

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.001

# 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展

宗  群<sup>1</sup>, 王丹丹<sup>1</sup>, 邵士凯<sup>1</sup>, 张博渊<sup>1</sup>, 韩  宇<sup>2</sup>

(1.天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2.天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘  要:** 无人机在军事和民用应用上越来越广泛,为使无人机能够更好地发挥作用,需要采用多无人机编队飞行控制来实现协同侦察、作战、防御及喷洒农药等任务. 多无人机协同编队控制技术主要包括信息感知技术、数据融合技术、任务分配技术、航迹规划技术、编队控制技术、通信组网技术和虚拟/实物验证实验平台技术等. 首先对国内外多无人机编队相关技术的现状和进展进行综述,然后重点对多无人机编队控制方法进行分析,并对队形设计、队形调整和队形重构等问题进行归纳总结,最后对多无人机协同编队所面临的机遇和挑战进行了展望. 结果表明:目前多无人机编队飞行理论方面取得了丰硕成果,但是实物飞行试验仅能实现简单通信环境下的协同编队飞行,任务分配和航迹规划实时性不高,控制方法应对突发情况鲁棒性低,多机多传感器协同感知能力不足,欠缺对实体的仿真实验,未来的研究方向应是突破上述关键技术的不足,开展复杂感知约束和复杂通信环境下的多无人机协同编队飞行研究,提出更加有效的控制方法,并进行多无人机实物编队飞行试验,使无人机能够更好地完成既定任务.

**关键词:** 多无人机; 协同编队飞行; 任务分配; 航迹规划; 编队控制; 感知与融合; 虚拟平台/实物平台

**中图分类号:** V11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2017)03-0001-14

## Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control

ZONG Qun<sup>1</sup>, WANG Dandan<sup>1</sup>, SHAO Shikai<sup>1</sup>, ZHANG Boyuan<sup>1</sup>, HAN Yu<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2.School of Electrical Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** It is well known that unmanned aerial vehicle (UAV) is more and more widely applied in military and civil areas. In order to play the better role of UAV, it is needed to utilize multi UAVs cooperative formation to accomplish cooperative reconnaissance, combat, defense and spraying pesticides and other tasks. The multi UAVs cooperative formation control technology mainly contains the following key techniques: data fusion technology, sensing technology, task allocation technology, path planning technology, formation control technology, communication network technology and virtual/physical verification platform technology. Firstly, summarize the research and development of key technologies worldwide. Then, the classification for multi UAVs formation control methods is mainly investigated, and the problems about formation design and adjustment, formation reconfiguration are summarized. Finally, the challenges and future development for multi UAV cooperative formation are prospected. Research shows: at present, the theory of multi UAV formation flight has acquired fruitful results, while the real cooperative formation flight test can only be implemented in the simple communication environment. The real time performance for task allocation and path planning is not high. The robustness of control methods to cope with the unexpected situation is low. The cooperative sensing ability for multi UAV with multi sensor is insufficient. The simulation of the entity is lacked. Breaking through the above key technologies, carrying out the cooperative formation flight of multi UAV in complex sensing constraints and complex communication environment, putting forward more effective control method and carrying out the UAV physical formation flying test so that the UAV can finish the task better may be the future research directions.

**Keywords:** multiple UAV; cooperative formation flight; task allocation; route planning; formation control; perception and fusion; virtual platform /physical platform

无人机具有低成本、无人员伤亡、设备简单、操作方便和灵活可靠等特点,其可以近距离对地面目标有选择性和针对性地实施观测,并且可以进入敌方阵地进行监视,提高情报的可靠性和时效性. 在

军事侦察和民用测量上采用一定的编队队形进行飞行,可以扩大侦察和搜索的范围. 多架无人机编队飞行协同侦察时,通过调整相机在无人机上的安装角度,可对目标的全方位立体拍照,实现地面目标的侦察和监视. 单架无人机采用先进控制策略可实现实时的高精度姿态控制,完成轨迹追踪<sup>[1]</sup>,但是多无人机编队飞行执行任务的成功率和抗突发事件的

收稿日期: 2016-11-17  
基金项目: 国家自然科学基金(61673294,61273092)  
作者简介: 宗  群(1961—),男,教授,博士生导师  
通信作者: 韩  宇, han\_yu@tju.edu.cn

能力要比单架飞机飞行高.例如,在某次任务的执行过程中,有一架飞机出现故障不能继续工作,那么它可以返回进行维修,而其余飞机仍旧按照原来的计划保持编队飞行,使任务得以圆满完成.但是现有的科技水平还无法支持完全意义上的多无人机编队自主决策功能,几乎不能实现较高程度智能化集群式大规模协同编队飞行,因此深入开展信息感知技术、数据融合技术、任务分配技术、航迹规划技术、编队控制技术、通信组网技术和虚拟/实物验证实验平台技术等多项技术的研究,以及多项技术间协同研究,对中国实现美国空军发布的 2016 年—2036 年小型无人机发展规划<sup>[2]</sup>中“蜂群”、“编组”、“忠诚僚机”和诱饵等多无人机协同编队具有重要指导意义.

## 1 协同编队飞行任务描述

为了达到多无人机协同编队飞行的扩大任务范围、提高任务执行效率和完成质量、增强在高危环境中的作战能力、提升系统对环境自适应能力、扩展任务能力等多个目标,必须研究多无人机的状态感知和数据融合、任务分配和航迹规划、编队控制和通信组网等多个技术,并研究多项技术间的协同作用.

多无人机协同编队执行危险任务是一种必然趋势.进行多无人机协同编队,首先要进行信息感知,并对多源信息进行融合;其次对各种任务进行分配和决策;进而对每架无人机进行航迹规划生成期望的轨迹;然后利用先进的编队控制方法和队形设计技术实现多机编队飞行任务;在编队控制设计过程中,需要考虑多无人机之间的组网通信问题;最后,搭建模拟多无人机协同编队飞行虚拟仿真平台和实物演示平台,验证编队控制算法的可行性和有效性.图 1 为多无人机协同编队飞行控制中各项关键技术之间的关系.

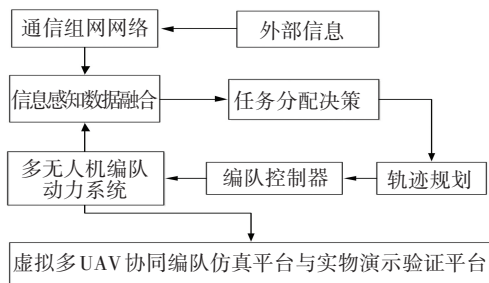


图 1 多无人机协同编队飞行结构图

Fig.1 Cooperative formation flight structure for multi-UAVs

中国正在大力开展多无人机协同编队飞行控制的研究,并对多机协同技术越来越重视,审批的国家基金项目不仅包括编队控制研究,还包括无人机协同通信组网、感知融合、协同优化决策、任务分配和

协同航迹规划等多个相关领域的交叉研究.

## 2 关键技术

本部分介绍多无人机协同编队飞行的任务分配、航迹规划、编队控制、通信组网和感知、数据融合等技术的现状和进展,重点对编队控制中的队形设计和动态调整技术、编队控制方法、编队重构和避碰、避障技术进行详细分析.

### 2.1 任务分配

无人机飞行的环境日益复杂及于无人机性能等要求的提高,对无人机编队任务分配的时效性、处理位置环境能力、求解速度等提出了更高的要求.

2010 年,美国麻省理工学院大学 Mcgrew 等<sup>[3]</sup>针对固定速度一对一作战机动问题,用近似动态规划技术进行求解,该方法针对快速变化的战术情况能够提供快速响应,并在室内完成了飞行试验,对算法进行了验证. 2011 年,印度 Sujit 等<sup>[4]</sup>针对两个无人机的未知区域协同搜索问题展开研究,考虑了无人机通信范围、传感器探测范围、油量限制及补给站位置等约束条件,采用博弈论的方法对该问题进行了求解,仿真结果表明基于博弈论的方法对于未知环境的搜索效率很高. 2011 年,美国波尔图大学 Manathara 等<sup>[5]</sup>针对多无人机作战的最优资源分配问题,针对多种异构无人机设计了任务分配策略,并采用启发式算法进行求解. 2011 年,美国加利福尼亚大学 Marden 等<sup>[6]</sup>针对多智能体系统中的分布式控制问题,考虑了分配效能函数设计问题,并分析了效能函数同纳什平衡之间的关系. 2013 年,该团队针对多类资源分配问题,采用改进的基于状态的博弈论方法,进一步优化了效能函数,相比传统的博弈论,提高了资源分配求解速度<sup>[7]</sup>. 2013 年,美国波尔图大学 Sujit 等<sup>[8]</sup>针对无人机和水下机器人的协同搜索问题展开研究,分别提出了周期性协调、最短路径协调和基于概率协调 3 种协同搜索策略,并分析了在无人机速度和数据影响下 3 种协同搜索策略的任务执行时间及适用范围. 2014 年,美国珀杜大学 Kim 等<sup>[9]</sup>针对异构无人机的编队区域搜索和任务分配问题,提出了一种基于响应阈值模型的概率决策机制的分布式方法,考虑了环境的不确定性,实现了快速灵活的无人机区域搜索和任务分配. 2015 年,美国佛罗里达大学 Malvankar-mehta 等<sup>[10]</sup>针对有人/无人机器人任务分配问题,将高风险信息和低风险信息分层处理,选用多层任务分配模型,建立综合考虑任务收益、代价和人为因素的综合性能指标,采用非线性规划算法进行求解,完成无人机任务分配. 2015 年马来西亚科技大学 Wei 等<sup>[11]</sup>针对传统粒子

群算法求解过程中求解过慢或易陷入局部极小的问题,提出了一种双级任务分配方法,通过双极任务分配结构自适应的条件搜索效率,相比传统粒子群算法提高了求解的可靠性、搜索精度和搜索效率,最终提高了任务分配的求解速度。

## 2.2 航迹规划

为了确保复杂环境中多无人机编队能够安全、快速到达任务区域,降低被敌方雷达捕获、摧毁的概率,需要设计满足一定约束条件及性能指标最优的编队航迹。

2013年,英国诺森比亚大学的 Kothari 等<sup>[12]</sup>采用机会约束方法来处理系统环境和环境态势感知中的不确定性,再通过快速随机搜索树方法获取了多无人机鲁棒最优路径。2015年,北京航空航天大学的一段海滨等<sup>[13]</sup>将无人机全局路径规划问题转化为三维空间含约束的优化问题,并采用改进的差分进化算法进行求解,克服了传统差分进化算法容易陷入局部极小的问题,相比传统方法提高了无人机路径的约束处理能力、路径质量和鲁棒性。2016年,加拿大魁北克大学的 Berger 等<sup>[14]</sup>针对异构飞行器的静态目标搜索问题,建立新的整数线性 and 二次规划模型,降低了计算复杂度,采用线性规划算法求解,以轻微的计算代价获得了包含异构飞行器的近似最优解。2016年,沈阳航空航天大学的梁宵等<sup>[15]</sup>针对复杂环境下对移动目标的路径跟踪问题,采用滚动时域优化结合人工势场法,获取无人机的前进方向,实时给出针对移动目标的最优轨迹。

在实际飞行过程中,需要考虑编队避撞问题。2014年,伊朗伊斯兰阿扎德大学的 Shorakaei 等<sup>[16]</sup>将无人机之间避撞作为性能指标,采用基于概率的环境建模方法,研究了多无人机协同搜索问题。并运用平行遗传算法进行求解,设计了二维及三维的最优路径。遗传算法的优点是易于与其他算法相结合,并充分发挥自身迭代的优势,缺点是运算效率不高,不如蚁群等算法有先天优势。2013年,华中科技大学的丁明跃等<sup>[17]</sup>针对海上无人机路径规划问题,提出了一种基于量子行为粒子群优化的混合差分进化算法,用于在不同威胁环境下生成一条安全和可飞的路径。粒子群算法模拟鸟群飞行捕食行为,相比遗传算法规则更为简单,求解速度更快,但容易陷入局部收敛。

## 2.3 编队控制

### 2.3.1 编队队形设计与调整

1) 队形设计。在实际任务执行中,多无人机以不同的队形形成编队,如楔队、梯队、横队、纵队和V形等,可以实现协同侦察、防御和进攻等复杂任务。

合理有效的队形设计可以延长无人机编队飞行距离、节省燃料消耗、增加编队灵活性,这大大提高其安全性与任务完成率。2011年,英国机械工程师协会的报告<sup>[18]</sup>指出V字形队形最高可节省12%的燃料,这种编队模式用于跨洋飞行或长途飞行的客机编队,大大延长了飞行距离并节省燃料消耗。如图2所示,从任务需求的角度出发,新加坡南洋理工大学的朱森强等<sup>[19]</sup>针对多无人机固定区域的资源探测问题,设计了一种圆形编队队形,这种队形不仅能扩大探测半径,还能有效提高探测资源区域的效率,有效地完成了多无人机协同探测任务。从编队灵活性出发,2015年,英国贝尔法斯特女王大学 Lau 等<sup>[20]</sup>针对多无人机任意队形设计问题,通过提出基于张拉整体结构队形建模方法,得到多种稳定队形,这种队形构造方法实现了队形的灵活调整,并使多无人机适应了外界环境的变化。2009年,复旦大学万婧<sup>[21]</sup>指出实际空战中,编队战术通常是以基本的两机编队为单元,按照层级的概念建立起大规模的飞机编队。僚机在长机的前15°到后20°区域形成一字编队队形时,具有良好的攻击性和防御性,适合于高空;僚机在长机后30°到60°的区域时,整体操纵性良好,适合于低空。

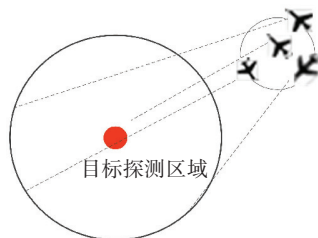


图2 圆形编队

Fig.2 Circular formation

2) 队形动态调整。面对复杂环境及任务的突然变化,能够尽可能短时间快速地生成各项性能指标最优的队形,是多无人机协同编队控制队形调整技术好坏的评价指标。恰当的队形变换方案能够提高燃料使用效率、灵活应对突发情况,实现编队的安全快速飞行。如图3所示,2013年,美国加利福尼亚大学 Richert 等<sup>[22]</sup>针对一对无人机中“Leader”角色的合理配置问题,提出一种分区协同算法,计算出了每架无人机作为“Leader”角色的行程区间。该算法有效解决了编队队形的动态调整问题,并最小化 leader-follower 角色的转化次数,使得整体编队燃料消耗与单架无人机燃料消耗的同时最少。2013年,厦门大学的罗德林等<sup>[23]</sup>提出一种通过控制编队间距实现队形变换的设计思想,有效地实现了编队队形的实时变换。2014年,巴西圣克鲁斯大学的 Giacomini 等<sup>[24]</sup>针对多无人机纵向队形与圆形队形

的转换问题,设计了一种基于轨迹分段的分布式算法,实现了队形的快速调整. 北京航空航天大学的海滨<sup>[25]</sup>利用混合粒子群遗传算法与鸽群仿生优化算法配置了控制器输出,实现了三维环境中原始队形向期望队形的动态调整问题.

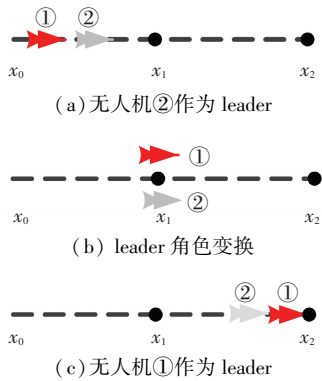


图 3 无人机 Leader 角色转换

Fig.3 Leader role transformation

2.3.2 编队飞行控制方法

在多无人机编队执行侦察和防御等任务时,需要多无人机保持一定队形编队飞行到任务执行区域. 编队保持的控制方法主要有 leader-follower 方法、基于行为法、虚拟结构法、图论法和基于一致性方法,每种编队方法适应不同环境,各有优缺点.

1) leader-follower 法. Leader-follower 方法是目前多无人机编队控制中最常用的方法之一. leader 跟踪一个预先给定的轨迹,follower 和 leader 轨迹保持一定构型,并速度达到一致. leader 可以看成是目标追踪的对象,或是整个多智能体的共同利益. 宾西法尼亚大学的 Desai 团队<sup>[26]</sup>对该方法做了大量理论和实验上的研究工作. 2012 年,该团队 Turpin 等<sup>[27]</sup>研究了改进的 leader-follower 编队方法,其中每架无人机从与之通信的其他无人机中间接获取跟踪的 leader 的状态. 如图 4 所示,2015 年,该团队 Saska 等<sup>[28]</sup>基于机载视觉感知设备和 leader-follower 方法实现了非 GPS 定位密集编队飞行. 目前,该团队研究还包括多智能体协作规划、避障、协作抓取和运输等理论工作.

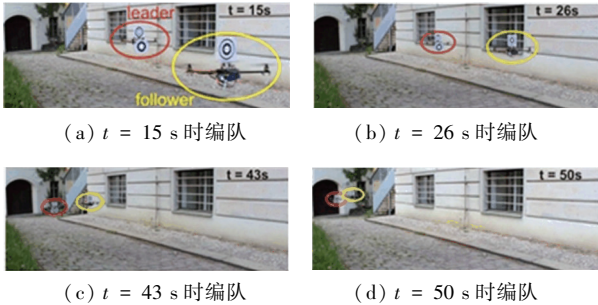


图 4 仅利用感知系统编队飞行实验<sup>[27]</sup>

Fig.4 Formation flight experiment based on sensing system<sup>[27]</sup>

如图 5 所示,受自然界鸟群编队飞行启发,2014 年,瑞士的苏黎世联邦理工大学 Nageli 等<sup>[29]</sup>利用机载视觉感知设备和通讯设备结合卡尔曼滤波算法对编队状态进行估计,从而实现了完全分布式的 leader-follower 编队飞行控制,并进行了室内和室外飞行实验.



图 5 编队飞行实验<sup>[29]</sup>

Fig.5 Formation experiment<sup>[29]</sup>

如图 6 所示,2016 年,加拿大的康戈迪亚大学 Ghamry 团队<sup>[30]</sup>将地面机器人作为 leader,空中四旋翼飞行器作为 follower,利用滑模控制方法设计编队控制器,实现了地面机器人与飞行器之间的编队. 2016 年,德黑兰阿米尔卡比尔理工大学 Aghdam 团队<sup>[31]</sup>通过将 follower 信息反馈给 leader,解决了 follower 出现问题时会引起编队失败的问题,并实现了四架四旋翼无人机协同搬取重物的仿真实验. 2015 年,国防科技大学刘欢等<sup>[32]</sup>针对编队通讯阻塞和通讯时滞问题,提出了基于状态估计算法和基于反步的分布式 leader-follower 编队控制方法,并实现了对多架无人机编队飞行的仿真.

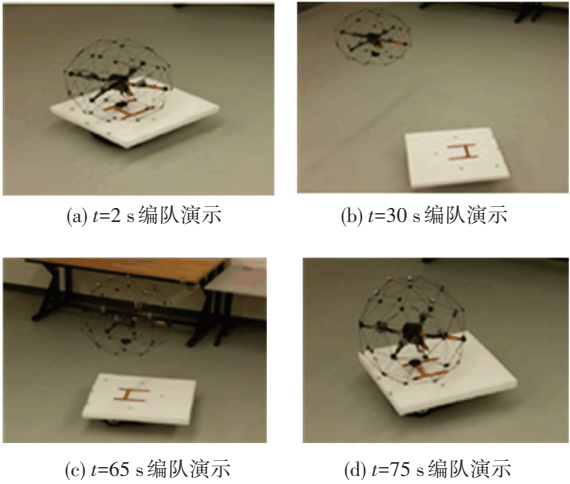


图 6 地面机器人与飞行器之间的编队演示<sup>[29]</sup>

Fig.6 Formation demononstration of UGV and UAV<sup>[29]</sup>

该方法将编队问题转化为了经典控制理论中的误差跟踪问题,具有较强的扩展性,而且该方法节约能量、减少通信花费、增强群体通信及保证群体方向。但在一些特定情况下,这种依赖于单个目标体状态的编队方法很难达到预期效果。

2) 基于行为法。基于行为的编队方法是定义无人机的几种基本控制行为,如跟随、避障和队形构成等,对定义的几种行为进行加权得到编队控制方法。这使系统中的每个单体都具备依据自身决策来协同其他单体完成目标或任务的能力。

受生物群体社会行为的启发,越来越多团队通过分析生物系统的行为规律研究多无人机编队飞行。1999年,美国杜克大学 Reif 等<sup>[33]</sup>针对编队中个别成员因故障而失效使得传感器获得的信息传输不完整的问题,提出了一种类似于行为的电势场方法,实现了存在个别成员故障失效情况下的编队。2003年,美国 Jadbabaie 等<sup>[34]</sup>对基于行为法进行了深入的分析,提出了最近邻协调思想。2009年, Kim 等<sup>[35]</sup>提出了一种基于反馈线性化方法设计的分布式行为控制器。2012年,河南理工大学宋运忠等<sup>[36]</sup>利用基于智能体行为的方法,通过反馈线性化将非线性模型转化为实用的双积分系统模型,解决了多智能体系统构形控制问题。2015年,Shin 等<sup>[37]</sup>提出了一种利用邻近无人机状态信息设计的基于行为法的分布式编队控制器,从而提高了多无人机群集编队的鲁棒性。2015年,北京航空航天大学的段海滨等<sup>[38]</sup>提出了一种基于鸽群特性的编队控制方法,该方法利用图论和势场函数理论对编队中的拓扑结构和群体中的主从关系进行定义,实现了对无人机紧密编队飞行的仿真。

在传感器数据错误或缺乏的情况下,基于行为法的多无人机编队能够综合考虑多无人机协同编队飞行中的多个行为,有效整合各种行为,从而使整个编队仍然可以保持。该方法根据预设信息和触发条件来形成控制指令,因此降低了编队的适应性和灵活性。

3) 虚拟结构法。虚拟结构法是一种集中式控制方法,由美国加利福尼亚大学 Lewis 等<sup>[39]</sup>在1997年首次提出。将编队作为一个虚拟刚体,在编队中设定一个虚拟长机或虚拟几何中心,队中所有无人机都参照虚拟长机或虚拟几何中心运动。

2001年,美国杨百翰大学 Beard 等<sup>[40]</sup>针对航天器的编队问题,综合利用虚拟结构、“长机-僚机”及行为方法的合成,实现了航天器在深度空间的编队飞行。如图7所示,2002年,美国加州理工学院 Saber 等<sup>[41]</sup>针对编队队形快速定位及队形稳定问

题,提出了基于二维空间的虚拟长机和几何中心的编队结构。

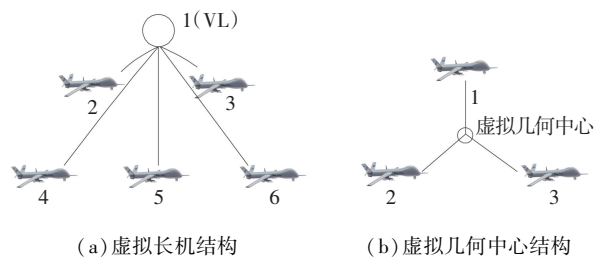


图7 虚拟编队结构图

Fig.7 The virtual formation structure diagram

2004年,美国加州大学河滨分校任伟等<sup>[42]</sup>针对多智能体编队运动过程中的扰动的影响,提出编队反馈控制方法;针对虚拟结构法集中控制的弊端,将分散控制引入虚拟结构法中<sup>[43]</sup>,并设计了基于虚拟结构法的空间飞行器编队飞行的分散式控制框架。2004年,日本东京工业大学 Yang 等<sup>[44]</sup>提出了基于虚拟结构的三维空间编队方式,该方法的应用更接近于实际情况。2006年,美国华盛顿大学 Lalish 等<sup>[45]</sup>基于虚拟结构法研究了三维空间中多智能体的编队跟踪问题。2008年,加拿大多伦多大学 Li 等<sup>[46]</sup>在文献<sup>[44]</sup>的基础上,结合同步控制器设计了多无人机自动编队飞行驾驶仪。2012年, Cai 等<sup>[47]</sup>针对无人机在未知环境中避障能力的问题,引入虚拟结构作为参考,提高了无人机在未知环境中的避障和躲避威胁的能力。2015年,印度阿米尔卡比尔理工大学 Askari 等<sup>[48]</sup>基于经典理论和逆动力学,提出了一种新的基于虚拟结构的编队飞行方法,提高了编队飞行过程中控制精度,并通过非线性自由度证明了所提出控制策略的有效性。

虚拟结构法避免了领航跟随者方法中领航无人机出现故障或毁机时编队无法保持的缺点。而且该方法通过把编队误差反馈加到控制器,得到了较高的编队控制精度。然而,合成虚拟长机和获取邻机位置,需要较高的通信质量和强计算能力,这使得编队可靠性较差。而且此方法要求编队飞行必须刚性运动,限制了实际飞行的应用范围。

4) 图论法。图论法利用拓扑图上的顶点来描述单个无人机,两点之间的边用来表述无人机间的关联/约束拓扑关系,例如感知、通信或控制连接等,将控制理论引入图中,可以构建编队控制策略。

刚性图论在编队中应用取得了比较大的进展<sup>[49]</sup>。一般来讲,刚性图处理的对象是无向图,即无人机之间的联系是双向的。在很多实际情况中,为了简洁通信量,多无人机系统常常利用有向图表示。2007年,比利时鲁汶大学 Hendrickx 等<sup>[50]</sup>等提出了

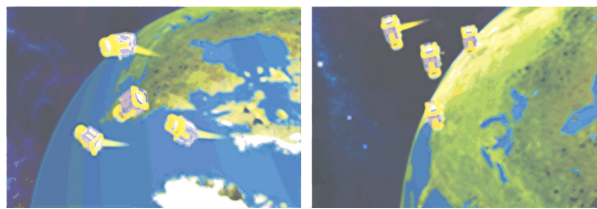
有向刚性的概念,给出了有向刚性的定义并给出了生成有向刚性图的策略.该团队在 2D 刚性图的基础上延伸到 3D 甚至更高维数,给出高维空间上的刚性图与有向图持久性的充分必要条件.2013 年,澳大利亚莫纳什大学 Barca 等<sup>[51]</sup>引入图论到多机器人编队中,完善领航者-追随者的多机器人控制机制,使多机器人形成二维编队而不需要彼此通信.2014 年,美国 Zhang 等<sup>[52]</sup>利用一阶积分模型和刚性图理论,设计了指数稳定的编队控制器,使得编队中多个个体间形成期望队形.2016 年,美国路易斯安那州立大学 Ramazani 等<sup>[53]</sup>针对不同平面运动个体间的协同控制问题,利用刚性图论分别对单积分和双积分模型进行了协同仿真实验.燕山大学罗小元等<sup>[54-55]</sup>针对多智能体最优刚性编队问题,设计了最优持久编队自动生成算法,生成了最优持久编队.

利用刚性图可以表示任意队形,且图论有成熟的理论作为研究基础,但是仿真研究实现较难.

5)一致性法.所谓一致性是指智能体利用与之通信的邻居智能体的状态信息更新自身的状态,并最终使所有智能体状态达到一致.采用一致性理论进行多无人机编队控制研究,基于分布式网络实现无人机之间信息感知与交互,可以实时应对突发情况,提高编队安全性.

一致性概念最早出现在计算机分布式计算网络化的动态系统中.2004 年,美国加利福尼亚大学 Saber 等<sup>[56]</sup>得到多智能体系统一致收敛的充要条件是拓扑图是连通的.2005 年,任伟等<sup>[57]</sup>证明了有向网络拓扑只要存在生成树结构,则所智能体可实现全局一致收敛.任伟等<sup>[58]</sup>和 Jadbabaie 等<sup>[59]</sup>研究得到动态网络拓扑下多智能体实现一致性收敛的充要条件:在任意时间段的网络拓扑都有一个生成树结构,则多智能体可实现一致性收敛.任伟等<sup>[60]</sup>进而将一致性控制引入到多智能体编队控制系统中.2009 年,韩国首尔大学 Seo 等<sup>[61]</sup>针对多无人机时变编队问题,采用基于一致性反馈线性化方法,保证了多无人机按照给定时变队形进行编队飞行.2011 年,德克萨斯大学 Jamshidi 等<sup>[62]</sup>等针对异构多智能体协同编队控制问题,利用全球定位系统对无人机进行航路点导航,对每架无人机设计一致性协议,实现地面机器人和多架无人机的协同控制.2012 年,Matthew 等<sup>[63]</sup>针对微小无人机紧密编队通过一个三维环境的问题,通过引入相对位置误差,设计非线性一致性分散控制器,实现了 4 架四旋翼无人机的紧密编队飞行.2014 年,日本庆应大学 Kuriki 等<sup>[64]</sup>针对多无人机协同控制问题,提出了具有防撞能力一致性协同编队控制策略,实现了四旋翼协同编队飞

行并解决了机间防撞.2015 年,该团队<sup>[65]</sup>采用分散式模型预测控制和基于一致性的控制,实现了多无人机具有防撞能力的协同编队飞行.2013 年,东南大学李世华等<sup>[66]</sup>通过有限时间一致性算法处理了有领航者和无领航者的编队控制问题.2013 年,邢关生等<sup>[67]</sup>研究小型旋翼机群编队问题,在串级控制系统框架下提出一种基于 Hamilton 环的通信拓扑设计方案.如图 8 所示,天津大学宗群等<sup>[68]</sup>针对飞行器姿态同步问题,采用 leader-follower 结合基于行为和一致性的方法,设计了有限时间姿态同步控制器,实现了多个飞行器有限时间同步问题.



(a) 航天器编队初始姿态 (b) 航天器同步姿态编队

图 8 航天器编队姿态同步

Fig.8 Spacecraft formation attitude synchronization

基于一致性进行分布式大规模编队具有良好的灵活性和适应性,同时编队鲁棒性也不会因某架无人机损伤或毁机而降低.同时改变的是不依赖某一控制单元,并且某架无人机发生故障对整体队形不会有太大影响.但是分布式控制算法比较复杂,对通信信道容量及通信时延的要求较高,目前的所设计的编队控制器不能长时间保障所有无人机收敛到一致状态.

为了避免几种方法缺点,人们提出了很多综合多种方法优点的改进方法.2016 年,波兰比亚韦斯托克科技大学 Kownacki<sup>[69]</sup>针对多无人机编队过程中机间通信问题,提出一种结合虚拟结构、leader-follower 方法及基于行为的编队方法,提高了无人机编队飞行过程中机间信息共享的可靠性和吞吐量.其他编队控制方法还有模型预测控制、模糊逻辑、神经网络技术、信息感知视觉传感器等方法,可以实现机群间通信不完整情况下编队飞行.

### 2.3.3 编队重构及避撞

多无人机编队重构包括队形切换及缺少一架或多架无人机时新编队队形的重构,在队形重构过程中必须考虑机间避撞.例如,多无人机编队飞行执行任务时,需要规避雷达、电磁干扰、敌机和较大障碍物,变换合适的队形可以增加任务完成率.实现无人机编队重构的方法有:1)势能域函数方法;2)滚动时域法;3)模型预测法;4)生物算法;5)最优控制法.

2010 年,新加坡南洋理工大学 Lie 等<sup>[70]</sup>针对固

定翼无人机编队重构控制问题, 给出最终的编队位置和重构时间, 设计了带有防撞机制的滑模跟踪控制器, 最终实现了安全队形重构. 2015 年, 印度特里凡得琅工程学院 Rajasree 等<sup>[71]</sup>针对无障碍物多无人机编队重构问题, 通过合适地选择时变编队向量形成任意期望编队, 实现了环形编队中一架出现故障时编队的重构情况. 2016 年, 加拿大女王大学 Hafez 等<sup>[72]</sup>针对无人机协同编队重构问题, 采用基于学习的模型预测控制方法, 实现了无人机形成紧密编队安全绕过静止障碍物. 2016 年, 新加坡国立大学廖峰团队<sup>[73]</sup>应用势能域函数方法对垂直起降无人机系统外环设计了编队及重构控制器, 又对内环设计鲁棒跟踪控制器, 实现了垂直起降无人机编队飞行与重构问题.

在国内, 2012 年, 北京航空航天大学段海滨团队<sup>[74]</sup>采用基于鸽群优化方法, 设计了终端状态和控制动作能量约束下的多无人机编队重构控制器, 实现了最优的多无人机编队重构. 2014 年, 该团队利用滚动时域方法将多无人机编队全局重构问题转化成几个在线局部最优问题<sup>[75]</sup>, 利用差分进化 (DE) 算法优化各无人机控制序列, 最终使多无人机形成新的队形. 2015 年, 大连理工大学彭会军等<sup>[76]</sup>提出了一种新的辛迭代数值算法, 以获得最佳的解决方案的非线性滚动时域控制策略, 使得多无人机在编队重构过程中更快速形成编队并且对参数具有强鲁棒性. 2016 年, 沈阳航空航天大学张红梅等<sup>[77]</sup>通过设计编队重构时的安全距离, 将编队重构问题转化成带有约束的时间最优控制问题. 2016 年, 景德镇陶瓷学院王建红等<sup>[78]</sup>提出了自主重构的内点算法, 将编队重构问题最终转化成标准非线性单目标最优化问题.

其他编队重构的思路还有: 2009 年, 捷克布拉格捷克理工大学 Spinka 等<sup>[79]</sup>设计了一个新的分布式分层结构, 实现了故障时遥控自动驾驶多无人机重构; 2014 年, 巴西圣克鲁斯州立大学 Giacomini 等<sup>[80]</sup>提出了一种分段算法, 算法重新配置了每架无人机的纬度, 并利用导航协助每架无人机完成编队重构.

2.4 信息感知与数据融合

无人机通过红外探测仪, 摄像机和雷达等机载传感器设备对周围环境进行探测, 实现对空地环境的感知. 无人机还具有编队内部感知能力, 来保持编队构型和实现协同编队飞行, 提高多无人机编队安全性和可靠性. 无人机将感知信息进行机间共享, 通过信息处理与数据融合实现无人机编队协同感知, 从而获得更广的探测范围和更加精确全面的

环境信息, 完成多无人机协同编队侦察等任务.

多无人机编队协同感知必须解决无人机异质传感器多源信息的融合处理问题, 实现无人机对环境准确高效的判读. 2007 年, 葡萄牙里斯本技术大学 Lima 等<sup>[81]</sup>针对自主传感器和机器人网络对目标的协同定位问题, 采用贝叶斯方法解决多传感器信息融合问题以及广义传感器网络自身状态估计问题, 提升了对观测目标协同定位的精确度. 2008 年, 美国蒙特里海军研究生院 Lee<sup>[82]</sup>针对多传感器信息融合问题, 提出了一种新的不确定信息滤波器算法, 该算法通过统计线性误差传播方法处理不确定数据, 得到了未知信息的不确定性程度. 2010 年, 国防科学技术大学王林等<sup>[83]</sup>针对多移动传感器测量的融合估计问题, 基于无色变换、交互多模型和信息滤波算法, 提出了一种面向多无人机协同感知的分布式融合估计方法, 而且无色变换能保证更高的估计精度, 可以提高多无人机的融合估计性能.

如图 9 所示, 无人机将感知信息进行机间共享, 通过信息处理和数据融合技术实现无人机编队协同感知, 从而获得更广的探测范围和更加精确全面的环境信息. 2003 年, 澳大利亚悉尼大学 Ridley 等<sup>[84]</sup>在其专著里面设计了一种实时分布式机载数据融合系统, 包括视觉传感器和毫米波雷达, 实现了对多个地面目标进行跟踪. 2007 年, 美国康奈尔大学 Campbell 等<sup>[85]</sup>针对多无人机的目标跟踪问题, 提出了一种基于平方根的 sigma-point 信息滤波算法, 该算法通过数据融合实现了两架无人机的目标跟踪, 并且该算法在数据丢失和出现延时也能提供准确信息, 具有高实时性和强鲁棒性. 2008 年, 西安电子科技大学杨百胜等<sup>[86]</sup>针对多传感器融合跟踪问题, 采用多个被动传感器集中式融合跟踪策略, 提出了基于无迹卡尔曼滤波的被动多传感器融合跟踪算法, 进行了 3 个被动站跟踪的仿真研究, 验证了其算法比传统 EKF 方法的跟踪精度更高.

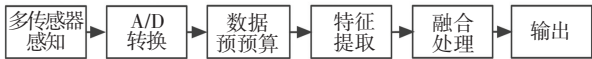


图 9 多传感器数据融合过程

Fig.9 The process of the multisensor data fusion

2006 年, 西班牙帕布罗德奥拉维德大学 Merino 等<sup>[87]</sup>针对火灾探测问题, 设计了一种异构多无人机的协同感知系统, 该系统包括红外探测仪、视觉传感器和火灾探测仪, 利用数据融合算法处理多种传感器数据进行协同感知, 实现了对森林火灾的检测识别, 减少了对火灾错误报警次数. 2014 年, 美国宾夕法尼亚大学的 GRASP 实验室 Shen 等<sup>[88]</sup>针对无人机的自主飞行和路径规划问题, 提出了一种模块化

和可扩展性的方法,融合了多种传感器数据,针对四旋翼无人机自主飞行提供了一种全局一致的实时位置估计方法. 该实验室使用激光雷达,立体摄像头,压力高度计,磁力计和 GPS,通过 Intel NUC 第三代 i3 处理器来进行状态估计和控制. 实验中,全部飞行时间约 8 min,以 1.5 m/s 飞行 445 m. 该团队还解决了无人机的大尺度,融合多种传感器的室内-室外自主定位和路径规划问题. 2016 年,伊朗德黑兰大学 Abdi 等<sup>[89]</sup>针对无人机位姿估计问题,提出了一种融合无人机图像信息、高度计和 IMU 数据的方法,通过 EKF 算法将多传感器观测信息与 IMU 运动模型结合,实现了对无人机位姿参数的准确估计.

## 2.5 编队通信

目前,多数国家仍采用地面站直接控制无人机,构建一种星型拓扑结构. 多无人机通信组网的思想是:无人机不完全依赖地面站或卫星等设施的控制,将所有无人机看作一个整体,在多无人机间建立一个无线通信网络,各无人机间相互配合,相互转发指令、交换信息. 该网络打破了无人机之间没有任何联系与合作的传统作战思想,可以提高无人机的综合作战能力,减小作战能耗.

2011 年,澳大利亚新南威尔士大学 Ahmed 等<sup>[90]</sup>针对无人机与地面站、无人机与无人机之间的链路特性进行研究,为多无人机通信组网的设计提供了基础. 2013 年,土耳其空军学院 Bekmezci 等<sup>[91]</sup>从节点移动性、节点密度、拓扑变化频率和功耗等方面,介绍了飞行自组网不同于其他自组织网络,并分层总结了飞行自组网的相关协议. 2016 年,美国华盛顿大学 Gupta 等<sup>[92]</sup>研究了现有技术应用于航空网络存在的问题,通过调研现有技术对航空网络的可用性,研讨了各种技术的优缺点,并从路由、无缝切换和节能领域进行了详细分析.

如图 10 所示,无人机高速移动容易造成链路中断,使得移动自组网 (mobile ad hoc network, MANET) 和车载自组网 (vehicle ad hoc network, VANET) 的组网协议不能直接应用. 自组网中 MAC 协议和路由算法的设计是无人机通信组网的最大挑战,MAC 协议直接影响到网络的吞吐量和端到端延时,而路由算法的设计需要适应节点高速移动带来的拓扑变化、链路寿命短暂等特点,并能与其他网络兼容互联. 2004 年,美国科罗拉多大学波尔得分校 Brown 等<sup>[93]</sup>采用基于全向天线的 IEEE 802.11 标准,通过使用 RTS/CTS 机制有效地解决隐藏终端问题. 2013 年,加拿大通讯研究中心 Cai 等<sup>[94]</sup>提出了一种全双工通信和多包接收的令牌协议,通过更新信道状态信息,有效消除传输过程中的碰撞. 对于

自组网中高可靠性路由算法的研究,2010 年,美国西密歇根大学 Alshbatat 等<sup>[95]</sup>基于最优链路状态路由 (optimized link state routing, OLSR) 协议,通过引入定向天线,提出了 DOLSR (directional optimized link state routing) 协议,并利用飞行信息 (状态变量、倾斜度、偏航程度) 进行路由选择,减小了端到端延迟. 2016 年,瑞士联邦理工学院 Rosati 等<sup>[96]</sup>考虑无人机之间的相对速度,利用 GPS 信息,针对飞行自组织网络提出基于预测的 OLSR (P-OLSR) 协议, P-OLSR 协议有效降低丢包率,提高了吞吐量.

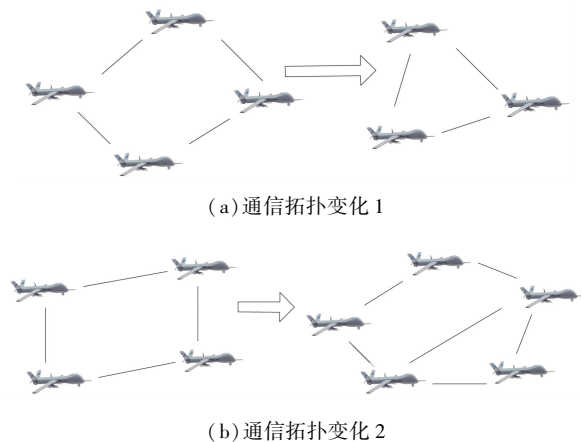


图 10 多无人机网络拓扑变化

Fig.10 Multi UAV network topology change

目前,无人机编队通信的研究都是针对某一性能进行改进,仍停留在理论层面,没有应用在实际工程中,也没有实现与其他平台的互联互通,因此需要针对无人机的运动和网络特性进行通信组网设计,并建立通信标准协议.

## 2.6 编队仿真平台

搭建满足多无人机协同编队仿真的多无人机仿真平台,对于加快开发周期,降低多无人机编队试验成本,具有十分重要的意义. 当前国内外已有一些针对无人机编队或多无人机仿真系统的研究,主要分为如下 4 类.

1) 单系统仿真平台. 利用 C++ 开发出了 Multi 无人机 2 系统<sup>[97]</sup>,用于协同控制研究. 美国陆军研究所 Garcia<sup>[98]</sup>基于商用飞行模拟器软件 X-Plane 和 MATLAB 开发的多无人机仿真平台,实现了 4 台无人机编队仿真. 清华大学周昊等<sup>[99]</sup>基于多 Agent 技术开发出了名为无人机 sim 的仿真平台,采用分层的体系结构,在单系统内将算法、内核和显示完全分离,实现了多无人机的仿真. 此类系统成本较低,又可以验证无人机机群控制及协同规划算法,但与真实无人机编队的分布式体系结构不符,不能有效仿真无人机编队协同任务规划的全过程.

2) 基于 HLA (high level architecture) 架构的分

布式系统仿真平台. HLA 是由美国国防部在 90 年代末提出的,是目前分布式系统仿真的主要技术之一. 基于 HLA 的仿真不需要处理底层通信传输、仿真运行管理的细节,实验者可将主要精力放在具体的仿真功能实现上. 部分公司开发出基于 HLA 的仿真平台,比如 VR-Forces、FLAMES 等,它们对底层的 RTI 进行了封装,提供了更加灵活强大的 API 函数,降低了开发难度. 合肥工业大学王国强等开发出了基于 VR-Force 的分布式的无人机编队协同任务规划仿真系统,能够仿真多种任务场景下的无人机编队协同任务规划过程,以帮助验证不同类型的协同任务规划算法,仿真展示度高,但是也带来了较高的建设成本<sup>[100]</sup>.

3) 自主开发的多飞行器编队分布式虚拟系统仿真平台. 该类平台是对除了 HLA 架构以外所有的分布式仿真平台的概括. 天津大学宗群团队<sup>[101-102]</sup>开发的多飞行器编队仿真平台,由模型计算机、系统主控计算机、视景显示计算机、PC104 控制器、无线 AP/路由器以及 Wi-Fi 无线通信模块组成. 模型计算机采用 xPC 仿真环境,运行单飞行器动力学以及环境模型;系统主控计算机发出任务指令,并监控整个系统的运行;视景显示计算机实时地进行视景显示;PC104 控制器运行飞行控制算法,实现对单飞行器的控制;无线 AP/路由器作为系统无线网络的中转站,实现信息交换;Wi-Fi 无线通信模块使有线通信方式转为无线连接. 实现了对于多飞行器编队系统的实时仿真、视景显示、算法验证、通信组网等功能. 该团队突破了 xPC 平台和 dSPACE 平台两项关键技术,实现了对于多无人机编队飞行控制算法的半实物仿真验证与性能评估. 此类平台灵活度较大,可以有效对协同控制算法和轨迹优化算法进行仿真验证,但内部通信机制和管理机制的搭建,需要自主研发,具有一定难度. 多无人机虚拟仿真平台结构见图 11,相应的 MATLAB 仿真图和虚拟室景显示图见图 12.

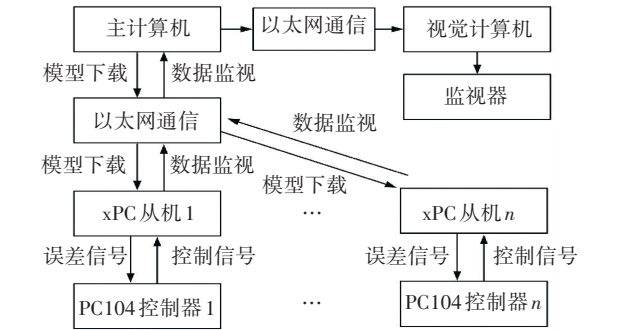
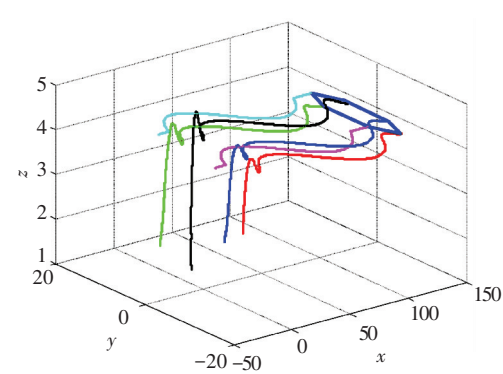


图 11 多无人机虚拟仿真平台结构

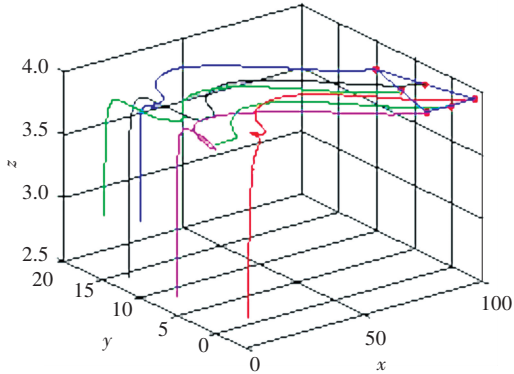
Fig.11 Structure of multi UAVs virtual simulation platform



(a) 正六边形编队飞行 MATLAB 仿真图



(b) 正六边形编队飞行虚拟室景图



(c) V 字形编队飞行 MATLAB 仿真图



(d) V 字形编队飞行虚拟室景图

图 12 六架无人机编队飞行 MATLAB 仿真图与虚拟室景图  
Fig.12 MATLAB simulation diagram and virtual room view of six unmanned aerial vehicles formation flight

4) 自主开发的多无人机编队分布式实物系统仿真平台. 多无人机实物仿真平台结构图见图 13, 室内编队飞行图如图 14 所示. 整个系统由室内定位系统、多无人机、ZigBee 无线传输以及地面站组成. 首先室内定位系统借助红外摄像头对各无人机上的标记点进行抓拍,通过解算实时地计算出每架

无人机的当前位置,并以 TCP/IP 协议的方式发送给地面站;地面站借助 ROS 通信机制,在接收定位系统数据的同时运行相关决策算法,计算出每架无人机下一时刻的期望位置,并通过 ZigBee 无线通信发送出去;无人机通讯网络以分布式、自组网的形式进行搭建,每架无人机均可与地面站通信,同时彼此间也可以进行数据交互;各无人机接收地面站传来的数据,提取自身当前位置与期望位置,运行机载控制算法,驱动无人机运动到设定的位置,如此循环往复,最终实现多无人机编队飞行的仿真实验。目前该平台已突破 XBEE 分布式网络和 PIXHAWK 开源飞控两项关键技术,并成功嵌入人工势场法、图论法等编队理论算法。在室内也已实现定点、直线、圆等常用队形演示,同时在飞行过程中可实时对无人机编队进行队形切换。该平台可以为多无人机飞行过程算法提供数据支持,并可以直接充当演示效果。所以,该平台可以很好的为理论研究服务,避免不必要的经费投入。

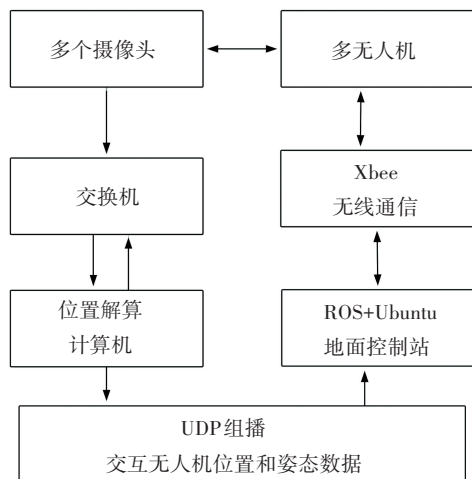


图 13 多无人机实物仿真平台结构图

Fig.13 Structure of physical multi UAVs simulation platform

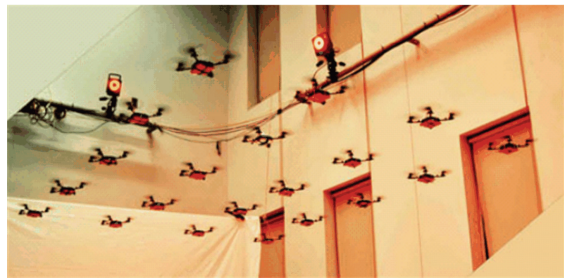


图 14 多无人机编队飞行图

Fig.14 Multi UAVs formation flight chart

### 3 结论与展望

通过对近年来国内外多无人机协同编队飞行控制几个关键技术的进展的综述,同时展望了每种关键技术发展趋势,具体得出以下结论:

1)现有的任务分配和航迹规划主要针对离线无人机编队任务分配和航迹规划展开研究,未来研究应围绕复杂环境及有限通信环境下的无人机编队实时任务分配和多异构无人机编队实时协同航迹规划展开。

2)多无人机编队飞行的控制方法大部分实现了 2 维编队,对于 3 维立体编队的编队控制策略研究很少。如何综合利用各种编队控制方法的优点,实现多无人机在复杂环境和突发情况下的编队形成、保持与重构,是未来研究者所要追寻的目标。

3)针对无人机多传感器数据融合问题的研究与实现主要停留在单个无人机携带的多传感器进行数据融合,而对多无人机编队所携带的多传感器数据融合问题的研究较少,且大多停留在理论与算法研究上。如何通过合理利用多无人机编队的多传感器进行协同感知,扩大感知范围,提升感知精度,是未来多无人机编队需要研究重点问题。

4)编队间的通信研究都是针对某一性能进行的改进,仍停留在理论层面,没有应用在实际工程中;未来需要结合现有移动自组网技术建立通信标准构建无人机自组织网络,实现无人机与其他平台的互联互通。

5)仿真平台大部分是对已有算法的仿真和验证,对多无人机编队飞行实物演示验证较少。编队仿真平台应以分布式结构为主流,针对实物硬件及虚拟软件环境进行系统集成,推动并简化计算,以便更好地适应多核技术迅速发展的背景。

总之,多无人机协同编队飞行控制的理论虽然取得了丰富成果,但是随着环境日益复杂和任务的多种多样,各种多无人机协同编队飞行关键技术也需要迅速发展。未来会出现异构多无人机之间的协同编队,并且通信环境会异常复杂,感知约束也会随环境的复杂而增大,迫切需要开展在感知约束和复杂通信环境下的强鲁棒、高精度编队控制设计研究。

### 致 谢

感谢赵欣怡、邢娜、鲁瀚辰、杨山、刘鹏浩、陈扬、冯聪同学对本文中队形设计与动态调整、编队通信、编队控制、信息感知与融合及编队仿真平台等工作提供的帮助。

### 参考文献

- [1] 陈增强,李毅,孙明玮,等. 四旋翼无人机飞行器 ADRC-GPC 控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 176-180.  
CHEN Zengqiang, LI Yi, SUN Mingwei, et al. ADRC-GPC control of a quad-rotor unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Harbin institute of Technology, 2016, 48(9): 176-180.
- [2] 袁政英. 美空军未来 20 年小型无人机发展路线图[J]. 防务视

- 点, 2016 (10): 58-59.
- YUAN Zhengying. United States Air Force in the next 20 years the development of a small UAV Roadmap [J]. DEFENSE POINT, 2016(10): 58-59.
- [3] MCGREW J S, HOW J P, WILLIAMS B, et al. Air-combat strategy using approximate dynamic programming [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2010, 33(5): 1641-1654. DOI: 10.2514/1.46815.
  - [4] SUJIT P B, GHOSE D. Self assessment-based decision making for multiagent cooperative Search [J]. Automation Science and Engineering IEEE Transactions on, 2011 (4): 705-719. DOI: 10.1109/TASE.2011.2155058.
  - [5] MANATHARA J G, SUJIT P B, BEARD R W. Multiple UAV coalitions for a search and mission [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 62(1): 125-158. DOI: 10.1007/s10846-010-9439-2.
  - [6] MARDEN J R, ROUGHGARDEN T. Generalized efficiency bounds in distributed resource allocation [J]. Automatic Control IEEE Transactions on, 2011, 59(3): 2233-2238. DOI: 10.1109/TAC.2014.2301613.
  - [7] MARDEN J R, WIERMAN A. Distributed welfare games [J]. Operations Research, 2013, 61(1): 155-168. DOI: 10.1287/opre.1120.1137.
  - [8] SUJIT P B, SARIPALLI S. An empirical evaluation of co-ordination strategies for an AUV and UAV [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 70(1): 373-384. DOI: 10.1007/s10846-012-9728-z.
  - [9] KIM M H, BAIK H, LEE S. Response threshold model based UAV search planning and task allocation [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 75(3): 625-640. DOI: 10.1007/s10846-013-9887-6.
  - [10] MALVANKAR-MEHTA M S, MEHTA S S. Optimal task allocation in multi-human multi-robot interaction [J]. Optimization Letters, 2015, 9(8): 1-17. DOI: 10.1007/s11590-015-0890-7.
  - [11] WEI H L, ISA N A M. Particle swarm optimization with dual-level task allocation [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 38: 88-110. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.022.
  - [12] KOTHARI M, POSTLETHWAITE I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 71(2): 231-253. DOI: 10.1007/s10846-012-9776-4.
  - [13] ZHANG Xiangyin, DUAN Haibin. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning [J]. Applied Soft Computing, 2015, 26(C): 270-284. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.09.046.
  - [14] BERGER J, LO N, BARKAOUI M. Static target search path planning optimization with heterogeneous agents [J]. Annals of Operations Research, 2016, 244(2): 295-312. DOI: 10.1007/s10479-016-2145-0.
  - [15] LIANG Xiao, MENG Guanglei, LUO Haitao, et al. Dynamic path planning based on improved boundary value problem for unmanned aerial vehicle [J]. Cluster Computing, 2016, 19(4): 2087-2096. DOI: 10.1007/s10586-016-0650-1.
  - [16] SHORAKAEI H, VAHDANI M, GHOLAMI B I A. Optimal cooperative path planning of unmanned aerial vehicles by a parallel genetic algorithm [J]. Robotica, 2014, 34(4): 823-836. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.09.046.
  - [17] FU Yangguang, DING Mingyue, ZHOU Chengping, et al. Route planning for unmanned aerial vehicle (UAV) on the sea using hybrid differential evolution and quantum-behaved particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2013, 43(6): 1451-1465. DOI: 10.1109/TSMC.2013.2248146.
  - [18] 杨孝文. 未来五大客机新技术 [J]. 厦门航空, 2012(1): 88-89.
  - [19] YANG Xiaowen. The new technology in the future five aircraft; V formation flight more fuel-efficient [J]. Xiamen Air, 2012(1): 88-89.
  - [20] ZHU S Q, WANG D, LOW C B. Cooperative Control of Multiple UAVs for Moving Source Seeking [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 70(1): 293-301. DOI: 10.1007/s10846-013-9899-2.
  - [21] LAU S Y, NAEEM W. Co-operative tensegrity-based formation control algorithm for a multi-aircraft system [C]// American Control Conference. Chicago: IEEE, 2015: 750-756. DOI: 10.1109/AC C.2015.7170824.
  - [22] 万婧. 无人机自主编队飞行控制系统设计方法及应用研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2009.
  - [23] WAN Jing. Research on design method and application of autonomous formation flight control system for UAV [D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
  - [24] RICHERT D, CORTÉS J. Optimal leader allocation in UAV formation pairs ensuring cooperation [J]. Automatica, 2013, 49(11): 3189-3198. DOI: 10.1016/j.automatica.2013.07.030.
  - [25] LUO Delin, XU Wenlong, WU Shunxiang, et al. UAV formation flight control and formation switch strategy [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Computer Science and Education. Colombo: IEEE Press, 2013: 264-269. DOI: 10.119/ICCSE.2013.6553922.
  - [26] GIACOMIN P A S, HEMERLY E M. Reconfiguration between longitudinal and circular formations for multi-UAV systems by using segments [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 78(2): 339-355. DOI: 10.1007/s10846-014-0063-4.
  - [27] DUAN Haibin, LUO Qinan, SHI Yuhui, et al. Hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for multi-UAV formation reconfiguration [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2013, 8(3): 16-27. DOI: 10.1109/MCI.2013.2264577.
  - [28] DESAI J P, OSTROWSKI J, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven: IEEE Press, 1998: 2864-2869. DOI: 10.1109/ROBOT.1998.680621.
  - [29] TURPIN M, MICHAEL N, KUMAR V. Trajectory design and control for aggressive formation flight with quadrotors [J]. Autonomous Robots, 2012, 33(1/2): 143-156. DOI: 10.1007/s10514-012-9279-y.
  - [30] SASKA M, BACA T, THOMAS J, et al. System for deployment of groups of unmanned micro aerial vehicles in GPS-denied environments using onboard visual relative localization [J]. Autonomous Robots, 2017, 41(4): 919-944. DOI: 10.1007/s10514-016-9567-z.
  - [31] NAGELI T, CONTE C, DOMAHIDI A, et al. Environment independent formation flight for micro aerial vehicles [C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago: IEEE Press, 2014: 1141-1146. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942701.
  - [32] GHAMRY K A, DONG Y, KAMEL M A, et al. Real-time autonomous take-off, tracking and landing of UAV on a moving UGV platform [C]// Mediterranean Conference on Control and Automation.

- Athens: IEEE, 2016, 1236–1241.
- [31] AGHDAM A S, MENHAJ M B, BARAZANDEH F, et al. Cooperative load transport with movable load center of mass using multi-plequadrotor UAVs [C]// 2016 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation. Qazvin: IEEE Press, 2016; 23–27. DOI: 10.1109/ICCIAutom.2016.7483130.
- [32] LIU Huan, WANG Xiangke, ZHU Huayong. A novel backstepping method for the three-dimensional multi-UAVs formation control [C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing: IEEE Press, 2015, 923–928. DOI: 10.1109/ICMA.2015.7 237609.
- [33] REIF J H, WANG H. Social potential fields: A distributed behavioral control for autonomous robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999, 27: 171–194. DOI: 10.1016/S0921–8890(99)00004–4.
- [34] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(6): 988–1001. DOI: 10.1109/TAC.2003.812781.
- [35] KIM S, KIM Y, TSOURDOS A. Optimized behavioural UAV formation flight controller design [C]// Proceedings of the European Control Conference. Budapest: IEEE Press, 2009: 4973–4978.
- [36] 宋运忠, 杨飞飞. 基于行为法多智能体系统构形控制研究[J]. *控制工程*, 2012, 19(4): 687–690.
- SONG Yunzhong, YANG Feifei. On formation control based on behavior for second-order multi-agent system[J]. *Control Engineering of China*, 2012, 19(4): 687–690.
- [37] SHIN J, KIM S, SUK J. Development of robust flocking control law for multiple UAVs using behavioral decentralized method[J]. *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2015, 43(10): 859–867. DOI: 10.5139/JKSAS.2015.43.10.859.
- [38] QIU Huaxin, DUAN Haibin, FAN Yanming. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 1298–1304. DOI: 10.7641/CTA.2015.50314.
- [39] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures [J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387–403. DOI: 10.1023/A:1008814 708459.
- [40] BEARD R W, LAW J, HADAEGH F Y. A coordination architecture for spacecraft formation control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(6): 777–790. DOI: 10.1109/87.960341.
- [41] SABER R O, MURRAY R M. Distributed structural stabilization and tracking for formations of dynamic multi-agents [C]// Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas: IEEE Press, 2002: 209–215. DOI: 10.1109/CDC.2002.1184493.
- [42] REN Wei, BEARD R. Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2004, 5(3): 357–368. DOI: 10.1049/ip-cta: 20040484.
- [43] REN Wei, BEARD R. Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2004, 27(1): 73–82. DOI: 10.2514/1.9287.
- [44] YANG E, MASUKO Y, MITA T. Dual controller approach to three-dimensional autonomous formation control[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2004, 27(3): 336–346. DOI: 10.2514/1.1562.
- [45] LALISH E, MORGANSEN K, TSUKAMAKI T. Formation tracking control using virtual structures and deconfliction [C]// IEEE Conference on Decision & Control. San Diego: IEEE Press, 2006: 5699–5705. DOI: 10.1109/CDC.2006.377187.
- [46] LI N H M, LIU H H T. Formation UAV flight control using virtual structure and motion synchronization [C]// American Control Conference. Washington: IEEE Press, 2008: 1782–1787. DOI: 10.1109/ACC.2008.4586750.
- [47] CAI Da, SUN Jian, WU Sentang. UAVs formation flight control based on behavior and virtual structure [M]. Berlin: Springer, 2012: 429–438. DOI: 10.1007/978–3–642–34387–2\_49.
- [48] ASKARI A, MORTAZAVI M, TALEBI H A. UAV formation control via the virtual structure approach [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 28(1): 1738–44. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943–5525.0000351.
- [49] LAMAN G. On graphs and rigidity of plane skeletal structures [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 1970, 4(4): 331–340. DOI: 10.1007/BF01534980.
- [50] HENDRICKX J M, ANDERSON B, DELVENNE J C, et al. Directed graphs for the analysis of rigidity and persistence in autonomous agents systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2007, 17: 960–981. DOI: 10.1002/rnc.1145.
- [51] BARCA J C, SEKERCIOGLU A, FORD A. Controlling formations of robots with graph theory [M]// *Intelligent Autonomous Systems 12*. Berlin: Springer, 2013: 563–574. DOI: 10.1007/978–3–642–33932–5\_52.
- [52] ZHANG Pengpeng, QUEIROZ M D, CAI Xiaoyu. 3D Dynamic formation control of multi-agent systems using rigid graphs [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2014, 137(11): 1–7. DOI: 10.1115/1.4030973.
- [53] RAMAZANI S, SELMIC R R, QUEIROZ M D. Chapter thirteen—multiagent layered formation control based on rigid graph theory [M]. *Control of Complex Systems*. Blacksburg: Elsevier, 2016: 397–419. DOI: 10.1016/B978–0–12–805246–4.00013–6.
- [54] LUO Xiaoyuan, SHAO Shikai, ZHANG Yuyan, et al. Generation of minimally persistent circle formation for a multi-agent system [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(2): 614–622. DOI: 10.1088/1674–1056/23/2/028901.
- [55] 罗小元, 邵士凯, 关新平, 等. 多智能体最优持久编队动态生成与控制 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(9): 1431–1438. DOI: 10.3724/SP.J.1004.2013.01431.
- LUO Xiaoyuan, SHAO Shikai, GUAN Xinping, et al. Dynamic generation and control of optimally persistent formation for multi-agent systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(9): 1431–1438. DOI: 10.3724/SP.J.10 04.2013.01431.
- [56] SABER R O, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1520–1533. DOI: 10.1109/TAC.2004.8341 13.
- [57] REN Wei, BEARD R W, MCLAIN T W. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems [J]. *Lecture Notes in Control & Information Sciences*, 2005, 309: 439–442. DOI: 10.1007/978–3–540–31595–7\_10.
- [58] REN Wei, BEARD R W. Consensus of information under dynamically changing interaction topologies [C]// IEEE American Control Conference. Boston: IEEE Press, 2004: 4939–4944.
- [59] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. *IEEE*

- Transactions on Automatic Control, 2003, 48 (6): 988–1001. DOI: 10.1109/CDC.2002.1184304.
- [60] REN Wei, BEARD R W, ATKINS E M. Information consensus in multivehicle cooperative control [J]. IEEE Control Systems, 2007, 27(2): 71–82.
- [61] SEO J, AHN C, KIM Y. Controller design for UAV formation flight using consensus based decentralized approach [C]// Proceedings of AIAA Conference. Reston: AIAA Press, 2009: 1–11. DOI: 10.2514/6.2009-1826.
- [62] JAMSHIDI M, GOMEZ J, JAIMES B A S. Intelligent control of UAVs for consensus-based and network controlled applications [J]. Applied and Computational Mathematics, 2011, 10(1): 35–64.
- [63] MATTHEW T, NATHAN M, VIJY K. Trajectory design and control for aggressive formation flight with quadrotors [J]. Autonomous Robots, 2012, 33(1): 143–156. DOI: 10.1007/s10514-012-9279-y.
- [64] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system [C]// American Control Conference. Portland: IEEE Press, 2014: 2077–2082.
- [65] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Formation control with collision avoidance for a multi-UAV system using decentralized MPC and consensus-based control [J]. Sice Journal of Control Measurement and System Integration, 2015, 8(4): 285–294. DOI: 10.9746/jcmsi.8.285.
- [66] LI Shihua, WANG Xiangyu. Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple AUVs [J]. Automatica, 2013, 49(11): 3359–3367. DOI: 10.1016/j.automatica.2013.08.003.
- [67] 邢关生, 杜春燕, 宗群, 等. 基于一致性的小型四旋翼机群自主编队分布式运动规划 [J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 2081–2084. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.1002.
- XING Guansheng, DU Chunyan, ZONG Qun, et al. Consensus-based distributed motion planning for autonomous formation of miniature quadrotor groups [J]. Control and Decision, 2014, 29(11): 2081–2084. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.1002.
- [68] ZONG Qun, SHAO Shikai. Decentralized finite-time attitude synchronization for multiple rigid spacecraft via a novel disturbance observer [J]. Isa Transactions, 2016, 65: 150–163. DOI: 10.1016/j.isatra.2016.08.009.
- [69] KOWNACKI C. Multi-UAV flight using virtual structure combined with behavioral approach [J]. Acta Mechanica et Automatica, 2016, 10(2): 92–99. DOI: 10.1515/ama-2016-0015.
- [70] LIE F A P, GO T H. A collision-free formation reconfiguration control approach for unmanned aerial vehicles [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2010, 8(8): 1100–1107. DOI: 10.1007/s12555-010-0519-7.
- [71] RAJASREE R, JISHA V R. Optimal formation control of Unmanned Aerial Vehicles with reconfiguration [C]// International Conference on Control Communication and Computing India. Trivandrum: IEEE Press, 2015: 36–41. DOI: 10.1109/ICCC.2015.7432866.
- [72] HAFEZ A, GIVIGI S. Formation reconfiguration of cooperative UAVs via Learning Based Model Predictive Control in an obstacle-loaded environment [C]// IEEE Systems Conference. Orlando: IEEE Press, 2016: 1–8. DOI: 10.1109/SYSCON.2016.7490605.
- [73] LIAO F, TEO R, WANG Jianliang, et al. Distributed formation and reconfiguration control of VTOL UAVs [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 270–277. DOI: 10.1109/TCST.2016.2547952.
- [74] ZHANG Xiangyin, DUAN Haibin. Differential evolution-based receding horizon control design for multi-UAVs formation reconfiguration [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2012, 34(1): 165–183.
- [75] ZHANG Xiaomin, DUAN Haibin, YANG Chen. Pigeon-Inspired optimization approach to multiple UAVs formation reconfiguration controller design [C]// IEEE Guidance, Navigation and Control Conference. Yantai: IEEE Press, 2015: 2707–2712. DOI: 10.1109/CGNC.C.2014.7007594.
- [76] PENG Huijun, JIANG Xin. Nonlinear receding horizon guidance for spacecraft formation reconfiguration on libration point orbits using a symplectic numerical method [J]. Isa Transactions, 2015, 60: 38–52. DOI: 10.1016/j.isatra.2015.10.015.
- [77] ZHANG Hongmei, ZHAO Guoli, XU Guangyang. Time-optimal control for formation reconfiguration of multiple unmanned aerial vehicles [C]// Chinese Control Conference. Chengdu: IEEE Press, 2016, 5630–5635.
- [78] WANG Jianhong, MASOOD R J. Interior point algorithm for multi-UAVs formation autonomous reconfiguration [J]. 2016 (1): 1–9. DOI: 10.1155/2016/9095372.
- [79] SPINKA O, HOLUB O, HANZALEK Z. Low-cost reconfigurable control system for small UAVs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(3): 880–889. DOI: 10.1109/TIE.2009.2030827.
- [80] GIAOCOMIN P A S, HEMERLY E M. Reconfiguration between longitudinal and circular formations for multi-UAV systems by using segments [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014, 78(2): 339–355. DOI: 10.1007/s10846-014-0063-4.
- [81] LIMA P U. Abayesian approach to sensor fusion in autonomous sensor and robot networks [J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2007, 10(3): 22–27. DOI: 10.1109/MIM.2007.4284253.
- [82] LEE D J. Nonlinear estimation and multiple sensor fusion using unscented information filtering [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15: 861–864. DOI: 10.1109/LSP.2008.2005447.
- [83] 王林, 王楠, 朱华勇, 等. 一种面向多无人机协同感知的分布式融合估计方法 [J]. 控制与决策, 2010, 25(6): 814–820.
- WANG Lin, WANG Nan, ZHU Huayong, et al. Distributed fusion estimation algorithm for multi-UAVs cooperative sensing [J]. Control and Decision, 2010, 25(6): 814–820.
- [84] RIDLEY M, NETTLETON E, GÖKTOGAN A, et al. Decentralised ground target tracking with heterogeneous sensing nodes on multiple UAVs [M]// Information Processing in Sensor Networks. Berlin: Springer, 2003: 545–565. DOI: 10.1007/3-540-36978-3\_37.
- [85] CAMPBELL M E, WHITACRE W W. Cooperative tracking using vision measurements on seascan UAVs [J]. Control Systems Technology IEEE Transactions on, 2007, 15(4): 613–626. DOI: 10.1109/TCST.2007.899177.
- [86] YANG Baisheng, JI Hongbing. Multi-passive-sensor fusion tracking based on unscented kalman filter [J]. Control and Decision, 2008, 23(4): 460–463. DOI: 1001-0920(2008)04-0460-04
- [87] MERINO L, CABALLERO F, MARTINEZ-DE D J R, et al. A cooperative perception system for multiple UAVs: Application to automatic detection of forest fires [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(3/4): 165–184. DOI: 10.1002/rob.20108.
- [88] SHEN Shaojie, MULGAONKAR Y, MICHAEL N, et al. Multi-sensor fusion for robust autonomous flight in indoor and outdoor environments with a rotorcraft MAV [C]// IEEE International Conference

- on Robotics and Automation. Hong Kong: IEEE Press, 2014: 4974–4981. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907588.
- [89] ABDI G, SAMADZADEGAN F, KURZ F. Pose estimation of unmanned aerial vehicles based on a vision-aided multi-sensorfusion [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B6: 193–199. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B6-193-2016.
- [90] AHMED N, KANHERE S S, JHA S. Link characterization for aerial wireless sensor networks [C]// IEEE GLOBECOM Workshops. 2011: 1274–1279. DOI: 10.1109/GLOCOMW. 2011.6162388.
- [91] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O K, TEMEL S. Flying ad-hoc networks (FANETs): a survey [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1254–1270. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004.
- [92] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(2): 1123–1152. DOI: 10.1109/COMST. 2015.2495297.
- [93] BROWN T X, ARGROW B, DIXON C, et al. Ad hocuav ground network (augnet) [C]// AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference. Chicago: AIAA Press, 2004: 1–11. DOI: 10.2514/6.2004-6321
- [94] CAI Y, YU F R, LI J, et al. Medium access control for unmanned aerial vehicle (UAV) ad-hoc networks with full-duplex radios and multipacket reception capability [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 390–394. DOI: 10.1109/TVT. 2012.2211905.
- [95] ALSHABTAT A I, DONG L, LI J, et al. Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2010, 6(1): 48–54.
- [96] ROSATI S, KRUCZELECKI K, HEITZ G, et al. Dynamic routing for flying ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1690–1700. DOI: 10.1109/TVT. 2015.2414819.
- [97] RASMUSSEN S J, MITCHELL J W, CHANDLER P R, et al. Introduction to the Multi-UAV 2 simulation and its application to cooperative control research [C]// IEEE American Control Conference. Portland: IEEE Press, 2005: 4490–4501. DOI: 10.1109/ACC2005.1470704.
- [98] GARCIA R, BARNES L. Multi-UAV simulator utilizing x-plane [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 57(1): 393–406. DOI: 10.1007/s10846-009-9372-4.
- [99] 周昊, 覃征, 邢剑宽. 基于多 Agent 的多无人机协同决策算法仿真平台设计 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 53–60. ZHOU Hao, TAN Zheng, XING Jiankuan. Simulation platform of cooperative algorithm for UAVs based on multi-agent system [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(3): 53–60.
- [100] 王国强, 罗贺, 胡笑旋. 无人机编队协同任务规划仿真系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8): 1856–1862. WANG Guoqiang, LUO He, HU Xiaoxuan. Research on UAV formation coordinated task planning simulation system [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8): 1856–1862.
- [101] 宗群, 程燕胜, 李庆鑫, 等. 多无人机系统仿真与验证方法与装置: CN103246204 A [P]. 2013-08-14. ZONG Qun, CHENG Yansheng, LI Qingxin, et al. Method and device for simulation and verification of multi UAV system: CN103246204 A [P]. 2013-08-14.
- [102] 宗群, 廖海林, 李庆鑫, 等. 基于 HLA 的多无人机分布式仿真方法: ZL201310158658.0 [P]. 2016-01-20. ZONG Qun, LIAO Linhai, LI Qingxin, et al. Distributed simulation method for multi UAV Based on HLA: ZL201310158658.0 [P]. 2016-01-20.

(编辑 魏希柱)

## 封面图片说明

封面图片来自本期论文“多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展”,是自主开发的分布式虚拟系统仿真平台的多飞行器编队视景显示图片. 自主开发的分布式虚拟系统仿真平台是由模型计算机、系统主控计算机、视景显示计算机、PC104 控制器、无线 AP/路由器以及 Wi-Fi 无线通信模块搭建组成. 模型计算机采用 xPC 仿真环境,运行单架无人机动力学以及环境模型. 进行仿真验证之前,先将多无人机动力学模型通过以太网从主计算机下载到 xPC 从计算机 1~n. 系统主控计算机发出编队飞行任务指令,并监视利用每个控制器 PC104 控制误差信号,实现对单架无人机的控制. 视景显示计算机实时显示 n 架无人机编队飞行图. 其中无线 AP/路由器作为系统无线网络的中转站,实现信息交换. Wi-Fi 无线通信模块使有线通信方式转为无线连接. 多无人机协同编队飞行,验证了所设计算法的有效性,并证明了所搭建的自主开发分布式虚拟系统仿真平台的正确性,这一平台适用于多种飞行器(如无人机、卫星)的协同控制算法和轨迹优化算法的仿真和验证.

(图文提供: 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 张博渊, 韩宇. 天津大学电气与自动化工程学院)