

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.04.001

多无人机协同控制方法及应用研究

韩亮¹,任章²,董希旺²,李清东²

- (1. 北京航空航天大学 中法工程师学院,北京 100191;
2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100191)

摘要:多无人机集群作战是未来战争的重要形式。作为集群作战中的关键技术,协同控制有着极为广泛的应用,例如多无人机编队飞行、协同侦查与集群攻击等。简述了多无人机集群作战的发展历程,归纳了集群作战过程中的关键技术,给出了协同控制方法的分类与体系结构。然后,从编队控制、合围控制、跟踪控制3个方面,总结了近年来国内外关于协同控制方法的研究成果。重点介绍了编队控制中的四种典型方法及相关应用,分析了各类编队控制方法的优缺点。最后对多无人机协同控制方法的未来发展方向进行了展望。

关键词:多无人机;协同控制;编队控制;合围控制;跟踪控制

中图分类号:V279

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)04-0001-07

Research on Cooperative Control Method and Application for Multiple Unmanned Aerial Vehicles

HAN Liang¹, REN Zhang², DONG Xi-wang², LI Qing-dong²

- (1. School of Sino-French Engineer, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. School of Automation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract:Cooperative combat for multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) is the main combat mode in the future war. As the key technique, cooperative control has the potential applications in the multiple UAVs formation flight, cooperative detection, and cooperative attack, etc.. This paper briefly describes the development of multi-UAVs cooperative combat, summarizes the key technologies in multi-UAVs cooperative combat, and presents the classification and architecture of cooperative control methods. Then, the research results of cooperative control in recent years are introduced, which includes the research of formation control, containment control and tracking control. Four typical methods and related applications about formation control are highlighted, and the advantages and disadvantages of various formation control methods are presented. Finally, summary and prospects of multi-UAVs cooperative control method are given.

Key words:Multiple unmanned aerial vehicles; Cooperative control; Formation control; Containment control; Tracking control

收稿日期:2018-05-12;修订日期:2018-06-06

基金项目:国家自然科学基金(61503009, 61333011);北航教学改革项目(2017);北航双百工程优质课程项目(2017)

作者简介:韩亮(1989-),男,博士,讲师,主要从事多飞行器协同控制方面的研究。E-mail:liang_han@buaa.edu.cn

通信作者:任章(1957-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高超声速飞行器导航、制导与控制方面的研究。

E-mail:renzhang@buaa.edu.cn

0 引言

无人机是现代化战争中的重要作战装备。经过数十年的研究,无人机相关技术已经取得令人瞩目的进展,功能也越来越丰富,已开始逐步替代有人飞行器。然而,面对日益复杂的作战环境与多任务需求,单架无人机的任务执行能力显示出了一定的局限性,具体包括:由于机载传感器与通信设备的限制,单架无人机对任务环境的感知能力是有限的;受自身的燃料限制,飞行时间有限,不具备高强度持续作战能力;单架无人机一旦受到故障影响,任务执行效率将大幅下降,甚至导致任务终止。

为提高无人机的任务执行效率,美国空军在《2016—2036年小型无人机系统飞行规划》中提出了无人机应当采取集群作战的模式,提高作战行动的灵活性,降低损耗。美国 DARPA 公司计划研究用于电子战的无人机群系统,在敌方防御体系外进行组网通信,针对指定目标执行协同探测、协同攻击等作战任务(图 1 和图 2)。相比单架无人机,无人机群系统具有诸多优势。例如,可以通过多个低成本、异构的无人机代替功能完备的单架无人机,从而达到降低成本,提高任务执行效率的目的;多无人机相互协作完成对任务环境的感知,通过自组网技术实现多无人机之间信息的快速共享,完成对任务区域的大范围探测;无人机群系统不依赖于单独的个体,当部分个体出现故障时,整个群系统仍具有一定的完整性,可继续执行任务等。总之,多无人机集群既能充分发挥无人机的优势,又能避免单架无人机由于自身限制而导致的任务执行受限问题,是未来无人机重要的发展方向。



图 1 DARPA 多无人机集群作战过程

Fig. 1 Cooperative combat for DARPA multiple UAVs



图 2 全球鹰无人机协同加油过程

Fig. 2 Cooperative refueling for multiple Global Hawk UAVs

1 协同控制方法分类

近年来,多无人机集群技术研究领域已经产生了很多紧密相关的研究分支,其中包括协同导航、协同制导和协同控制等。文献[1]对多无人机协同导航技术进行了介绍。文献[2]对协同制导与控制技术进行了总结。在协作过程中,多无人机之间需要通过相应的协同控制方法来共同实现指定的全局目标。根据任务的不同,协同控制方法可分为一致性控制、编队控制、合围控制和跟踪控制等。其中,编队控制用于保证无人机群系统形成期望的编队来完成指定任务。根据任务的不同,编队的形式主要有两类:一种是固定编队,如三角形编队、菱形编队等;另一种是时变编队,即多无人机之间的编队队形是时变的。当编队指令为零时,编队控制问题就转换为一致性控制问题;合围控制用于保证无人机进入相应的凸包内,同时配合其他无人机完成相关任务;跟踪控制用于保证多无人机以特定的方式协同跟踪某个目标。

2 协同控制体系结构

为了保证集群任务的执行效能,协同控制系统需要具备高可靠性、强鲁棒性、快速响应和快速重组等能力。协同控制体系结构主要有集中式结构与分布式结构两种类型。

集中式结构将各无人机的状态信息发送至控制中心(中心节点)统一处理。其中,控制中心可以是无人机、航天器、地面站等。所有的无人机将自身状态信息或感知的信息发送到控制中心,然后,控制中心通过数据处理、任务规划、控制决策等环节,再将控制信息传送到各架无人机,保证多无人机统一执行指定的任务。在集中式结构中,任务控制指令由控制中心

发送,无人机自身只具有底层控制能力。

集中式结构利用全局的信息进行分析与决策,当控制中心与通信带宽的性能足够好时,它能够较好地处理复杂控制问题,同时这种体系结构具有全局性能强的优点。当控制中心出现问题时,所有的任务将会终止,因此集中式结构存在计算量大、鲁棒性差等缺点。因此,集中式结构适用于处理实时性要求低、全局性能要求高的任务中。图 3 所示为集中式协同控制体系。

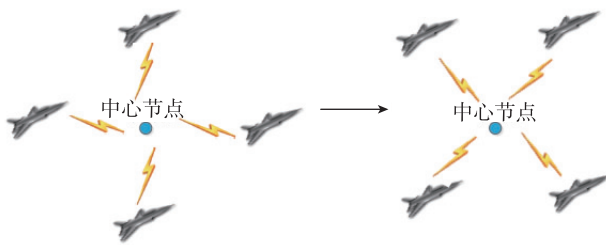


图 3 集中式协同控制体系

Fig. 3 Centralized cooperative control structure

分布式结构没有一个确定的控制中心(中心节点),各无人机在群系统中的地位是平等的,它们通过合作的方式协同完成任务。在分布式控制结构下,全局控制问题被分解成多个子问题并由各架无人机独立解决。各无人机具有一定的自主控制与决策能力,能够根据拓扑网络的连通情况与其他无人机进行信息交互,在分布式协同控制协议的作用下,实现无人机群系统的整体控制。

分布式结构具备实时性好、鲁棒性强、计算量低、灵活性高等优点。但由于多无人机在分布式体系结构下,对全局性能考虑不足,容易造成全局性能不强的问题,因此,分布式体系结构比较适合处理具有高动态性、高实时性特点的任务。图 4 所示为分布式协同控制体系。

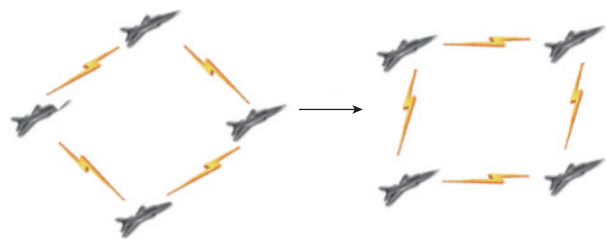


图 4 分布式协同控制体系

Fig. 4 Distributed cooperative control structure

3 协同控制研究现状

3.1 编队控制

对在编队控制研究方面,目前主要分为基于行为、虚拟结构、人工势场、领导者-跟随者以及一致性的编队控制方法。下面对这几种方法分别进行介绍。

基于行为的编队控制方法借鉴仿生学的思想实现编队。其基本思路为:群系统中所有无人机都具有多种预设的行为模式,如聚集、避障、保持队形等,这些行为组成一个行为集合。每一种行为都对应着一种控制作用,并为每一种行为的控制作用分配不同权重,每架无人机的整体控制行为由多个控制作用加权求和得到。无人机群系统通过动态调整每一个行为的权值,最终实现期望的行为。文献[3]给出了基于候鸟群体行为的编队控制策略,基于相对距离反馈信息设计了最优编队控制器。文献[4]讨论了三维空间下的多无人机编队控制问题,构造了用于固定编队的行为模型,给出了基于行为的分布式编队控制器,使多无人机以编队的形式通过目标点。文献[5]给出了基于鸽群行为的编队控制方法,研究了鸟群行为机制与编队飞行的仿生关系,设计了基于仿生行为的编队控制器构型。该方法的优点在于:每架无人机只需要局部信息,整体采用分布式控制,鲁棒性好,集群可进一步扩展;其缺点则主要在于:行为模型较为复杂,编队控制系统的稳定性难以保证,难以在理论上进行可行性分析。

基于虚拟结构的编队控制方法将期望的集群队形视为一个刚体的虚拟结构。其主要思路是将预期的编队视为一个存在多个节点的虚拟结构,群系统中的所有无人机都分别对应着虚拟结构中的一个节点,当编队变化时,每一架无人机与虚拟结构上的点保持同步运动即可完成实际编队。文献[6]给出了基于虚拟结构的编队控制器,实现了多无人机编队构型的保持。文献[7]通过采用虚拟结构编队控制方法,实现了多无人机大机动飞行过程的编队保持,并通过动态参数自适应地在编队保持与轨迹跟踪之间切换。文献[8]基于虚拟结构的编队控制策略,在满足无人机之间实时避障的基础上,完成了多无人机的编队。基于虚拟结构的编队

控制方法优势在于鲁棒性强,编队控制精度高;不足在于要求群系统实时性与同步性高,数据计算量大。

基于人工势场法的编队控制方法是通过势场中吸引与排斥的特性实现编队。其基本思路为:根据个体之间的势场特性设计编队控制器,使个体间之间的相对距离保持在一定的范围内,也可以设定集群的目标点,然后通过模拟势场的方式吸引个体形成编队。文献[9]提出了基于人工势场的多无人机编队避碰控制方法,结合势场特性与一致性理论,在保障多无人机之间的避撞与避障的基础上,共同实现预期的编队飞行任务。文献[10]基于人工势场法与回转力方法设计了分布式编队控制器,实现了多无人机以编队的形式在障碍空间进行避障飞行。文献[11]将人工势场与虚拟领导者的方法进行了结合,通过人工势场法定义了个体之间的期望距离,由虚拟领导者控制群体的队形与运动,在两者共同作用下实现预期的编队任务。基于人工势场法的编队控制方法的优点在于物理意义明确,易于实现;其缺点主要是该方法难以在理论上保证编队的稳定性,容易产生局部振荡等问题。

基于领导者-跟随者的编队控制方法是较为成熟的编队控制方法,与传统多飞行器编队中的长机僚机编队方法比较类似。该方法的基本思路是将群系统中的无人机分为领导者和跟随者,其中领导者按照设定的轨迹运动,跟随者与领导者之间保持指定的相对距离并跟随领导者运动。文献[12]研究了多无人机同步与编队保持问题,基于领导者-跟随者策略设计了编队控制器,实现了多无人机编队飞行过程中位置、速度与姿态变化的同步。文献[13]根据领导者-跟随者编队控制策略设计了基于相对状态反馈的编队控制器,实现了多无人机在局部通信条件下的编队。文献[14]根据领导者-跟随者编队策略设计了基于滑膜思想的编队控制器,分析了多无人机在观测约束下实现编队的可行性条件。文献[15]研究了通信约束下的多无人机编队控制问题,基于领导者-跟随者策略设计了分布式编队控制器,基于李雅普诺夫方法给出了编队控制系统的稳定条件。基于领导者-跟随者的编队控制方法优点在于实现较为容易,理论上容易分析;不足在于鲁棒性较差,一旦领导者出现异常,那么编队将无法实现,同时,当个体较多时,对

实时通信性能要求较高。

基于一致性的编队控制方法通过图来表示集群个体之间的作用关系,结合图论与控制理论对编队问题进行分析。基于一致性的编队控制方法的基本思路为:群系统中所有无人机的状态相对同一个编队参考保持特定的向量偏差。通过局部的协同作用后,所有无人机的状态与编队参考的向量偏差趋于一致,最终实现了指定的编队。在基于一致性的编队控制问题中,一般会通过状态变换或矩阵分解的方法将问题转化成一致性问题,然后再选择合适的一致性理论对问题进行分析。文献[16]对通信约束下的多架垂直起降无人机编队控制问题进行了研究,设计了基于一致性的编队控制协议,利用李雅普诺夫方法对闭环系统的稳定性进行了分析。文献[17]对有向切换拓扑约束下的编队控制问题进行了研究,利用空间分解与状态变换方法将编队控制问题转换成了一致性问题,给出了多无人机实现编队的判据,得到了编队参考函数的显示表达式。文献[18]研究了存在切换拓扑与通信延迟约束下的多无人机编队控制问题,给出了基于一致性的分布式编队控制器,探讨了在多约束条件下实现编队的可行条件。文献[19]研究了三维空间下的多无人机编队控制问题,将基于一致性的编队控制器引入到群系统中,分析了闭环系统的稳定性,实现了多无人机之间的高精度编队任务。基于一致性的编队控制方法优点是采用分布式拓扑网络结构,兼顾了鲁棒性与实时性,可进行大规模的扩展等;该方法的缺点在于理论不成熟,具有较大的发展空间。

目前,编队控制在协同控制领域的工程应用成果较为丰富。文献[20]研究了基于领导者-跟随者编队控制方法,同时通过2架固定翼验证了算法的可行性。文献[21]中通过多架四旋翼验证了编队控制算法的可行性。文献[22]通过室内多四旋翼平台验证了基于虚拟结构的编队控制方法的可行性。文献[23]中研究了存在参数不确定性的编队控制问题,并通过3架四旋翼验证了理论结果。文献[24]中对基于单旋翼无人机的领导者-跟随者编队控制问题进行了研究,通过2架单旋翼无人机完成了领导者-跟随者编队实验,验证了算法的有效性。文献[25]中研究了具有六自由度欠驱动模型的多旋翼无人机编队控制问题,提出了基于虚拟结构的编队控制策略,在室内环境下完

成了固定队形的编队控制实验,取得了良好的实验效果。文献[26]研究了基于一致性的多无人机时变编队控制问题,并通过5架四旋翼验证了控制算法可行性。

3.2 合围控制

在合围控制问题研究中,文献[27]较早地研究了合围控制问题并提出了一种基于停一走策略的合围控制方法。文献[28]研究了在非线性与干扰约束下的多无人机合围控制问题,根据有限的邻居信息设计了分布式合围控制器,利用神经网络方法补偿了系统中非线性部分,最终通过李雅普诺夫稳定性理论证明了控制系统的收敛性。文献[29]研究了执行机构与传感器故障约束条件下的合围控制问题,设计了分布式干扰观测器,估计了几种典型故障带来的偏差,根据反步控制方法实现了多无人机的合围控制,最后通过图论与李雅普诺夫方法证明了闭环系统的稳定性。文献[30]研究了通信延迟约束下的编队合围控制问题,分别面向领导者和跟随者设计了基于局部状态反馈的编队合围控制器,给出了群系统实现编队合围的充分条件及对编队合围控制器进行中增益矩阵求解的算法。最后,通过无人机群系统进行了仿真验证,证明了编队合围控制算法的可行性。文献[31]研究了有向图下的多无人机编队合围控制问题,通过状态空间分解,将编队合围问题转换成了稳定性问题,给出了实现编队合围的充要条件。最后,通过多架四旋翼无人机进行了实物验证,证明了该算法取得了良好的实验效果。

3.3 跟踪控制

在跟踪控制研究方面,文献[32]研究了输入约束下的多无人机跟踪控制问题,通过自适应状态观测器估计了未知目标速度信息,提出了基于滑膜思想的控制方法,实现了对目标轨迹的跟踪。文献[33]针对非合作目标的多无人机跟踪控制问题进行了研究,根据多无人机与目标之间的相对几何关系设计了跟踪控制器,分析了多无人机实现跟踪控制的可行性条件。文献[34]对通信时延约束下的编队跟踪控制问题进行了研究,提出了基于一致性的分布式编队跟踪控制方法,探讨了在通信延迟约束下实现编队跟踪的可行性条件。文献[35]对切换拓扑约束下的多无人机编队跟踪控制问题进行了研究,基于无人机与目标之间的相对运动信息设计了编队跟踪控制器,在切换拓扑约束下,通过多

架四旋翼无人机验证了编队跟踪控制算法的可行性。

4 总结与展望

本文总结了多无人机协同控制方法的分类与协同控制的体系结构,给出了多无人机协同控制方法的研究现状,介绍了其在编队控制、合围控制以及跟踪控制方面取得的研究成果。目前,多无人机协同控制方法的研究还处于发展阶段,未来主要研究发展方向有以下几点:

(1) 基于一致性的分布式协同控制方法

集中式协同控制方法存在过度依赖中心节点等问题,在实际对抗环境下的应用存在限制。基于一致性的分布式协同控制方法不依赖于全局通信网络,只需要通过局部无人机之间的信息交互就可以保证多无人机协作过程的一致,共同实现预期的任务目标,是未来多无人协同控制技术研究的方向之一。

(2) 有人/无人机混合协同控制方法

由于目前单架无人机的智能化水平十分有限,需要配合人类的决策能力才能提高整体的效率。因此,通过有人/无人机混合协同控制,使有人机进行任务分配与决策,下达指令给无人机去执行任务。该模式既提高了有人机的生存能力,同时也提高了整体的作战效能,是未来重要的应用研究方向之一。

(3) 复杂环境下的多无人机协同控制方法

在多无人机集群作战过程中,由于战场环境复杂多变,无人机之间的通信拓扑会发生变化,信息传输的过程中会伴有通信延迟与噪声干扰,这些影响因素在多无人飞行器群系统中不可避免,对协同控制造成的影响不容忽视。因此,面向复杂环境下的协同控制方法研究也是未来的主要发展方向之一。

总之,在未来信息化、智能化的作战背景下,多无人机集群作战将成为重要的作战手段,进一步开展多无人机协同控制技术的研究工作具有重要意义。

参考文献

- [1] 许晓伟, 赖际舟, 吕品, 等. 多无人机协同导航技术研究现状及进展[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 1-9.
- [2] 任章, 于江龙. 多临近空间拦截器编队拦截自主协

- 同制导控制技术研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(2):1-6.
- [3] Giulietti F, Innocenti M, Napolitano M, et al. Dynamic and control issues of formation flight[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2005, 9(1):65-71.
- [4] Kim S, Kim Y. Optimum design of three-dimensional behavioural decentralized controller for UAV formation flight [J]. *Engineering Optimization*, 2009, 41(3):199-224.
- [5] 邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(10):1298-1304.
- [6] Li N, Liu H. Formation UAV flight control using virtual structure and motion synchronization[C]// *IEEE American Control Conference*, 2008:1782-1787.
- [7] 邵壮, 祝小平, 周洲, 等. 无人机编队机动飞行时的队形保持反馈控制[J]. *西北工业大学学报*, 2015(1):26-32.
- [8] 邵壮, 祝小平, 周洲, 等. 三维动态环境下多无人机编队分布式保持控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(6):1065-1072.
- [9] 朱旭, 闫茂德, 张昌利, 等. 基于改进人工势场的无人机编队防碰撞控制方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(6):961-968.
- [10] 赵刚, 黄席樾. 障碍空间中的飞行器编队与集群控制研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(2):92-96.
- [11] 曲成刚, 曹喜滨, 张泽旭. 人工势场和虚拟领航者结合的多智能体编队[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(5):1-5.
- [12] Mahmood A, Kim Y. Leader-following formation control of quadcopters with heading synchronization [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2015, 47:68-74.
- [13] Dehghani M A, Menhaj M B. Communication free leader-follower formation control of unmanned aircraft systems[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2016, 80:69-75.
- [14] Dehghani M A, Menhaj M B. Integral sliding mode formation control of fixed-wing unmanned aircraft using seeker as a relative measurement system[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2016, 58:318-327.
- [15] Pan Y J, Werner H, Huang Z, et al. Distributed cooperative control of leader-follower multi-agent systems under packet dropouts for quadcopters[J]. *Systems & Control Letters*, 2017, 106:47-57.
- [16] Abdessameud A, Tayebi A. Formation control of VTOL unmanned aerial vehicles with communication delays[J]. *Automatica*, 2011, 47(11):2383-2394.
- [17] Qi Y, Zhou S, Kang Y, et al. Formation control for unmanned aerial vehicles with directed and switching topologies[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 46:26-36.
- [18] Xue R, Song J, Cai G. Distributed formation flight control of multi-UAV system with nonuniform time-delays and jointly connected topologies[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(10):1871-1881.
- [19] Zhu X, Zhang X, Qu Y. Consensus-based three-dimensional multi-UAV formation control strategy with high precision [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(7):968-977.
- [20] Gu Y, Seanor B, Campa G, et al. Design and flight-testing evaluation of formation control laws[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(6):1105-1112.
- [21] Mercado D A, Castro R, Lozano R. Quadrotors flight formation control using a leader-follower approach [C]// *Proceedings of the 2013 European Control Conference(ECC)*. IEEE, 2013:3858-3863.
- [22] Kushleyev A, Mellinger D, Powers C, et al. Towards a swarm of agile micro quadrotors[J]. *Autonomous Robots*, 2013, 35(4):287-300.
- [23] Dydek Z T, Annaswamy A M, Lavretsky E. Adaptive configuration control of multiple UAVs[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(8):1043-1052.
- [24] Yun B, Chen B M, Lum K Y, et al. Design and implementation of a leader-follower cooperative control system for unmanned helicopters[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8(1):61-68.
- [25] Kushleyev A, Mellinger D, Powers C, et al. Towards a swarm of agile micro quadrotors[J]. *Autonomous Robots*, 2013, 35(4):287-300.
- [26] Dong X, Yu B, Shi Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 23(1):340-348.
- [27] Ji M, Ferrari-Trecate G, Egerstedt M, et al. Containment control in mobile networks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(8):1972-1975.
- [28] 余瑶, 任昊, 张兰, 等. 有向图下非线性无人机群自适应合围控制[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(10):1384-1391.
- [29] Yu Z, Zhang Y, Qu Y, et al. Distributed fault-toler-

- ant containment control for multi-UAVs with actuator and sensor faults[C]// Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems. IEEE, 2017:753-758.
- [30] Han L, Dong X, Li Q, et al. Formation-containment control for second-order multi-agent systems with time-varying delays [J]. Neurocomputing, 2016, 218:439-447.
- [31] Yu B, Dong X, Shi Z, et al. Formation-containment control for unmanned aerial vehicle swarm system [C]// Proceedings of 2014 33rd Chinese Control Conference(CCC). IEEE, 2014:1517-1523.
- [32] Zhu S, Wang D, Low C B. Cooperative control of multiple UAVs for moving source seeking [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 70(1-4):293-301.
- [33] Zhang M, Liu H. Cooperative tracking a moving target using multiple fixed-wing UAVs[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 81(3-4): 505-529.
- [34] Han L, Dong X, Li Q, et al. Formation tracking control for time-delayed multi-agent systems with second-order dynamics[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(1): 348-357.
- [35] Dong X, Zhou Y, Ren Z, et al. Time-varying formation tracking for second-order multi-agent systems subjected to switching topologies with application to quadrotor formation flying[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5014-5024.