机器人编队控制方法研究



韩青 编著

The Methodology Research of Robot Formation Control

上海交通大學出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

前　言

机器人技术属于交叉学科，涉及机械、电子、计算机、控制、通信、人工智能等多个学科和技术领域。自1959年世界上第一台工业机器人诞生以来，机器人的发展已取得了举世瞩目的成就。随着现代科技日新月异的发展，人类活动范围逐渐扩大，遍及陆、海、空等众多领域。如何在危险、复杂的领域中实现安全、高效的探索，如何开发、利用有限的资源，已经成为事关国家经济发展、国防安全建设的重要战略性任务。而智能移动机器人正逐渐代替人类，直接进入某些危险、复杂环境。作为衡量一个国家科技发展水平的重要标志，近年来，机器人技术的发展受到世界各国的高度重视，而且机器人编队已在国防、工业、农业、生活等领域广泛应用，因此针对多机器人关键技术的研究已成为近几年的研究热点之一。本书是在这样的背景下撰写完成的。

本书分别围绕领航者轨迹是理想轨迹和非理想轨迹的多机器人编队控制，采用非线性系统秩理论和面元分析法理论，对基于纯角度观测信息的多机器人编队控制重点、难点问题展开深入研究。针对领航者轨迹为理想轨迹，研究了基于纯角度观测信息的领航-跟随和级联多机器人领航-跟随编队控制（见第2章～第4章）；针对领航者轨迹为非理想轨迹，研究了领航机器人定位，提出了基于纯角度观测信息的多机器人领航-跟随和级联领航-跟随编队控制方法（见第5章）；针对领航者轨迹为非理想轨迹，研究了基于面元分析法的领航机器人自主导航以及多机器人领航-跟随编队避障（见第6章）。

在编写过程中，本书得到了西北工业大学孙树栋、李天成以及长江师范学院机器人工程学院何仁琪、黄江波的大力支持，他们都对本书提出了宝贵的意见。对

此，表示衷心的感谢。

本书可为机器人工程、自动控制、机械电子工程等专业研究生以及高年级的本科生提供学习与参考，但由于编著者水平有限，书中疏漏和不妥之处恳请广大读者批评指正。

作者

目　录

1　绪论 …… 001
1.1　概述 …… 001
1.2　多机器人编队控制研究方法与发展动态 …… 004
1.2.1　多机器人编队控制方法 …… 004
1.2.2　多机器人编队控制发展动态 …… 008
1.3　基于纯角度观测信息的多机器人编队控制研究现状 …… 009
1.4　本书主要研究内容 …… 010
1.5　本章小结 …… 012

2　基于纯角度观测信息的多机器人编队控制方法 …… 013
2.1　编队控制策略 …… 013
2.2　机器人领航-跟随编队控制及其可观测性 …… 014
2.2.1　“1-1”机器人领航-跟随运动模型 …… 014
2.2.2　李导数及机器人领航-跟随非线性系统可观测性 …… 015
2.3　基于 UKF 的输入-输出状态反馈闭环控制 …… 019
2.3.1　UKF 算法 …… 020
2.3.2　输入-输出状态反馈闭环控制 …… 022
2.4　仿真实验与结果分析 …… 023
2.4.1　实验条件 …… 023
2.4.2　结果分析 …… 026
2.5　实验验证 …… 030
2.5.1　Turtlebot 移动机器人实验平台 …… 031
2.5.2　Turtlebot 移动机器人操作系统 …… 032

2.5.3 实验方案 …… 032
2.5.4 领航机器人做类S形运动实验 …… 033
2.5.5 领航机器人做圆形运动实验 …… 034
2.6 本章小结 …… 035

3 基于纯角度观测信息的多机器人级联编队控制方法 …… 036
3.1 “1-1-1”机器人领航-跟随运动模型 …… 036
3.2 多机器人级联领航-跟随系统可控性 …… 038
3.3 多机器人级联领航-跟随系统可观测性 …… 041
3.4 多机器人级联领航-跟随编队控制 …… 045
3.5 仿真实验与结果分析 …… 045
3.5.1 实验条件 …… 045
3.5.2 结果分析 …… 047
3.6 实验验证 …… 050
3.6.1 领航机器人做8字形运动实验 …… 050
3.6.2 领航机器人做螺旋形运动实验 …… 052
3.7 本章小结 …… 053

4 多机器人级联编队轨迹跟踪控制方法 …… 054
4.1 移动机器人运动模型 …… 054
4.1.1 单个移动机器人运动模型 …… 054
4.1.2 机器人级联领航-跟随运动模型 …… 055
4.2 多机器人级联编队轨迹跟踪控制 …… 057
4.3 仿真实验与结果分析 …… 059
4.3.1 实验条件 …… 059
4.3.2 结果分析 …… 061
4.4 本章小结 …… 065

5 基于领航机器人定位的多机器人编队控制方法 …… 066
5.1 轮式领航机器人定位 …… 066
5.1.1 机器人运动模型 …… 066
5.1.2 基于PF算法的领航机器人定位 …… 067
5.1.3 领航机器人系统的可观测性 …… 068

5.2　多机器人领航-跟随编队控制 …… 071
5.2.1　“1-1”机器人领航-跟随运动模型 …… 071
5.2.2　多机器人领航-跟随编队控制 …… 072
5.3　车式领航机器人定位 …… 072
5.3.1　机器人运动模型 …… 073
5.3.2　领航机器人系统的可观测性 …… 074
5.4　多机器人级联领航-跟随编队控制 …… 078
5.4.1　“1-1-1”机器人领航-跟随运动模型 …… 078
5.4.2　多机器人级联领航-跟随编队控制 …… 079
5.5　仿真实验与结果分析 …… 080
5.5.1　实验条件 …… 081
5.5.2　结果分析 …… 082
5.6　本章小结 …… 091

6　基于面元分析法的多机器人编队避障控制方法 …… 092
6.1　基于面元分析法的领航机器人避障算法 …… 092
6.2　不规则形状障碍物的圆或圆弧最小二乘法拟合建模 …… 094
6.3　多机器人编队避障控制 …… 095
6.3.1　“1-2”机器人领航-跟随运动模型 …… 096
6.3.2　多机器人编队控制 …… 098
6.4　仿真实验与结果分析 …… 098
6.4.1　实验条件 …… 098
6.4.2　结果分析 …… 103
6.5　实验验证 …… 104
6.5.1　SLAM 构图 …… 104
6.5.2　特征提取及轨迹规划 …… 106
6.5.3　机器人自主导航 …… 107
6.6　本章小结 …… 110

7　总结与展望 …… 111
7.1　总结 …… 111
7.2　展望 …… 112

参考文献 …… 114
附录 A …… 125
附录 B …… 127
附录 C …… 133
索引 …… 139

1

绪　论

编队控制是对多机器人协同完成复杂任务的基本要求，是多机器人系统研究中最基本的问题之一，也是学术界和从业者的研究热点，充分说明了机器人编队控制方法研究的必要性和重要性，未来具有良好的应用前景。

1.1　概述

机器人技术属于交叉学科，涉及机械、电子、计算机、控制、通信、人工智能等多个学科和技术领域。自 1959 年世界上第一台工业机器人诞生以来，机器人的发展已取得了举世瞩目的成就。在 1999 年国际自动控制联合大会上，宋健院士指出，“机器人技术的应用和进步是 20 世纪自动控制领域最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化”[1-2]。

作为衡量一个国家科技发展水平的重要标志，近年来，机器人技术的发展受到世界各国的高度重视。2014 年，欧盟规划了“认知系统与机器人技术”研究；2015 年，德国提出了“工业 4.0”高科技战略计划；2011 年，美国启动了“国家机器人计划”；2015 年，美国国家科学基金会再次资助伙伴机器人(co-robot)的研发；2015 年初，日本公布了《日本机器人新战略》，明确提出下一代机器人研究中要努力实现数据终端化、网络化、云计算等技术；2009 年，韩国发布了《服务机器人产业发展战略》，提出努力成为世界三大机器人强国之一的发展目标；2012 年，韩国知识经济部发布了一项为期十年的中长期战略《机器人未来战略 2022》，计划将目前的机器人规模进一步扩大，到 2022 年达到 25 亿韩元的规模。

为推进机器人技术的发展与创新，中国相继推出了多项战略规划并给予了政策支持，如表 1-1 所示。2012 年 4 月，科技部出台《智能制造科技发展“十二五”专项规划》和《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》。这两项规划指出在“十二五”期间重点发展工业和服务机器人新兴产业；在《智能制造科技发展“十二五”专项规划》中，重点攻克一批前沿核心和共性关键技术，研制一批智能化高端装备，并

进行示范应用和产业化；在《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》中，首要发展服务机器人新兴产业，发展公共安全机器人、医疗康复机器人、仿生机器人平台和模块化核心部件等四大任务；2015 年 5 月，《中国制造 2025》出台，强调重点发展包括高档数控机床和机器人在内的十个领域，为机器人产业的发展提供了强有力的政策支持；2015 年 11 月 23—25 日，以“协同融合共融，引领智能社会”为主题的世界机器人大会在北京举办；2017 年 7 月，国务院印发《新一代人工智能发展规划》，规划指出，在把握全球人工智能发展态势的大背景下，应立足国家发展全局，全面增强科技创新基础能力，找准突破口和主攻方向，拓展重点领域的应用深度和广度，全面提升经济社会发展和国防应用智能化水平，重点开展机器人关键共性技术研究。

表 1-1　我国机器人技术与产业相关政策

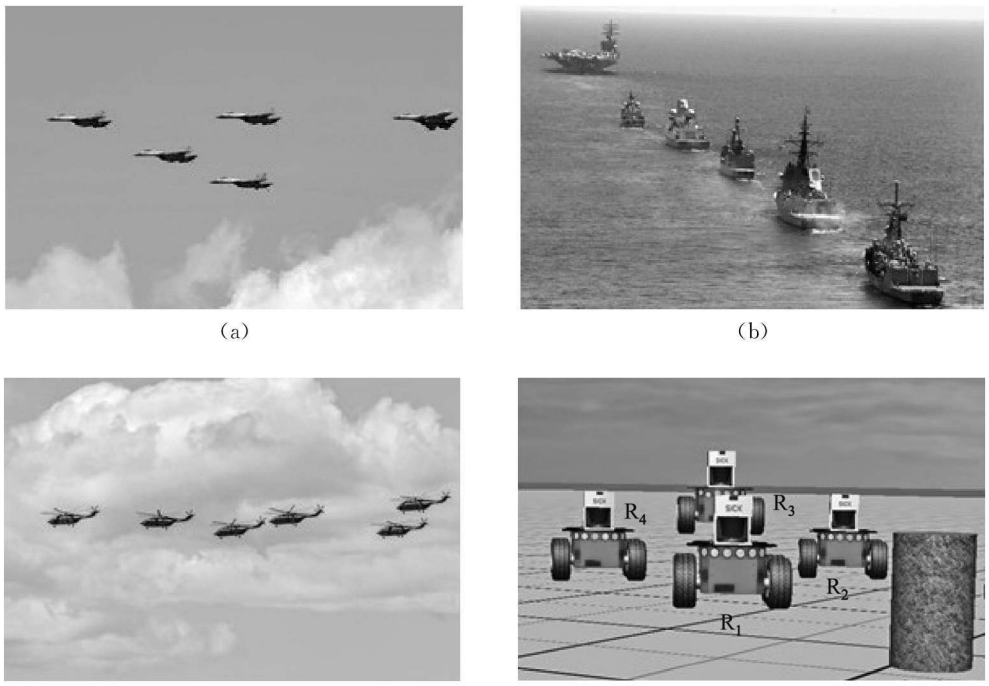
时间	发布部门	政 策 名 称
2012 年 4 月	科技部	《智能制造科技发展“十二五”专项规划》
2012 年 4 月	科技部	《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》
2012 年 5 月	工信部	《智能制造装备产业“十二五”发展规划》
2012 年 7 月	国务院	《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》
2013 年 12 月	工信部	《关于推进工业机器人产业发展的指导意见》
2015 年 5 月	国务院	《中国制造 2025》战略
2017 年 7 月	国务院	《新一代人工智能发展规划》

智能移动机器人是一种具有较强自主规划、自主组织和自适应能力的有效工具。它无须人为介入就能在复杂环境中自主移动，并利用所携带设备完成各种人类难以完成的探索、救援、运输、科学研究等任务。但是随着应用的不断深入，对智能移动机器人的需求趋于多元化，其中对多移动机器人系统的需求愈发强烈。一方面，对于复杂的任务，单个机器人无法独立完成，需要多个机器人的协调合作才能完成；另一方面，多机器人通过相互之间的协调与合作，提高系统的工作效率，如在工作环境发生变化或系统发生局部故障时，多机器人仍可以通过彼此间的协调与合作来完成既定的任务。在这样的背景下，多机器人系统的研究备受青睐。麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology)iRobot 群体机器人研究团队研究出超过 100 个机器人的多机器人系统，并应用于实践[3]。田纳西大学(University of Tennessee)的林恩·E. 帕克(Lynne E. Parker)博士带领其研究团队研发了具有容错能力的 ALLIANCE 系统，理论验证了该系统成员机器人既

可以动态加入又可以退出协作任务的可行性[4]。此外，美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration)[5-6]、西弗吉尼亚大学(West Virginia University)[7]、日本大学(Nihon University)[8]、宾夕法尼亚大学(University of Pennsylvania)[9]、佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)[10]、南加利福尼亚大学(University of Southern California)[11-12]等也对多无人机或多机器人编队控制问题进行了相关研究。同时，国内的许多高校及研究机构对多机器人系统的研究也已经取得了一些较成熟的科研成果。中国科学院沈阳自动化研究所建立了一套多机器人协作装配系统，不仅实现了机器人协作过程中内部成员的控制管理及轨迹规划，还实现了信息交互、分析推理及任务分配[13]。针对多机器人协调问题，上海交通大学自动化研究所研发了一套具有开放性、通用性的分布式协调平台，并对相关问题展开了深入研究[14]。此外，清华大学[15-16]、浙江大学[17]、华中科技大学[18-19]、哈尔滨工业大学[20-22]、中国科学技术大学[23]、国防科学技术大学[24-25]、西北工业大学[26-27]、南京理工大学[28]、华东理工大学[29]、中南大学[30]、北京航空航天大学[31]、北京理工大学[32]、电子科技大学[33]、华南理工大学[34]、哈尔滨工程大学[35-36]、天津大学[37]、南京航空航天大学[38]等高校也都对多机器人(智能体)编队问题进行了深入的研究。与单机器人相比，多机器人系统在有效性、灵活性、适应性、鲁棒性方面具有显著的优越性，因而成为近几年的研究热点之一[39-45]。

多机器人编队控制是解决多机器人协调与合作的切实有效的方法之一。图 1-1 给出了几种典型的多智能体编队应用实例。多机器人编队控制是一个典型的多机器人协调控制问题，也是多机器人系统研究的基础，主要涉及编队如何形成，如何保持以及如何变换三个问题。在执行复杂任务时，良好的编队及协作方式可以促使多机器人快速、高效地完成任务。多机器人编队控制作为多机器人系统的一个重要研究方向，在经历了 20 多年的发展后，在军事、测绘、勘探、海洋环境监测、数据搜集、港口安全、工农业生产、空间探索、交通控制、医疗与服务行业等领域均得到了一定的实际应用[46-48]。任(Ren)等[46]利用相邻机器人的位置信息来实现编队控制，在军事、搜索和营救方面得到了很好的应用。默里(Murray)等[47]分析了多机器编队在监视、搜索、探索、合作侦察、环境监视和协同操作方面的应用，并把编队问题转化为最优控制问题实现编队控制。邓巴宾(Dunbabin)等[48]基于人工势场法实现了编队控制，并用于环境监测和数据搜集。

多机器人编队在各个领域得到了广泛应用，因而引起了国内外研究者的广泛关注。关于多机器人编队控制的国内[49-50]、国外[51-53]综述性文章详细分析了多机器人编队的研究热点、目前及未来应用、控制方法、控制理论、发展动态及未来面临



(a) (b)

(c) (d)

图 1-1 几种典型的多智能体编队应用实例

(a) 空中战机编队 (b) 航母编队 (c) 直升机编队 (d) 机器人编队

的挑战。通过梳理国内外研究可知,基于位置、距离、距离-角度等观测信息的多机器人编队研究居多。而在实际中,角度以外的观测信息有时难以获得,如何利用有限的观测信息达到理想的控制效果已成为一个极具研究价值的科学问题。最早基于纯角度信息来实现编队控制的研究始于 2002 年[54],基于视觉传感器来获得角度信息的多机器人协作定位[55]的相关研究则始于 2005 年。本书针对这个关键性问题,以多机器人编队控制为研究对象,提出了一种基于纯角度观测信息的多机器人编队控制方法,即仅利用跟随机器人观测领航机器人的角度信息,而不需要距离等更多观测信息的编队控制方法。该方法既可以有效提高运算效率又可以进一步完善多机器人编队控制与协作定位的理论和实现方法。

1.2 多机器人编队控制研究方法与发展动态

1.2.1 多机器人编队控制方法

多机器人编队控制可分为编队调节控制和编队跟踪控制[56]。多机器人在运

动过程中既可以保持固定编队，又能在障碍物环境下实现编队变换，这属于编队调节控制的范畴[57-59]。编队跟踪控制是编队控制的另一项重要内容，重点研究多个机器人在形成编队的同时跟踪一个期望目标的问题，已引起研究者的广泛关注[60-67]。根据跟踪目标的不同，可大致分为期望速度跟踪[60-61]和期望轨迹跟踪[62-67]。编队轨迹跟踪的目标是使多机器人保持理想编队的同时能够跟踪参考轨迹，为使多机器人在运动过程中达到良好的跟踪效果，每个机器人需要与其相邻的机器人进行信息交换[68-69]。领航-跟随法[62-67]是目前普遍采用的轨迹跟踪方法。刘(Liu)等[62]提出了一种运动规划方法，实现了有限时间内多机器人编队的有效跟踪。可汗(Khan)等[63]提出了一种优化方法，实现了非完整约束的多机器人编队控制和跟踪。埃尔南德斯·马丁内斯(Hernandez-Martinez)等[64]提出了两种基于近似速度的多机器人编队跟踪控制律，实现了多机器人编队控制和跟踪。王(Wang)等[65]设计了一种编队跟踪算法，解决了二阶多机器人系统的编队跟踪问题。彭(Peng)等[66]提出了一种基于一致性的分布式编队控制方法，实现了多机器人编队控制和跟踪。葛(Ge)等[67]提出了一种基于人工势场的编队跟踪控制方法，实现了约束环境下多机器人编队控制和跟踪。然而，文献[62－67]多集中于对单个领航机器人和单/多个跟随机器人组成的单级编队进行研究，而少有文献研究每级都由单个领航机器人和单/多个跟随机器人组成的级联编队。

从多机器人系统控制的角度出发，多机器人编队控制又可分为集中式控制和分布式控制两类。对于集中式控制，多机器人系统中的每个机器人都要与编队中其他机器人进行信息交互，如自身位置、速度、姿态和运动目标等信息。而对于分布式控制，每个机器人只需将自己的位置、速度、姿态和运动目标等信息与编队中相邻的机器人进行信息交互，同时每个机器人利用局部信息协调自身的运动，避免与其他机器人发生碰撞。在集中式控制中，每个机器人都能获取整个编队的信息，有利于全局队形的分析，控制效果好，但也存在通信量和运算量大、算法复杂等问题；而在分布式控制中，各机器人只需获取相邻机器人的信息，通信量和运算量较小，有利于实时控制，但相对稳定性较差。虽然分布式控制效果不如集中式控制好，但其控制结构简单、可靠，交互信息量小，有利于避免信息冲突。此外，分布式控制策略具有更强的适应性，在面临由于任务变更或机器人故障而需要旧机器人退出或新机器人加入编队等突发情况时，具有较好的扩充性及容错性。正是分布式控制具有可将突发事件的影响限制在有限范围内的优势，促使了关于多机器人编队信息交互的研究热点逐渐由集中式控制转向分布式控制。能同时解决信息交互、碰撞问题的分布式控制，是未来多机器人编队信息交互策略发展的方向，已引起研究者的广泛关注[70-71]。

多机器人编队的主要控制方法如图 1-2 所示，主要包括领航-跟随(leader-follower)法[72-84]、基于行为(behavior-based)法[85-86]、人工势场(artificial potential)法[87-88]、虚拟结构(virtual structure)法[89-90]、图论(graph theory)法[91]等。其中领航-跟随法、基于行为法和人工势场法适用于分布式控制，而虚拟结构法和图论法适用于集中式控制。

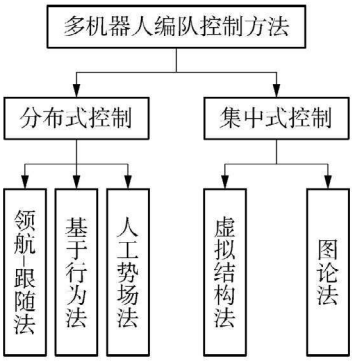


图 1-2 多机器人编队的主要控制方法

1) 领航-跟随法

领航-跟随法是指在多机器人系统中跟随机器人跟随领航者运动的多机器人编队控制方法。该编队控制方法将编队控制问题转化为跟随机器人跟随其领航者的朝向和位置问题，便于运用标准的控制论知识研究和分析其稳定跟踪误差。领航-跟随法的优点是仅需要给定领航者的行为或轨迹就可控制整个机器人群体的行为。根据观测量的不同，领航-跟随编队控制可分为基于距离、位置、角度、距离-角度、距离-距离-角度观测信息的编队控制。康(Kang)等[72-74]研究了基于距离信息的多四旋翼及多机器人编队控制。阿兰达(Aranda)等[75-77]对基于位置信息的多机器人编队控制进行了研究。郑(Trinh)等[78-80]研究了基于角度信息的多机器人编队控制。金(Jin)等[81-83]研究了基于距离-角度信息的多机器人编队控制。陈(Chen)等[84]研究了基于距离-距离-角度信息的多机器人编队控制。

2) 基于行为法

基于行为的控制方法通过设计机器人的简单行为以及局部控制规则，使机器人群体产生如编队保持、轨迹跟踪和避碰等所需的整体行为。该方法首先定义了一个包含机器人简单行为的行为集，而最终的行为输出则由对每个基本行为的重要性和优先级加权计算确定。基于行为的控制方法的优点是当机器人具有多个竞争性目标时，采用基于行为法较易确定控制策略。然而，因为不能明确地定义群体

行为，该方法不能进行数学分析，也不能保证编队的收敛性。库潘(Kuppan)等[85]基于行为的方法并利用设计的控制策略实现了多机器人编队控制与避障。李(Lee)等[86]提出了一种分布式行为控制算法，并利用机器人和障碍物之间的相对位置信息，实现了多机器人编队控制及避障。

3）人工势场法

人工势场法通过构造的人工势场和势场函数来表示环境以及队形中各机器人之间的相互约束关系，并以此为基础进行分析和实现多机器人控制。人工势场法的优点是计算简单，便于实现实时控制，尤其对于处理障碍物避碰问题比较有效。然而，该方法的势场函数的设计比较困难，而且存在局部极值点的问题。高(Gao)等[87]有效结合人工势场法和领航-跟随法实现了多机器人编队控制及避障。张(Zhang)等[88]基于人工势场法并利用设计的闭环控制律实现了多机器人编队控制及避障。

4）虚拟结构法

虚拟结构法将多机器人系统看作刚体结构，每个机器人看作刚体结构上位置相对固定的一点，当队形移动时，机器人跟踪刚体上的虚拟点运动。虚拟结构法的优点是机器人群体的虚拟结构行为(协作行为)容易定义，且在运动过程中队形保持较好；机器人之间不需要明确的功能划分，通信协议简单。缺点是要求多机器人编队在运动过程中时刻保持相同的虚拟结构，从而限制了该方法的实际应用范围，特别是在多机器人编队需要频繁变换编队的场合。目前，该方法只存在针对无障碍的二维环境的相关研究中。洛(Low)[89]提出了一种自适应虚拟结构控制方法，实现了多机器人编队对曲线轨迹的有效跟踪。阿巴西(Abbasi)等[90]提出了一种有效结合虚拟结构法和模糊自校正控制策略的编队控制方法，有效减少了机器人的振动幅度和位置误差。

5）图论法

图论法是用方向图定义机器人编队的形状，每个节点代表一个机器人，节点间的有向边代表两个机器人之间的相对关系。图论法的优点源于其分布式的特点，即可用于大规模机器人编队，对偶发增加或删除机器人节点都易于处理。基于图论法描述编队队形及机器人节点之间的关系便于实现队形变换。然而，该方法目前主要限于仿真研究，实践复杂，难度较大。刘(Liu)等[91]基于欧几里得图研究了多机器人编队变换问题，并能够使多机器人从起点到达目标点。

综上所述，不同的编队控制方法各有特点，各有适用的场合。因为领航-跟随法仅需要给定领航者的行为或轨迹就可以控制跟随机器人的行为，便于多机器人编队控制、跟踪和避障的研究，具有简单、可扩展、灵活、适应和可靠的优点，本书将

采用领航-跟随法来研究基于纯角度观测信息的多机器人编队控制，即基于跟随机器人对领航机器人的纯角度观测信息，设计相应的控制律，实现跟随机器人对领航机器人实时运动的有效跟踪。

1.2.2 多机器人编队控制发展动态

近年来，多机器人编队控制在控制方法、协作定位、自主导航等相关方面的研究已经取得了丰硕的理论成果，也在众多领域得到广泛应用。但是，多机器人编队控制相关问题的理论研究成果和实际应用的差距依然较大，现有的研究工具和方法仍难以直接应用于实际的多机器人系统。为了促进多机器人系统的实际应用，王祥科等[49-53]重点提到了多机器人编队研究中几个亟待解决的问题，具体如下：

1）基于有限观测信息的多机器人编队控制问题

基于距离[72-74]、位置[75-77]、距离-角度[81-83]、距离-距离-角度[84]观测信息的多机器人编队控制已有大量研究。但是基于距离、位置观测信息的多机器人编队控制还存在两个主要问题：其一，在某些特殊环境下，距离或位置观测信息难以获得，如安装有全景相机的机器人以及装有雷达和声呐的水下机器人，这限制了基于距离或位置等观测信息的多机器人编队的实际应用范围；其二，估计距离、位置观测信息对控制系统的硬件和软件要求较高，而且需要设计相应的估计算法，导致估计距离的计算负担加大。随着需要估计位置和观测距离（位置）等信息的机器人的增多，对控制系统的硬件和软件要求以及计算负担随之快速增加。因此，如何利用易于观测的有限信息来实现编队控制是一个具有挑战性的问题。

2）具有强非线性特性的多机器人编队控制问题

为了达到理想的编队控制效果，需要对多机器人编队系统的可控性[92-104]和可观测性进行分析研究[105-116]。坦纳（Tanner）等[92-96]基于图论和固定通信拓扑研究了多机器人的可控性，但是基于固定通信拓扑的多机器人系统限制了其在实际中的应用。考虑到实际应用，扎马尼（Zamani）等[97-104]基于变换拓扑研究了多机器人的可控性。罗米里奥提斯（Roumeliotis）等[105-106]研究了多机器人协作定位的可观测性。贝特克（Betke）等[107-109]基于纯角度信息观测研究了单个机器人观测两个路标的可观测性。夏尔马（Sharma）等[110-111]基于纯角度信息研究了 $2\sim n$ 个机器人协作定位的可观测性，且文献[111]对文献[110]理论研究进行仿真和实验验证。夏尔马（Sharma）等[112-114]基于纯角度信息设计了控制器，改善避碰的可观测性，提高了多机器人协作定位的准确性。洛扎诺（Lozano）等[115]分析了基于领航智能体的多智能体系统的可控性及可观测性。夏尔马（Sharma）等[116]开发了基于可观测性的控制器，改善了多无人机协作定位的准确性。但是，现有研究通常只考虑了具

有线性动力学的多机器人系统，而对于具有非线性动力学[117-118]的多机器人编队控制的相关研究较少。而实际多机器人系统是典型的非线性系统，具有很强的非线性特性。因此，需要应用非线性系统理论对机器人编队系统的可控性和可观测性进行分析研究，以确保多机器人形成和保持理想编队。

3）多机器人编队控制的稳定性问题

在多机器人系统中，稳定性是编队控制的一个重要方面。多机器人能否在运动过程中形成稳定的队形以及距离和轨迹偏差能否控制在期望的范围内都是研究者在设计控制算法时必须重点考虑的方面。由于在非结构化环境中，机器人难以准确按照其规划轨迹运动并有可能偏离其理想位置，这成为影响非结构化环境中编队稳定的一个重要因素。目前，稳定性的研究尚处在理论研究阶段，而且大多数研究者是基于李雅普诺夫（Lyapunov）函数来研究多机器人系统的稳定性的[119]，需要经过大量实验进一步验证。

4）非结构化环境下机器人自主导航与多机器人避障问题

多机器人编队在执行任务时不可避免地会遇到障碍物，多机器人既要保持队形又要合理地避开非结构化环境中可能碰到的障碍物，这使得多机器人编队控制问题变得更加复杂。如何获取环境信息并根据静态或者动态障碍物的具体情况实现多机器人编队在运动过程中自主避障[120]，也是一个亟待解决的问题。

1.3 基于纯角度观测信息的多机器人编队控制研究现状

基于距离、位置等观测信息的多机器人编队控制已有大量研究，但是也存在许多问题。首先，在实际应用中需假定机器人之间是相对静止的，这对于每个机器人从不同角度估计相邻机器人之间的距离或位置信息在理论上是不可行的；其次，在某些特殊环境下难以观测距离或位置信息；再次，为了获取观测距离或位置信息，必须知晓机器人的几何信息或其上预设标记的几何信息；最后，要估计距离或位置观测信息需要设计相应的估计算法，这将增加控制系统的计算负担，特别是要同时估计多个机器人的位置信息，将对控制系统的硬件和软件提出更高的要求。

然而，基于纯角度观测信息的编队控制方法仅利用纯角度观测信息，而无须距离或位置等其他估计信息。角度观测信息可以利用机器人自身携带的视觉等传感器从不同角度直接获得，这将克服基于距离或位置观测信息编队控制的局限性。随着多机器人技术的发展及应用范围的扩大，基于纯角度观测信息的编队控制[121-129]已成为当下的研究热点之一。毕晓普（Bishop）等[121-123]提出了基于纯角度观测信息的分布式控制律，实现了多机器人编队控制，并通过庞加莱-本迪克松

(Poincare-Bendixson)定理证明了相应的控制律能够使多机器人编队全局稳定,但是这些文献所提到的编队控制方法只适用于三四个机器人,很难扩展到更多机器人的情形。布罗克(Brock)等[124-127]研究了基于纯角度观测信息的多机器人循环编队控制。布罗克(Brock)等[124]提出了分布式控制,能够使多机器人循环编队全局稳定。赵(Zhao)等[125]提出了分布式控制,能够使多机器人编队局部指数稳定或有限时间稳定。赵(Zhao)等[126]提出了分布式控制,能够使多机器人编队局部有限时间稳定和避碰。郑(Zheng)等[127]基于反馈线性化控制使多机器人形成一种静态循环编队,实现对目标的围捕。埃伦(Eren)等[128-129]研究了基于平行刚体概念的多机器人编队控制。埃伦(Eren)等[128]基于平行刚体对多机器人编队形状控制进行了研究,并设计了基于角度观测信息的控制律,使三个机器人编队局部指数稳定。弗兰基(Franchi)等[129]也是基于平行刚体提出了一种基于纯角度观测信息的控制律,稳定了角度约束的多机器人编队。

如上所述,国内外对基于纯角度观测信息的多机器人编队控制已展开了初步研究,但是作为一个复杂的控制系统,尚存在一些值得研究的难点:

(1) 基于角度信息的编队控制需要考虑机器人的数量和编队形状。

(2) 多机器人系统是典型的非线性系统,角度信息会在估计和控制过程中存在耦合现象,需要采用非线性滤波对观测角度进行滤波,以提高对角度信息的观测精度。

(3) 为确保多机器人能够形成和保持理想编队,需要对多机器人编队控制系统的可控性和可观测性进行分析。

(4) 为确保多机器人编队在运动过程中保持稳定,需要对多机器人编队控制系统的稳定性进行分析。

1.4 本书主要研究内容

多机器人编队是一个复杂的控制系统,而如何利用尽可能少的观测信息实现稳定的编队控制是一项极具挑战的工作。本书以多机器人领航-跟随编队控制为研究对象,围绕基于纯角度观测信息的多机器人编队控制的难点问题及最新理论展开研究,主要研究内容如下:

第一,基于纯角度观测信息,针对领航者轨迹为理想轨迹(不考虑传感器测量误差和运动偏差等因素而规划的光滑轨迹)和非理想轨迹(考虑传感器测量误差和运动偏差等因素而规划的非光滑轨迹)的多机器人编队控制进行研究。

第二,基于非线性系统的秩理论,分析基于纯角度观测信息的多机器人编队的