机器人动力学模型;第4、5章是非线性估计方法部分,分别介绍无色卡尔曼滤波及集员滤波两种预测估计方法;第6~9章为控制部分,分别阐述线性自适应鲁棒控制、加速度反馈控制、模型预测控制、非线性自适应控制等内容;第10章从状态-参数联合估计、基于在线参数估计的自适应控制、基于模型差估计的自适应控制以及故障因子在线估计与容错控制等几个方面讨论在线估计方法在几类移动机器人系统中的应用。

本书作者对以下人士表达诚挚的谢意:王越超研究员,感谢他持之以恒的鼓励和帮助;Peter W. L. Xu教授、Mark E. Campbell教授、John Weng教授,感谢他们在联合研究的过程中给予的建议和帮助;感谢研究团队成员宋崎、姜哲、周波、齐俊桐、宋大雷、彭艳、丁其川和谷丰等,他们完成了本书部分内容的理论推导、仿真与实验工作。

由于移动机器人控制理论内容繁多,本书仅仅是介绍了其中几个我们经过改进和验证的方法,难免有不当之处,诚恳欢迎各位专家学者给予批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	8
第 2 章 数学知识	9
2.1 概率论基础	9
2.1.1 基本概念	9
2.1.2 随机变量	10
2.1.3 均值和方差	12
2.1.4 高斯分布	13
2.1.5 随机过程	14
2.2 线性矩阵不等式	15
2.3 集合运算	18
2.4 集值分析基础	19
参考文献	22
第 3 章 典型移动机器人系统建模	24
3.1 移动机器人典型建模方法	24
3.1.1 移动机器人典型模型结构	24
3.1.2 刚体动力学建模方法	25
3.1.3 驱动装置的动态模型	37
3.2 旋翼飞行机器人动力学模型	40
3.2.1 旋翼飞行机器人的刚体动力学模型	41
3.2.2 空气动力学	44
3.2.3 旋翼飞行机器人简化模型	47
3.3 水面移动机器人动力学模型	47
3.3.1 水面移动机器人六自由度刚体动力学模型	48
3.3.2 平面三自由度刚体动力学模型	51
3.4 地面移动机器人动力学模型	52
3.4.1 正交轮式全方位地面移动机器人的动力学	52
3.4.2 包括滑动效应的履带式地面移动机器人运动学模型	54
参考文献	57

第 4 章 基于卡尔曼滤波的状态-参数估计方法	59
4.1 卡尔曼滤波基本原理	60
4.1.1 贝叶斯估计理论	60
4.1.2 卡尔曼滤波	62
4.2 扩展卡尔曼滤波	64
4.3 无色卡尔曼滤波	66
4.3.1 无色变换	67
4.3.2 无色卡尔曼滤波算法	68
4.3.3 平方根无色卡尔曼滤波算法	70
4.3.4 无色变换的精度分析	71
4.3.5 无色卡尔曼滤波算法稳定性	74
4.4 自适应无色卡尔曼滤波	83
4.4.1 自适应滤波算法	83
4.4.2 基于 MIT 的自适应 UKF 算法	83
4.4.3 MS-AUKF	88
4.5 数值仿真	91
4.5.1 状态估计	91
4.5.2 滤波算法性能比较	94
4.6 本章小结	96
参考文献	96
第 5 章 集员滤波的状态-参数估计方法	99
5.1 集员滤波	100
5.2 扩展集员滤波	102
5.3 基于 UD 分解的自适应扩展集员滤波方法	104
5.3.1 扩展集员算法的 UD 分解形式推导	104
5.3.2 滤波参数的自适应更新方法	108
5.4 数值仿真	111
5.5 在线估计共性方法比较	116
5.5.1 UPF 估计方法	117
5.5.2 比较研究	119
5.6 本章小结	124
参考文献	125
第 6 章 面向移动机器人的鲁棒保性能控制	128
6.1 基于 LMI 的状态反馈控制基础知识	128
6.1.1 几种性能指标	128

6.1.2	状态反馈控制的 LMI 条件	130
6.1.3	鲁棒状态反馈控制的 LMI 条件	133
6.2	具有时不变不确定性的线性系统控制方法	135
6.2.1	问题描述	135
6.2.2	自适应鲁棒 H_∞ 控制器设计	136
6.2.3	自适应鲁棒 H_2 控制器设计	140
6.2.4	自适应鲁棒保性能控制器设计	143
6.2.5	旋翼飞行机器人航向控制的应用仿真	146
6.3	具有时变不确定性的线性系统控制方法	155
6.3.1	问题描述	155
6.3.2	自适应鲁棒 H_∞ 控制器设计	157
6.3.3	自适应鲁棒 H_2 控制器设计	161
6.3.4	自适应鲁棒保性能控制器设计	165
6.3.5	仿真试验	169
6.4	本章小结	174
	参考文献	174
第 7 章	基于加速度反馈的非线性系统鲁棒控制	176
7.1	加速度信号的在线估计	177
7.1.1	RLSN 方法	178
7.1.2	卡尔曼滤波	179
7.1.3	牛顿-卡尔曼滤波加速度估计方法	180
7.1.4	加速度估计试验	181
7.2	高增益加速度反馈鲁棒控制	187
7.2.1	高增益加速度反馈控制基本原理	187
7.2.2	关节加速度反馈控制	187
7.2.3	试验与分析	190
7.2.4	高增益加速度反馈在全方位轮式移动机器人系统上的应用	193
7.3	非线性欠驱动移动机器人系统加速度反馈控制	196
7.3.1	常规的高增益加速度反馈存在的问题	196
7.3.2	基于前置滤波器的加速度反馈控制	198
7.4	旋翼飞行机器人仿真范例	209
7.4.1	旋翼飞行机器人模型转换	209
7.4.2	控制器设计	212
7.4.3	仿真结果	214
7.5	本章小结	223

参考文献	223
第 8 章 基于控制 Lyapunov 函数的非线性控制	226
8.1 控制 Lyapunov 函数	227
8.2 基于控制 Lyapunov 函数的非线性控制器设计	232
8.2.1 Sontag 的方法	233
8.2.2 Freeman 的方法	234
8.3 广义逐点最小范数控制器设计	235
8.4 鲁棒广义逐点最小范数控制器	237
8.4.1 参数不确定系统的鲁棒广义逐点最小范数控制	237
8.4.2 H_∞ 鲁棒广义逐点最小范数控制	241
8.4.3 联合鲁棒广义逐点最小范数控制	243
8.5 控制 Lyapunov 函数的获取方法	244
8.6 仿真试验	246
8.6.1 旋翼飞行机器人平面动力学模型	246
8.6.2 广义逐点最小范数控制	246
8.6.3 鲁棒广义逐点最小范数控制	251
8.7 本章小结	254
参考文献	254
第 9 章 实时非线性模型预测控制	257
9.1 非线性预测控制	258
9.2 广义逐点最小范数控制器的解析表达	260
9.3 引导函数 $\xi(x, \theta)$ 的选取	263
9.4 鲁棒非线性预测控制	264
9.4.1 可反馈线性化系统	265
9.4.2 严格反馈型系统	267
9.4.3 鲁棒预测控制	269
9.5 实现问题	269
9.5.1 优化过程频率选取	270
9.5.2 数值积分	271
9.5.3 指标函数	271
9.6 算法性能评估	272
9.7 在移动机器人系统上的仿真范例	275
9.7.1 地面移动机器人系统	275
9.7.2 旋翼飞行机器人系统平面动力学模型的非线性预测控制仿真	277
9.8 本章小结	284

参考文献	284
第 10 章 基于在线估计的非线性自适应控制	287
10.1 非线性系统的状态-参数联合估计	287
10.2 基于主动建模的控制	292
10.2.1 基于主动建模的控制策略结构	292
10.2.2 基于主动建模的正交轮式移动机器人跟踪控制	293
10.2.3 基于主动建模的履带式地面移动机器人滑动补偿问题	297
10.2.4 基于主动建模的移动机器人运动模型的镇定	305
10.2.5 基于主动建模的水面移动机器人跟踪控制	311
10.3 模型差在线估计与控制	318
10.3.1 旋翼飞行机器人	319
10.3.2 水面移动机器人	337
10.4 故障诊断及容错控制	345
10.4.1 执行器健康因子(AHCs)在线优化估计	346
10.4.2 执行器软性故障重构控制方法	347
10.4.3 试验验证及结果分析	349
10.5 本章小结	355
参考文献	355
作者团队发表的相关论文	359

第 1 章 绪 论

自动控制的应用与发展是人类社会走向技术文明的重要标志之一,同时自动控制理论也是人类认识自然、改造自然的最好工具之一。从刀耕火种的年代起,人们就尝试着利用各种手段省时省力地做更多的事情。在数千载的生产过程与实践,各种标志着人类社会进步的用以节省力气、提高生产效率的工具不断出现。18世纪末期工业革命的到来,为自动控制的发展带来了巨大的动力。1788年,为了解决工业生产中蒸汽机的速度控制问题,瓦特在自己发明的蒸汽机上安装了一个飞轮,并将它与蒸汽机的阀门连接在一起。这样当蒸汽机的转速太快时,飞轮升高,使阀门开得小些,蒸汽机就会减速,这个装置就是在反馈控制的历史上著名的离心调速器。

瓦特第一次明确地将反馈概念应用在离心调速器的设计中,因此很多学者将其看做自动控制技术诞生的重要标志。但自动控制作为一门学科真正出现在科技舞台,则需要追溯到一百多年以后,美国数学家维纳与墨西哥生物学家罗森布卢埃特经过1934~1947年13年的研究,出版了自动控制理论的两部奠基性著作——《人有人的用处——控制论和社会》^[1]、《控制论(或关于在动物和机器中控制和通讯的科学)》^[2]。

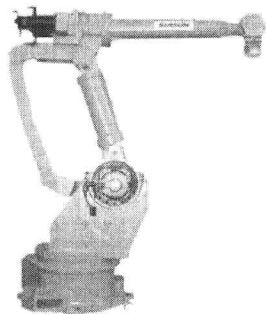
经过半个多世纪的发展,如今自动化技术已经在各个领域大显身手,飞机导航、交通运输、导弹控制、工业制造,甚至很多社会问题中,都能发现自动控制理论的身影。自动控制技术正在不断地受到更多的来自各个领域的学者及工程师们的重视,并且发挥着其他学科所无法替代的作用。

自动控制技术所要解决的主要问题是:针对被控对象,设计合适的控制律,使闭环系统稳定并且满足一定的性能指标要求。它的发展大体上经历了经典控制理论、现代控制理论和后现代控制理论三个阶段^[3~7]。目前,在基础数学理论及社会需求的共同作用下,控制技术基本上在沿着两个方向并行发展:一是探索更深入、更完备、具有更强适应性与鲁棒性的控制方法;二是将现有的控制理论与具体的对象相结合,解决具体对象中的特殊问题,使之更好地应用到实践中去。事实上,这两个发展方向并不是孤立的,而是相互促进的。特别是出现一类新的被控对象时,它所包含的问题以及对控制技术提出的新需求,会推动相关理论的发展,甚至会形成新的、具有一定共性的控制方法体系。

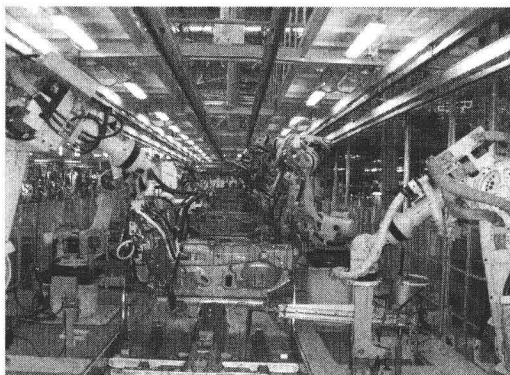
机器人或许就是这样一类新的控制对象。自20世纪60年代初问世以来,机器人技术显示出了巨大的生命力。在短短不到50年的时间里,得到了飞速的发展

以及广泛的应用^[8~12]。同时,随着应用领域的不断拓展,机器人吸引着大量的控制方法与技术研究,也推动着先进控制技术的快速发展,可以这样划分:

(1) 机器人诞生以后至 2000 年以前,针对工业机器人的研究占据了绝对的优势。以工业操作臂(manipulator)^[13]、自动导引车(autonomous guided vehicle, AGV)^[14]为代表,如图 1.1、图 1.2 所示,工业机器人在汽车、电子等制造业领域对提高产品质量、降低成本、提高效率都发挥了巨大的作用。



(a) 典型的点焊机器人



(b) 工作现场

图 1.1 一种典型的点焊机器人及其工作现场



(a) AGV



(b) 工作现场

图 1.2 一种 AGV 及其工作现场

这类工业机器人的工作环境有一个共同的特点:结构化环境,即可以预先精确地描述,几乎不存在非预见性事件发生的环境。工业机器人在性能上更加注重高速度、高精度,所以 20 世纪中后期针对机器人的控制策略研究,大多集中在如何提高其在高速、重载情况下的跟踪精度等方面。

(2) 进入 21 世纪,机器人的发展明显呈现出一种新的态势:机器人化(robot-

ic)的概念正在加速与传统产业相融合、正在从工业领域扩展到社会发展的其他领域,图 1.3、图 1.4 给出几个方面的示例。



图 1.3 机器人化概念示例

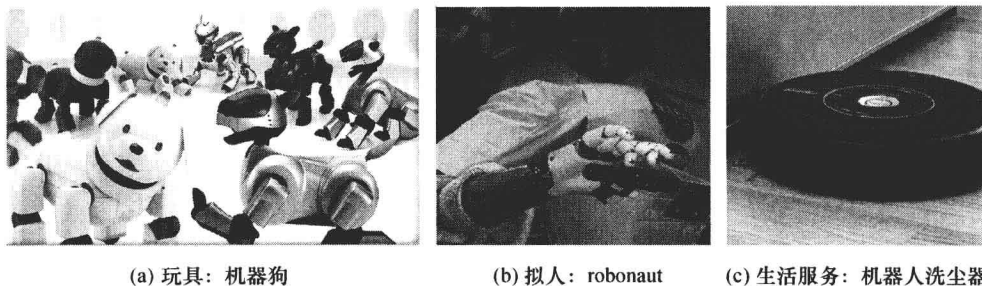


图 1.4 机器人化系统举例

在机器人化系统中,最引人关注的方向之一就是“机器人化移动/作业平台”,即广义的移动机器人系统,如图 1.5 所示。这里所谓的“广义”,是指这类机器人的

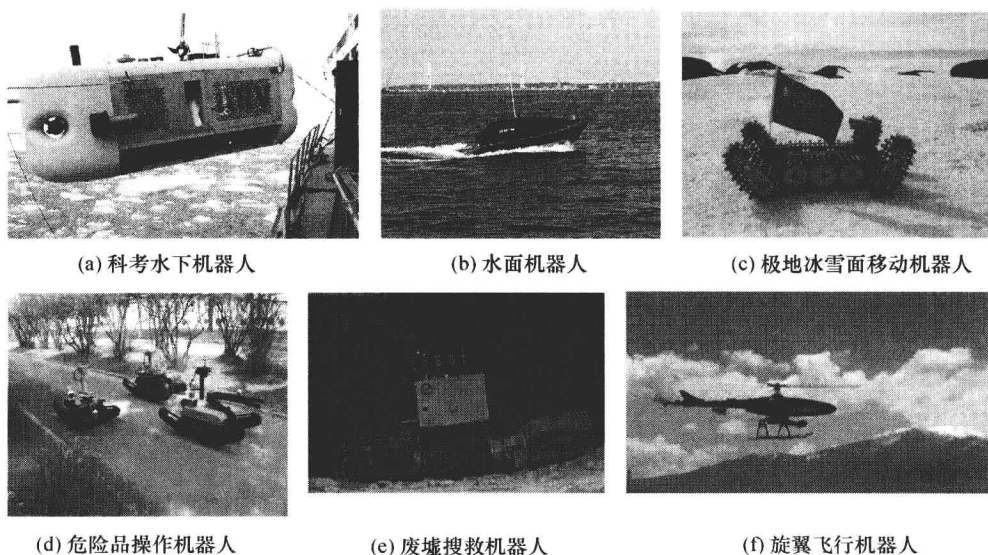


图 1.5 部分移动机器人

工作范围可以涵盖水下、水面、地面(野外)、地下、空中,甚至太空等领域。这种广义移动机器人的研究已成为国防安全、公共安全、灾难救援、科学探测、社会服务等领域的迫切需求。

广义移动机器人在动态、非结构环境中完成使命所需要的自主行为能力是其区别于工业机器人的最主要特性之一。这里将移动机器人的自主行为能力定义为:在动态、非结构环境中,在尽量减少人为干预的条件下,机器人以优化的方式完成使命的能力。目前,如何提高自主行为能力已经成为机器人学领域的重要研究方向之一。我们把针对移动机器人自主行为能力的研究划分成两个层面:一是针对动力学不确定因素的实时估计以及估计结果与控制的有效融合问题,其目的是提高机器人的控制品质与跟踪性能;二是针对环境与使命不确定性的机器人自主控制问题,其目的是提高机器人自主适应环境、优化行为、自主完成使命的能力。本书研究的内容主要针对第一个问题;而关于第二个问题的相关内容,将在我们的下一部专著中介绍。

广义移动机器人系统自主性研究的典型框架如图 1.6 所示。针对不同的移动机器人平台,尽管它们的工作空间、驱动方式可能各不相同,但是它们的底层鲁棒/自适应/优化控制策略、中层自主行为以及上层自主使命决策等都具有一定的共性。因此这种共性方法体系的建立及不断完善是目前移动机器人研究的最主要内容,同时也是制约机器人学理论体系进一步完善的瓶颈问题。当然,这些问题的逐步解决也将是推动移动机器人走向实用化的驱动力。

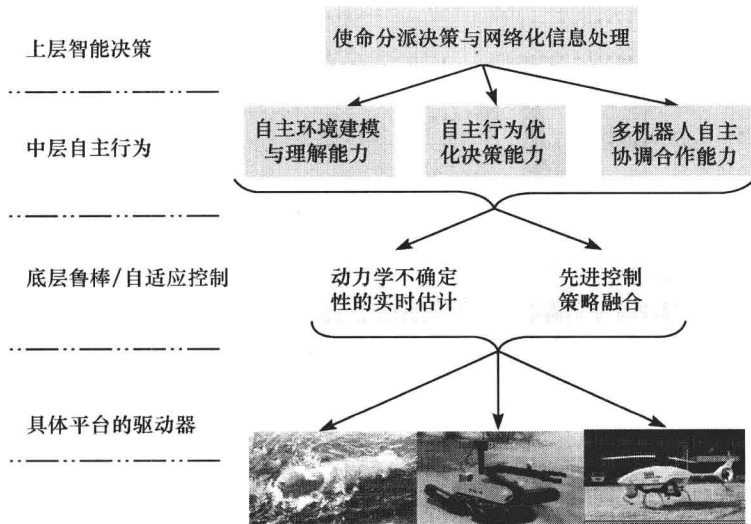


图 1.6 移动机器人自主控制系统结构

鲁棒性/自适应性、优化性是底层控制研究的主要出发点。通常,控制策略的

设计是基于一个已知模型展开的。然而,广义移动机器人系统动力学模型呈现出的特点是:①非线性、包括大量时变参数和强交叉耦合;②通常无法精确建立数学模型,模型中包含大量的不确定因素;③模型结构过于复杂,导致无法利用已有的控制理论进行有效的控制策略分析与设计。

目前,非线性不确定性系统的鲁棒/自适应控制问题仍然是控制理论研究的热点和难点之一^[3,15,16]。非线性最优控制思想仍然停留在理论阶段,这主要有两个原因:①非线性系统的最优控制问题需要求解偏微分方程,其计算复杂性过大,对于快时变系统很难满足实时性要求;②最优控制本质上是一种开环控制思想,因此如何解决其在存在不确定因素条件下的鲁棒性问题,一直困扰着其实际应用。预测控制是最优控制思想与实践接轨很好的桥梁,多年的成功应用使其得到了越来越多的关注,但其本身存在的稳定性、实时性及鲁棒性问题仍大大限制其在移动机器人系统上的发展^[17,18]。

本书正是以广义移动机器人这种典型的机电系统为对象,结合机器人学国家重点实验室现有的地面、水面、空中等移动机器人平台,从动力学建模方法出发,深入、详细地介绍经过仿真与实验验证的移动机器人底层控制方法。具体包括两个方面的内容:①针对非线性系统的、具有实时性的、噪声自适应鲁棒性的状态-参数估计方法;②面向鲁棒的、自适应的、优化的移动机器人控制方法。

我们把图 1.6 更明确地表述为图 1.7。对于常规控制系统,其控制作用的好坏取决于有关被控对象的先验知识,对被控对象越了解,所设计出的控制器的性能就会越高。而当被控对象处于动态环境中甚至是故障状态时^①,只有了解系统目前的状态,才能设计出保证系统稳定和具有较高性能的控制策略。因此,对于这类

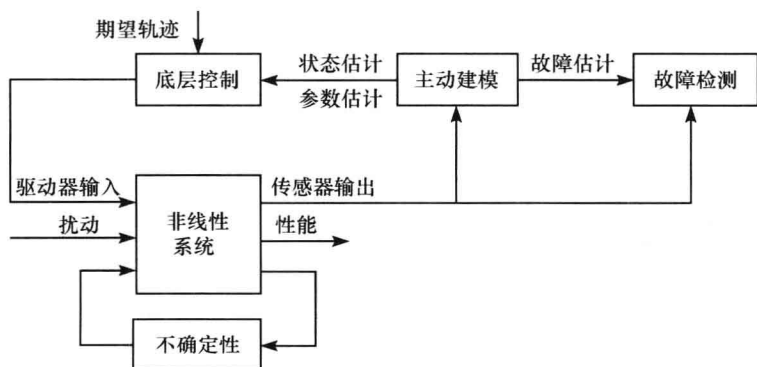


图 1.7 移动机器人底层控制系统结构

① 对于移动机器人系统中的某一部件,如果定义 b 是其健康状态因子,并且 $b=0$ 代表该部件完好, $b=1$ 代表该部件完全故障,那么 $b \in (0,1)$ 表示该部件发生“软性故障”。在软性故障情况下,如何通过重构控制策略,使移动机器人充分发挥剩余功能,也是对其底层控制的重要要求之一。

需要面对各种不可预知突发事件的系统,在线建模是非常重要的技术之一。所谓在线建模,是指利用实时预测估计策略,不断地提取系统运行过程中有关模型的信息,不断地完善系统当前的模型信息,使(离线)参考模型能够更准确地反映系统的实际情况。在线建模可以为控制率的参数实时调整乃至控制策略的重构提供相对准确的系统先验知识。

通常,在线主动建模技术能够为控制系统提供以下三方面的信息:

(1) 状态估计:针对测量状态的滤波及针对非测量状态的估计预测,是(全)状态反馈控制的基础;

(2) 预测模型:针对时变参数的预测模型,是故障检测及基于(时变)模型控制的基础;

(3) 不确定因素:估计状态及预测模型中所包含的不确定因素,是鲁棒控制的基础。

应该指出,移动机器人系统对其建模技术提出了很高的要求。首先,由于需要为控制器提供当前系统的真实信息,使控制器能够感知到外界的扰动、内部的故障,故建模技术必须是在线进行。因此,建模所依赖的预测估计方法的实时性至关重要。其次,由于机器人工作在复杂环境中,其传感器信息中包含复杂的过程噪声,因此,对过程噪声分布具有自适应性也是建模方法必须具备的性能。再次,移动机器人系统通常是结构复杂的非线性系统,所以要求建模方法必须能够适应非线性。为此,针对广义移动机器人动力学模型的特点,本书重点阐述了两种具有噪声自适应性的非线性预测估计方法,并介绍了其如何用于在线建模。

在线建模技术只是为移动机器人应对高度非线性、不确定性环境,以及进行故障补偿提供了定量依据。但是,如何将这些不确定因素融入到控制策略中以实现稳定、高品质的控制,是另一项主要工作。前面我们曾阐述,鲁棒/自适应和优化是控制理论发展的两条主线,同时也是几乎所有控制策略设计的两条准则,在移动机器人系统控制中也是如此。传统的鲁棒控制和自适应控制方法在移动机器人系统的底层控制中都有应用。鲁棒控制方法(如 H_∞ 控制方法、 H_2 控制方法等)一般都假设系统的不确定性属于一个可描述集,如有界且上界已知等。一般来说,对所考虑集合内的个别元素,传统的鲁棒控制所设计的固定增益控制器并不能达到最优的控制效果。而且,当所考虑的不确定参数越多、不确定范围越大时,采用传统鲁棒控制方法所设计的固定增益控制器保守性越大,甚至无法确保不确定系统的稳定性。因此,传统的鲁棒控制器设计方法是比较保守的一种控制策略。对于移动机器人系统中的参数不确定性问题,自适应控制方法是另一种典型的控制策略。然而在实际应用中,由于机器人中未建模动态,过程噪声或扰动的统计特性远比设计时所设想的情况更复杂,以及持续激励条件和严格正实条件等“理想条件”被打破,这将会导致自适应控制算法的失稳。此外,对于大多数移动机器人系统,在其

控制过程中由于模型的简化,不可避免地引入未建模不确定因素。通常未建模不确定因素都具有时变性,以及与机器人运动状态、控制变量的耦合性,这进一步增加了鲁棒与自适应控制策略的设计难度。针对鲁棒控制与自适应控制的优缺点,当前移动机器人控制的一个主要研究方向是将二者进行有机结合,设计具有一定鲁棒性和自适应机制的所谓鲁棒/自适应控制器。同时应该指出,常规的鲁棒控制方法几乎都是建立在扰动信息未知的前提下的。因此我们有理由相信,如果能够通过在线建模获取相关扰动信息,应该可以进一步改善扰动抑制效果。但实际上,对于这方面的研究工作到目前还很少。一方面是由于扰动信息一般来说不易获取;另一方面,至今还没有一个理论方法体系能够将扰动信息加入到控制器中来,尽管线性系统 H_∞ 控制中的全信息控制涉及了一些这方面的研究,但对于非线性系统来说,研究工作和成果可以说是寥寥无几。为此,针对广义移动机器人的鲁棒/自适应控制问题,本书主要介绍基于线形矩阵不等式的鲁棒/自适应控制策略和基于加速度反馈的鲁棒控制两种方法。

再来看移动机器人系统的最优控制问题。我们前面已经提到,最优控制方法本身的缺陷导致其很难在实际移动机器人系统的底层控制中得到应用。预测控制是用来解决这一问题的有效办法之一。预测控制是在最优控制思想的基础上发展起来的,它是根据已知系统模型以及当前的状态或输出测量值、未来一段时间的可行输入以及预测系统在未来的行为,以此构建一个有限时域最优控制。尽管预测控制在实践中得到了一定的应用,但仍然存在一些不足之处,包括:①预测控制算法的闭环稳定性;②非线性预测控制中在线求解受限非凸优化问题时带来的巨大的计算负担;③预测控制算法的鲁棒性问题。预测控制的鲁棒性问题尤为关键,因为任何实际系统都存在着或多或少各种各样的不确定性,但遗憾的是,鲁棒版本的预测控制算法在实现上有着巨大的障碍。我们知道,预测控制是在系统模型精确已知的情况下进行的,而对于具有不确定性的系统,准确预测系统的行为本身就成为一项极具挑战性的工作。另外,如何在具有不确定环节时确保预测控制闭环系统的稳定性本身也是一个开放的研究课题。本书将针对上述问题,介绍一种新的适用于移动机器人系统的鲁棒预测控制方法,同时作为该方法的基础,还介绍了一种新的控制器设计思想——基于控制 Lyapunov 函数的非线性控制策略。

总之,本书以非结构环境下移动机器人为对象,在简要介绍地面、水面、空中移动机器人动力学建模共性方法的基础上,针对动力学不确定因素这一共性问题,介绍并深入分析了一系列在线预测估计以及鲁棒、优化控制方法。为了加深读者对这些方法可实现性、有效性的理解,我们结合机器人学国家重点实验室的实验平台,对每种方法如何实现,以及相关的仿真、实验结果都进行了介绍。应该着重指出的是,本书所介绍的建模、估计、控制方法,都经过实体平台的实验验证。

参 考 文 献

- [1] 维纳. 人有人的用处——控制论和社会. 陈步,译. 北京:商务印书馆,1978.
- [2] 维纳. 控制论(或关于在动物和机器中控制和通讯的科学). 郝季仁,译. 北京:科学出版社,1963.
- [3] Zhou K M, Doyle J C, Glover K. Robust and Optimal Control. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995.
- [4] Franklin G F, Powell J D, Emami N A. Feedback Control of Dynamic Systems. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.
- [5] Chen C T. Linear System Theory and Design. New York: Oxford University Press, 1999.
- [6] 段广仁. 线性系统理论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [7] 郑大钟. 线性系统理论. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [8] Spong M W. Robot Dynamics and Control. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [9] 熊有伦. 机器人技术基础. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996.
- [10] Civita M L. Integrated Modeling and Robust Control for Full-Envelope Flight of Robotic Helicopters. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2003.
- [11] 杜志江, 孙立宁, 富历新. 医疗机器人发展概况综述. 机器人, 2003, 25(2): 182—187.
- [12] Siegwart R, Nourbakhah I R. Introduction to Autonomous Mobile Robots. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 2004.
- [13] Paul R P. Robot Manipulator: Mathematics, Programming, and Control. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1981.
- [14] Durrant H F. An autonomous guided vehicle for cargo handling applications. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21: 75—85.
- [15] Astrom K J. Model uncertainty and robust control. [http://www. control. lth. se/~kja/ modeluncertainty. pdf](http://www.control.lth.se/~kja/modeluncertainty.pdf).
- [16] 冯纯伯, 张侃健. 非线性系统的鲁棒控制. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice, 2003, 11(7): 733—764.
- [18] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, et al. Constrained model predictive control: Stability and optimality. Automatica, 2000, 36(6): 789—814.