

多机器人编队控制研究进展

贾永楠, 李 擎✉

北京科技大学自动化学院, 北京 100083
✉ 通信作者, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn

摘 要 首先介绍了传统的编队控制方法的定义、特点和常用方法及优缺点,并将传统编队控制时代定义为前编队控制时代. 随着多智能体技术的发展,将多智能体技术引入到编队控制问题中,诞生了众多新的研究成果,称为后编队控制时代. 后编队控制时代以多智能体技术为基础,随着通信技术、计算机技术、人工智能技术的发展而逐渐壮大起来,并受到了学者的广泛关注. 前编队控制时代强调多机器人通过编队协作完成单个机器人无法实现的任务,提高任务完成效率且缩短任务完成时间. 后编队控制时代则是在前编队控制时代的基础上,更强调低成本、同步性和协同性,但却不那么重视每个个体的任务分工,甚至是按照规则自由分配任务,不再有“不可替代”的个体存在. 最后给出了研究编队控制问题的基本思路 and 目前尚待解决的关键问题.

关键词 机器人; 编队控制; 多智能体技术; 大规模系统; 分布式控制

分类号 V249.1

Research development of multi-robot formation control

JIA Yong-nan, LI Qing✉

School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
✉ Corresponding author, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn

ABSTRACT Multi-robot formation control is one of the most important research directions in the field of robotics. In this paper, the definition and characteristics of multi-robot formation control were given and several traditional formation control methods were introduced, such as leader-follower method, behavior-based method, artificial potential method, and virtual structure method, and their advantages and disadvantages were stated. The era in which these traditional control methods are applied is termed as “Former Formation Control Era” (FFCE). Following the development of multi-agent theory, the multi-agent technology has become popular and is considered as an efficient solution to the multi-robot system formation control problem, and it has generated several favorable results. The era in which this technology is adopted is termed the “Post Formation Control Era” (PFCE). In this era, the multi-agent theory has gained much attention following the developments in the communication technology, computation technology, and artificial intelligence technology. The FFCE emphasizes that multiple robots are able to accomplish complex tasks that are unachievable by a single robot, while forming a desired formation, which improves the efficiency of a required task as well as shorten the completion time of the task. However, the PFCE emphasizes much more cost-effectiveness, synchronization, and coordination than the FFCE. Meanwhile, the PFCE does not pay much attention to the task assignment for each individual, but assigns each sub-task autonomously to each individual on the basis of simple rules, and there exists no “irreplaceable” individual. Finally, this paper presented the basic steps for solving the formation control problem using multi-agent technologies.

KEY WORDS robots; formation control; multi-agent technology; large-scale system; distributed control

众所周知,多机器人系统(又称群体机器人)的诞生主要是由于当时技术所限,单体机器人的智能性无法突破,因此希望藉由多机器人之间的协调、合作来应对单体机器人无法完成的复杂任务。而这一思想受到了科研界和工程界的高度关注。其中,编队控制问题是多机器人系统协调、合作的基础和难点。多年来,诞生了大量的研究成果,并形成了以跟随领航者法^[1]、虚拟结构法^[2]、基于行为控制法^[3]、人工势场法^[4]为代表的多种编队控制方法。发展至今,上述编队控制方法已经相对成熟且各有优势。针对具体工程问题,也常常将这些方法组合使用,以达到期望的编队控制效果。

然而,时至今日,科技发展速度之快超乎想象。当搭载了深度学习智能算法的阿尔法狗多次战胜当今世界最顶级的棋手时,单体机器人的智能性被认为已经有了飞速的提升,甚至具备完成某些复杂任务的能力。在这种形势下,以编队控制为代表的多机器人协同模式是否该退出历史舞台了呢?答案是否定的。与此形成鲜明对比的是,科研界和工程界对多智能体协同控制的关注比以前更为高涨,并且对多机器人编队控制有了新的认识和注解。因此,本文将重点从全新的角度对当前及未来多机器人编队控制方法的研究进展进行阐述。

本文组织结构如下:第1部分概述传统编队控制的定义及常见控制方法的基本思想和优缺点,第2部分从全新角度阐述多机器人编队控制的新思路,第3部分列举了当前多机器人编队控制领域的最新研究成果,第4部分归纳总结多机器人编队控制领域有待深入研究的关键问题。

1 编队控制的定义及常见研究方法

机器人的出现是为了将人类从繁复、危险或是未知的工作环境中解脱出来。然而单体机器人在信息的获取、处理、控制等方面的能力有限,随着工作环境复杂程度的增加,迫切需要依靠多机器人的协同来提升系统的任务执行能力,完成单体机器人难以独立完成的复杂任务。

多机器人编队控制是一种特殊的协同任务,即在一定的编队控制策略的作用下,所有机器人能够从某一初始状态逐渐形成期望的队形。机器人编队控制主要包含三个子任务,即队形的形成、队形的保持和队形的变换。队形的形成,即一群具有随机初始状态的机器人,在一定的编队控制策略作用下,逐渐形成有序的期望队形。一般所谓的编队控制都是指队形的形成。队形的保持则是指队形形成之后,

机器人系统能够按照既定的路线运行,并且保持指定的队形。队形的变换,通常是指在队形行进过程中,当多机器人系统遇到障碍物时,为了躲避障碍物而需要临时变换成易于通过障碍物的队形,在通过障碍物之后,队形再变换回初始队形状态。在任务的执行过程中,由于环境的复杂性,队形的形成、保持和变换三个子过程通常会切换发生。队形的形成和队形的保持可以由不同编队控制策略完成,也可以由某一较为系统的编队控制策略完成。而队形的变换因为受外部环境驱动,所以一般会选择另外一种控制策略来实现。在同一复杂任务执行过程中,不同控制策略之间常常需要设计一定的判断条件,实现不同控制策略的切换。如图1所示,根据任务执行环境的不同,编队控制问题可分为无人机编队^[5-6]、机器鱼编队^[7-9]、轮式机器人编队^[10-13]等等。多机器人编队控制在工业、农业,甚至军事领域都具有重要的应用价值和广泛的应用前景。

在多年编队控制的研究过程中,逐渐形成了以跟随领航者、基于行为法、人工势场法、虚拟结构法为代表的多种成熟、稳定的编队控制策略,并广泛应用于边防巡逻、资源探测、搜索营救等各种实际应用中。跟随领航者法的基本思想是指定系统中某一个或多个机器人为领航者,其余机器人为跟随者。跟随领航者的策略非常通俗易懂。领航者机器人一般为可以得到全局信息或是接收到具体任务执行方式的机器人,而跟随者机器人通常以领航者的位置和姿态为基准,以指定的间距和相对姿态跟随领航者的运动。因此,通过控制领航者的轨迹,就可以控制整个机器人系统的整体行为。但跟随领航者方法具有致命的缺陷,一旦领航者失效,系统就迅速瓦解,不再具有任务执行能力。因此,跟随领航者法不能单独使用。改进的方法通常有两种:一是与其他编队控制方法结合,优势互补;二是通过增加领航者的数量或引入领航者更替的规则来改进跟随领航者方法。基于行为法的思想非常简单,即设计一系列机器人的基本行为,如避障、导航、巡航等,利用基本行为的组合来实现全局的编队行为。基于行为法针对具体问题常常非常有效,但也有为人诟病的缺点,比如很难对行为进行数学分析,且队形难以保持。虚拟结构法是将队形对应为刚性的虚拟结构体,每个机器人以结构体中对应的顶点为跟随目标,从而将编队问题转化为跟踪问题来解决。该方法常用于无避障要求的编队任务中。人工势场法是通过在机器人系统内设计虚拟的势场来约束各个机器人的行为,常用的势场力有两种,一是吸引力,二是排斥力。



图 1 各种机器人编队。(a)^[5]和(b)^[6]无人机编队；(c)^[8]和(d)^[9]机器鱼编队；(e)^[11]和(f)^[12]轮式机器人编队

Fig. 1 Formation control of certain kinds of robots: (a)^[5] and (b)^[6] formation control of unmanned aerial vehicles; (c)^[8] and (d)^[9] formation control of robotic fish; (e)^[11] and (f)^[12] formation control of mobile robots

机器人运动的目标(如位置等)对机器人产生一定的吸引力,促使机器人朝目标的方向移动,为保证机器人之间的安全移动,当机器人之间的距离小于安全距离的时候,会在机器人之间产生一定的排斥力,使得机器人无法靠得更近,从而避免机器人之间的碰撞。当吸引力和排斥力达到平衡时,机器人间的距离达到稳定,并形成期望的队形。虽然人工势场法在实际编队控制中应用广泛,但由于人工势场法容易陷入局部极值点,使得人工势场法的应用也受到了一定的限制。

本文将以上述方法为代表的多机器人编队控制时代称为前编队控制时代。这一时期的特点是以任务为导向,偏重于针对小规模(几个到几十个机器人)的多机器人系统的实际任务设计编队控制策略,很难有较为系统、完整的编队控制解决方案。这一阶段的编队控制大多通过机器人之间的合作来提升系统的任务完成能力,同时降低工作时间、提高工

作效率,其核心思想重在“协作(collaboration)”。

2 编队控制新思想

近年来,科学技术飞速发展,特别是计算机、通信、大数据、人工智能等技术的突破昭示着机器人时代的到来。单体机器人的智能性因此迅速得到提升。当单个机器人的智能性可以媲美甚至超越人类时,多机器人协同控制仍然有其存在的必要,时代赋予了多机器人编队控制以新的使命——那就是从成本、效率和规模的角度,对多机器人的协同控制进行重新的思考和定位。

后编队控制时代主要朝两个方向进行延伸。一是由于硬件技术的发展,赋予单体机器人更好的定位感知、数据处理、运动控制等能力,由此带来了一些新的研究思路和方法。该方向可以认为是前编队控制时代的直接延伸,由于单体机器人智能性的提升,使得多机器人系统执行更为复杂的协同任务成

为可能. 二是受自然界中群居生物的协同行为启发,将多智能体技术应用于多机器人系统的编队控制中去,使得大规模(数以百计)机器人系统的协同控制问题得以解决,这也是后编队时代最核心和特色之处.

多智能体系统是近年来发展迅速的一门综合性、多学科交叉的复杂性科学^[14-18],涉及控制、数学、生物、物理、计算机、通信等,受到了众多科研工作者的关注. 其灵感来源于群居动物的群体优势. 如图 2 所示,自然界中的鸟群、蜂群、鱼群、鸽群等常常呈现出宏大壮观、绚丽多姿的复杂群体协同编队运动,用于觅食、迁徙、躲避敌害或是应对外界突发情况^[19]. 这些群体的特点是单个个体的智能性有限,属于低等动物群体行列,但就是这些低等动物依靠群体的力量在适者生存的自然选择条件下赢得了生存的机会. 大量的科学观察与实验已经发现:在整体上呈现出复杂群体行为的系统,其个体行为往往却是相对简单的,甚至其个体行为并不是以自我意志为转移,而是完全根据其邻居行为的变化而变化. 他们通常通过简单的规则和局部的交互,最终在整体上涌现出规则有序的群集行为^[20-21].

除了提高任务完成效率、降低任务完成时间等传统编队控制的优势外,将多智能体技术引入编队控制之后,新的编队控制系统还具有鲁棒性强、抗干

扰能力强等优势. 由于采用分布式控制协议、自组织网络架构,使得单体机器人功能的失效并不会影响最终整个系统任务的完成度,同时也便于系统规模的扩展,系统配置的灵活性大大提高,可有效应对多种复杂任务.

综上所述,新的编队控制时代已经到来. 其核心特点是强调单一个体仅具有有限的智能性,依靠简单规则和邻居间的局部交互,呈现出复杂的编队协同行为,依靠数量优势完成勘探、搜救等复杂任务. 从工程应用角度来看,新的编队控制时代的优势是低成本、大规模、高效率. 与传统编队控制时代相比,更强调同步性(synchronization)、协同性(coordination),但却不那么重视每个机器人的任务分工,甚至可以按照规则自由分配任务,不再有“不可替代”的个体存在.

3 编队控制最新进展

基于上述思想,众多学者围绕编队控制开展了深入的研究,并得到了许多研究成果.

图论是多智能体技术的基础,将图论的相关知识引入编队控制中,可方便地对系统进行描述,且易于扩展、删减、增加系统中个体数量. 一个图通常由顶点和边组成. 将每个机器人看作顶点,机器人之间的交互关系看作是边,那么多机器人系统就构成



图 2 自然界中的协同现象. (a) 鸟群(图片来自 www.cfp.cn); (b) 蜂群(图片来自 NEW YORK POST); (c) 鱼群(图片来自东方 IC); (d) 鸽群(图片来自 cn.dreamstime.com)

Fig. 2 Coordination phenomena in nature; (a) a flock of birds (source: www.cfp.cn); (b) swarm of bees (source: New York Post); (c) school of fish (source: east IC); (d) herd of pigeons (source: cn.dreamstime.com))

了一个交互网络,也成为拓扑图.如果机器人彼此是邻居,有交互,那么该边的值为1;反之,则为0.不同邻居间的相互影响程度也可以不同,那么边的值就可能是0到1之间的某一个值,这样的拓扑图就称为有权重的图.

在机器人编队控制中,每个机器人常常被看作质点.这里也需要对机器人进行建模.多智能体技术中常常将智能体看作一阶或是二阶积分器的形式,但是机器人本体往往是非线性的,因此还需要针对机器人自身的物理和运动约束,设计合理的机器人模型.多智能体技术本身的鲁棒性和良好的抗干扰能力使得考虑较为复杂的机器人模型,并开展深入地数学分析和仿真验证成为可能.目前影响最为广泛的模型有两种,分别是 Boid 模型^[22]和 Vicsek 模型^[23]. Boid 模型是1986年由 Reynolds 发明的一种用于模拟鸟类等动物的群体运动的计算机模型. Vicsek 模型则由匈牙利物理学家 Vicsek T 及其合作者于1995年从统计力学的角度提出,不仅算法简单,而且能比较真实的模拟自然界的鸟群、鱼群等的同步现象.此外, Vicsek 模型还可以通过改变个体的密度以及噪声的强度得到不同群集协同运动.

多智能体技术的基础是一致性协议.一致性协议的思想是把邻居行为的差异作为个体的反馈控制量来对个体的行为进行调节.该算法思想简单易懂,实用性强,因此得到了学者和工程师的认可.早在2006年,任伟等就提出了利用一致性的方法解决多机器人的编队控制问题^[24].同年, Gennaro 等提出利用分布式导航函数来设计协同协议实现多智能体的编队控制,导航函数的最小值对应期望的编队结构^[25].基于多智能体理论,系统往往在时间趋向于无穷时才能达到稳定,即形成期望的编队.为了满足工程应用, Xiao 等提出了在有限时间内解决多智能体编队控制问题的方案,并给出了系统的分析和证明.他们还提出将队形信息划分成全局信息和局部信息两类,群体内只有少数个体可以获得全局队形信息并负责系统的导航工作,其他个体则依靠局部信息来实现跟随编队行为.这样的设计方法可以大大降低交互和计算的数据量,便于实现各种复杂编队控制任务^[26].

Oh 等针对基于多智能体技术的编队控制问题给出了较为系统的阐述^[27].简要介绍了一般线性系统、积分器模型和非线性模型的编队控制问题.根据个体的感知能力和交互能力将多智能体编队控制问题分为基于位置(position-based)的编队控制问题^[28]、基于位移(displacement-based)的编队控制问

题^[29]和基于距离(distance-based)的编队控制问题^[30].其中重点针对基于距离的编队控制问题进行了详细的分类,包括无向编队和有向编队. Oh 等还总结了未来可应用于编队控制的多种多智能体方法,包括蜂拥(flocking)^[31]、估计法(estimation-based)^[32]、单纯基于距离的控制方法^[33]、基于角度(angle-based)的控制方法^[34]、包围(containment)控制^[35]和圆环跟随(cyclic pursuit)^[36]等等.

随着传感器技术的发展,视觉传感器信息技术成为了原有感知、导航、通信手段的一个重要补充.于是基于视觉的编队控制问题成为一个新的研究热点^[37-41].例如,当 GPS 信号被切断、机器人无法得到自己的位置信息时, Montijano 等提出了基于视觉的分布式编队控制方法,在不需要外部定位信息的前提下,也可以有效解决多机器人的编队控制问题^[37]. Wang 等甚至提出一种不依赖个体之间的相对位置信息和通信、而只靠视觉信息来解决领航者-跟随者编队控制问题的新方法^[38]. Moshtagh 等则设计了完全基于视觉信息的分布式控制协议,针对具有非完整约束的机器人的运动协同问题展开研究^[41],他们虽然考虑了机器人之间的避碰问题,但与编队策略是解耦关系. Morozova 则提出了利用虚拟领航者和排斥势函数来解决一阶和二阶积分器模型的分布式编队控制中的避碰和避障问题^[42].此外, Jia 和 Wang 则是利用蜂拥算法来解决多机器鱼的编队控制及避碰问题,其中一致性算法用于实现群体行为的协调,势函数则用于形成队形及避免碰撞^[9].连通性保持也是实现多智能体系统一致性的重要条件之一. Poonawala 等针对考虑避碰和分布式连通性保持的多轮式机器人系统的编队控制问题展开研究^[43].采样数据和时延也是工程实践中不可忽视的因素, Liu 等利用分布式控制协议解决了考虑采样数据和时延因素的多移动机器人的编队控制问题^[44]. Dong 等在考虑时延的前提下,利用一致性解决了高阶线性时变的多智能体系统的编队控制问题,并给出了充分和必要条件^[45].此外,针对机器人自身、外界环境干扰等诸多不确定因素以及输入输出有界等约束条件,许多学者在编队控制问题中又引入了诸多智能控制算法,包括分层控制^[46]、自适应控制^[47]、预测控制^[48]、神经网络^[49-50]等等.

围绕多智能体技术的编队控制问题的优秀研究成果还有很多,这里不再一一赘述.希望能够通过以上简单的介绍起到抛砖引玉的效果,引起更多学者的关注,共同完善多智能体“后编队控制时代”的研究成果.

本文对于编队控制领域相关研究进展进行了简要概述,重点介绍了由于多智能体技术的发展,给多机器人编队控制领域带来的新的研究成果. 总结来说,研究思路如下:

(1)首先明确研究对象,并对研究对象进行建模. 建模方法有解析法和实验法两类. 解析法即利用已有数学模型代替被控对象,以便于通过数学推导或是仿真技术对被控对象的行为进行预测和分析. 实验法则是通过大量实验数据,建立被控对象的精确模型,常用于仿真分析中.

(2)其次,明确研究目标,即编队控制的具体任务形式和相关约束条件. 比如,被控对象的规模、被控对象的智能性和交互能力、通信网络的时延、运行环境中的静态或是动态障碍物、形成紧致或松散的队形、围捕或跟踪任务等等.

(3)根据具体任务,利用多智能体技术设计对应的通信机制和控制协议. 例如最近邻居交互法^[51]、一致性、人工势场法等等.

(4)利用数学和控制理论,如李亚普诺夫定理等,对整个过程进行分析和证明,证明系统最终会达到期望的编队构型.

(5)利用 MATLAB 等仿真工具,对整个演化过程进行仿真验证.

(6)有条件的情况下,将所设计的控制协议在对应的机器人平台上进行验证.

4 未来研究方向

对于编队控制及其应用的研究,尽管多年来有着众多突破性的研究进展,但仍然存在许多问题有待进一步深入研究,主要有以下几个方面:

(1)大多数编队控制方法都是依赖于模型的设计方法,但机器人本身的物理模型和研究者所构建的模型之间必然存在着或多或少的差距,这差距可能会导致控制方法失效. 虽然多智能体技术本身的鲁棒性和良好的抗干扰能力允许模型存在一定的误差,仍需要开展深入地数学分析和仿真验证. 能否发展出系统地、不依赖于精确模型的编队控制方法依然是目前亟待解决的问题之一.

(2)多智能体理论已经非常成熟,但大部分都是基于线性模型展开的研究成果. 由于机器人基本上都是复杂的非线性系统,这些基于线性模型所得到的研究成果并不能直接应用到机器人中,如何利用已有的研究成果探索多机器人编队控制问题也面临严峻挑战.

(3)由于多智能体技术是基于个体之间的交互

来实现队形的演化,因此通信技术的发展至关重要. 通信的模式、带宽、通信半径都可能对控制协议的设计形成约束,甚至影响任务完成的效果. 特别是水下通信技术依然尚未突破,这也严重制约了水下三维编队协同控制技术的发展和运用. 目前来看,视觉信息是学者们尝试解决通信技术瓶颈的突破点之一,但目前仍在探索阶段.

(4)即使都基于多智能体技术,目前解决多智能体编队控制问题的方法仍然多样且关注点不一. 最重要的是最终控制效果仍然很大程度上依赖于硬件技术发展的程度. 虽然目前已有学者尝试通过硬件技术的提升和应用各种智能控制算法来规避这些硬件条件不完善所带来的控制效果的差异,但仍然任重道远.

(5)前编队控制时代主要面向小规模的多智能体系统. 而来到后编队控制时代,如何解决大规模系统的编队控制问题则成为首要解决的问题. 分布式的控制协议非常有利于多智能体系统的扩展,适合解决大规模系统的协同问题. 但仍然存在诸多难点. 例如,分布式控制协议针对大规模系统非常有效,那么针对小规模系统的编队控制问题,分布式协议和集中式协议哪个更有效? 射频通信和视觉通信两种方式如何利用更有效? 大部分分布式协议都是基于智能体之间的相对位置、相对姿态等信息,如何利用有限的硬件条件获得尽可能准确的上述信息? 等等.

参 考 文 献

- [1] Shao J, Xie G, Wang L. Leader-following formation control of multiple mobile vehicles. *IET Control Theory Appl*, 2007, 1(2): 545
- [2] Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387
- [3] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams. *IEEE Trans Rob Autom*, 1998, 14(6): 926
- [4] Leonard N E, Fiorelli E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Orlando, 2001: 2968
- [5] Kushleyev A, Mellinger D, Powers C, et al. Towards a swarm of agile micro quadrotors. *Autonomous Robots*, 2013, 35(4): 287
- [6] Dong X W, Yu B C, Shi Z Y, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: theories and applications. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2015, 23(1): 340
- [7] Shao J Y, Yu J Z, Wang L. Formation control of multiple biomimetic robotic fish // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, 2006: 2503
- [8] Zhao W, Hu Y H, Wang L. Leader-following formation control of

- multiple vision-based autonomous robotic fish // *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*. Shanghai, 2009: 579
- [9] Jia Y N, Wang L. Leader-follower flocking of multiple robotic fish. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, 2015, 20(3): 1372
- [10] Vidal R, Shakernia O, Sastry S. Formation control of non-holonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Taipei, 2003: 584
- [11] Cai Z S, Zhao J, Cao J. Formation control and obstacle avoidance for multiple robots subject to wheel-slip. *Int J Adv Rob Syst*, 2012, 9(5): 188
- [12] Nascimento T P, Conceicao A G S, Moreira A P. Multi-robot systems formation control with obstacle avoidance// *Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Cape Town, 2014: 5703
- [13] Peng Z X, Yang S C, Wen G G, et al. Adaptive distributed formation control for multiple non-holonomic wheeled mobile robots. *Neurocomputing*, 2016, 173: 1485
- [14] Angeli D, Bliman P A. Stability of leaderless discrete-time multi-agent systems. *Math Control Sign Syst*, 2006, 18(4): 293
- [15] Chu T G, Wang L, Chen T W. Self-organized motion in anisotropic swarms. *J Control Theory Appl*, 2003, 1(1): 77
- [16] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Trans Autom Control*, 2004, 49(9): 1520
- [17] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems; algorithms and theory. *IEEE Trans Autom Control*, 2006, 51(3): 401
- [18] Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control. *IEEE Control Syst*, 2007, 27(2): 71
- [19] Vicsek T. A question of scale. *Nature*, 2001, 411(6836): 421
- [20] Gazi V, Passino K M. Stability analysis of swarms. *IEEE Trans Autom Control*, 2003, 48(4): 692
- [21] Cucker F, Smale S. Emergent behavior in flocks. *IEEE Trans Autom Control*, 2007, 52(5): 852
- [22] Reynolds C W. Flocks, birds, and schools: a distributed behavioral model. *Comput Graphics*, 1987, 21: 25
- [23] Vicsek T, Czirok A, Jacob E B, et al. Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(6): 1226
- [24] Ren W. Consensus based formation control strategies for multi-vehicle systems// *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minneapolis, 2006: 1
- [25] De Gennaro M C, Jadbabaie A. Formation control for a cooperative multi-agent system using decentralized navigation functions// *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minneapolis, 2006: 1346
- [26] Xiao F, Wang L, Chen J, et al. Finite-time formation control for multi-agent systems. *Automatica*, 2009, 45(11): 2605
- [27] Oh K K, Park M C, Ahn H S. A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 2015, 53: 424
- [28] Fax J A, Murry R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations. *IEEE Trans Autom Control*, 49(9): 1465
- [29] Wen G H, Duan Z S, Ren W, et al. Distributed consensus of multi-agent systems with general linear node dynamics through intermittent communications. *Int J Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(16): 2438
- [30] Oh K K, Ahn H S. Formation control of mobile agents based on inter-agent distance dynamics. *Automatica*, 2011, 47(10): 2306
- [31] Jia Y N, Wang L. Decentralized formation flocking for multiple non-holonomic agents // *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS)*. Manila, 2013: 100
- [32] Oh K K, Ahn H S. Formation control of mobile agents based on distributed position estimation. *IEEE Trans Autom Control*, 2013, 58(3): 737
- [33] Anderson B D O, Yu C B. Range-only sensing for formation shape control and easy sensor network localization// *Proceedings of the 2011 Chinese Control and Decision Conference*. Mianyang, 2011: 3310
- [34] Eren T. Formation shape control based on bearing rigidity. *Int J Control*, 2012, 85(9): 1361
- [35] Li Z K, Ren W, Liu X D, et al. Distributed containment control of multi-agent systems with general linear dynamics in the presence of multiple leaders. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2013, 23(5): 534
- [36] Marshall J A, Broucke M E, Francis B A. Formations of vehicles in cyclic pursuit. *IEEE Trans Autom Control*, 2004, 49(11): 1963
- [37] Montijano E, Cristofalo E, Zhou D J, et al. Vision-based distributed formation control without an external positioning system. *IEEE Trans Rob*, 2016, 32(2): 339
- [38] Wang H S, Guo D J, Liang X W, et al. Adaptive vision-based leader-follower formation control of mobile robots. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64(4): 2893
- [39] Chen X H, Jia Y M. Adaptive leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots using active vision. *IET Control Theory Appl*, 2015, 9(8): 1302
- [40] Liang X W, Liu Y H, Wang H S, et al. Leader-following formation tracking control of mobile robots without direct position measurements. *IEEE Trans Autom Control*, 2016, 61(12): 4131
- [41] Moshtagh N, Michael N, Jadbabaie A, et al. Vision-based, distributed control laws for motion coordination of nonholonomic robots. *IEEE Trans Rob*, 2009, 25(4): 851
- [42] Morozova N S. Formation control and obstacle avoidance for multi-agent systems with dynamic topology// *2005 International Conference on Stability and Control Processes in Memory of V. I. Zubov (SCP)*. St. Petersburg, 2015: 580
- [43] Poonawala H A, Satici A C, Eckert H, et al. Collision-free formation control with decentralized connectivity preservation for nonholonomic-wheeled mobile robots. *IEEE Trans Control Network Syst*, 2015, 2(2): 122
- [44] Liu Z, Chen W D, Lu J G, et al. Formation control of mobile robots using distributed controller with sampled-data and communi-

- cation delays. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2016, 24(6): 2125
- [45] Dong X W, Xi J X, Lu G, et al. Formation control for high-order linear time-invariant multi-agent systems with time delays. *IEEE Trans Control Network Syst*, 2014, 1(3): 232
- [46] Kwon J W, Chwa D. Hierarchical formation control based on a vector field method for wheeled mobile robots. *IEEE Trans Rob*, 2012, 28(6): 1335
- [47] Park B S, Park J B, Choi Y H. Robust adaptive formation control and collision avoidance for electrically driven non-holonomic mobile robots. *IET Control Theory Appl*, 2011, 5(3): 514
- [48] Guillet A, Lenain R, Thuilot B, et al. Adaptable robot formation control; adaptive and predictive formation control of autonomous vehicles. *IEEE Rob Autom Mag*, 2014, 21(1): 28
- [49] Dierks T, Jagannathan S. Neural network output feedback control of robot formations. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 2010, 40(2): 383
- [50] Dierks T, Brenner B, Jagannathan S. Neural network-based optimal control of mobile robot formations with reduced information exchange. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2013, 21(4): 1407
- [51] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Trans Autom Control*, 2003, 48(9): 988