

多无人机协同编队控制的研究现状与发展前景

周绍磊 康宇航 万 兵 周 超 尹高阳 孙 聪

摘 要 随着传感器技术、智能控制技术、信息融合技术以及无线通信技术的不断进步与发展,无人机技术越来越成熟,多个无人机依靠无线通信进行编队控制已不再困难。首先,从编队控制方法、编队形成与保持、编队避障与避碰、编队重构这几个方面出发,介绍了国外多无人机协同编队控制的最新研究情况。然后,根据多无人机协同编队控制的特点以及现在与未来对其的各种需求,分析了队形设计、动态调整、网络通信等关键技术。最后,在国内外研究进展和关键技术分析的基础上,对多无人机协同编队控制的未来发展做了展望。

关键词 协同编队控制 编队形成 避障与避碰 编队重构 无人机

引 言

经过几十年的发展,无人机技术已经取得了长足的发展。但是,无论单架无人机的功能和效用如何提高,单机自身的性能(载荷量、续航时间、探测视野等)毕竟有限。与之相比,多无人机协作优点更多,可以弥补单机性能的种种不足。例如,当执行某项任务需要数种携带不同传感器的无人机时,单架无人机由于载重有限不可能完成,而如果把携带不同传感器的多架无人机协同完成这一任务,单机的不足将不存在^[1]。另外,如果无人机在执行任务的过程中被敌方攻击武器摧毁或自身故障而无法继续完成任务,多无人机群中的其它无人机可以继续执行任务^[2]。

虽然多机协同执行任务比单机执行任务拥有更多的优势,但是,如果多架无人机在执行任务的过程中没有进行有效的协调、沟通,将不能最大程度地发挥出多机的潜能、优势。若是出现更糟糕的情

况,多架无人机沟通出现障碍造成己方无人机间的碰撞,由于敌方干扰或己方无人机机载传感器识别出错而使无人机对己方无人机进行攻击造成误伤,那么,多无人机协同执行任务还不如单机执行任务。

为了弥补多无人机协同执行任务的不足,多无人机自主协同控制技术应运而生,多无人机协同编队控制是多无人机自主协同控制技术中的一项重要技术。多无人机协同编队控制(图1)指多无人机在执行某项任务的过程中,为了适应战场任务、环境态势,满足各项任务、目标需求而形成、保持与重构一定的几何构型的控制技术^[3]。



图1 多无人机协同编队控制

军事应用上,多无人机编队控制已经成功应用于空中加油。2012年10月23日,在太平洋的万米高空美国防部预先研究计划局完成了两架改进型RQ-4全球鹰无人机编队自主空中加油试验,使其

本文2015-06-18收到,周绍磊、康宇航分别系海军航空工程学院教授、博士

续航时间从之前的 41 h 延长至 160 h 以上,此次美国率先实现无人机的自主空中加油(图 2)。民事应用上,多无人机编队控制技术应用于森林防火正处于试验阶段。



图 2 全球鹰无人机编队自主空中加油试验

1 国外研究现状

多无人机协同编队控制主要包括编队控制方法、编队形成与保持、编队避碰与避障以及编队重构。

1.1 编队控制策略

目前,多无人机编队控制方法主要有三种:领航-跟随方法、虚拟领航法以及行为控制法^[4]。

1) 领航-跟随法

领航-跟随法(图 3)是目前多无人机编队控制中最常用的方法,将编队中某架无人机指定为领航者,编队中的其它无人机为跟随者,领航者主要维持设定的飞行航迹,跟随者以某种控制策略跟随领航者飞行。领航-跟随法的优点是直观,易理解,但是,这种方法存在误差传导的问题,一旦领航者被干扰,整个编队队形将受到影响。

2) 虚拟领航法

虚拟领航法(图 4)是一种集中式的控制方法,该方法首先由 Anthony Lewis M 提出,编队中并没有指定某一架无人机作为领航者,而是将编队当作一个单一的虚拟刚体,编队设定一虚拟几何中心,编队中的所有无人机参照这一虚拟几何中心运动。虚拟领航法的优点是便于误差传导,编队控制精度较高;但是,由于该方法是一种集中控制方法,可飞航导弹 2016 年第 1 期

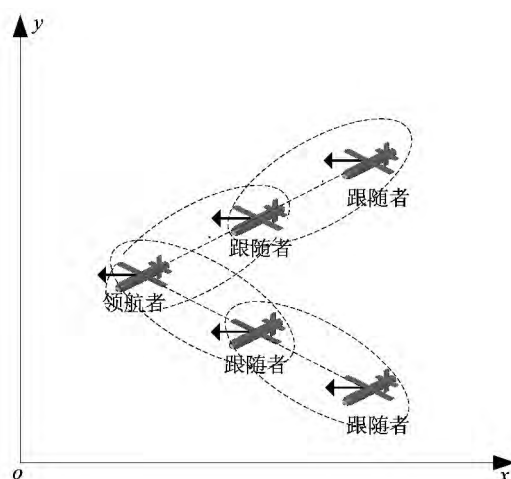


图 3 领航-跟随法

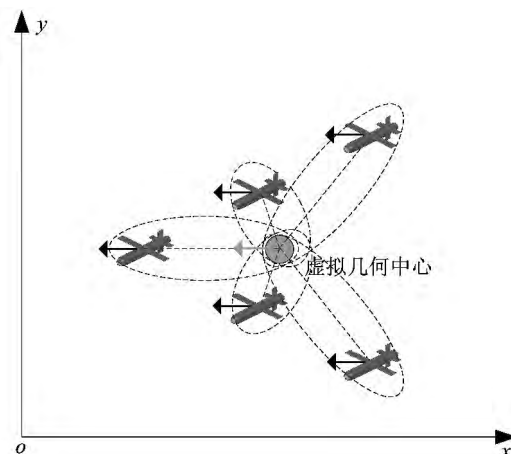


图 4 虚拟领航法

靠性比较差,且编队内无人机之间很可能发生碰撞。2014 年 11 月,美国西弗吉尼亚大学的研究小组成功实现了 3 架 YF22 无人机以虚拟领航者方式进行编队飞行^[5]。

3) 行为控制法

行为控制法(图 5)是一种分布式的控制方法,编队中的每一个子系统被赋予几种基本控制行为,如队形构成、避碰障碍等,这些控制行为在数学上可以被认为是所有子系统行为的加权平均值^[6-7]。该方法的优点是适应性强,而且编队中的无人机容易避免相互碰撞;但是,子系统的行为定义困难,设计复杂。文献[8]就运用了行为控制法对多无人

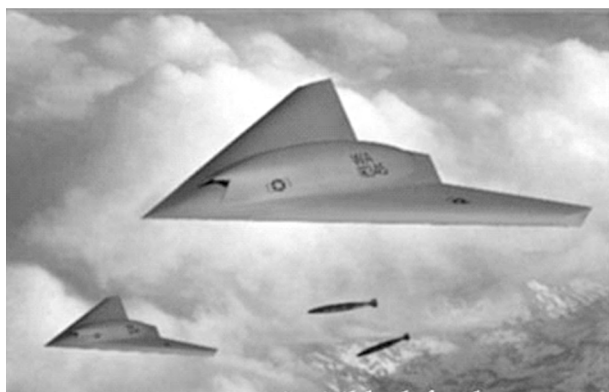


图5 行为控制算法

机的编队进行了研究。

1.2 编队形成与保持

为了满足各种任务目标(总能量消耗最小、时间最短、总距离最短、多无人机编队损耗概率最小),多无人机编队执行任务的第一步就是进行多无人机的编队形成(图6)。编队形成是指多无人机从不同的初始状态演变成一定几何形状的过程。多无人机形成某一几何编队后,为了保持编队稳定,需要对多无人机进行控制,使其保持一定的编队队形。

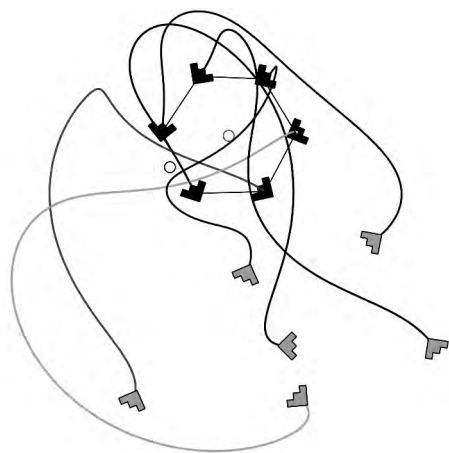


图6 多无人机编队形成

文献[9]基于MPC方法设计了领航-跟随法无人机编队控制律,直接采用非线性质点运动模型,并从控制性能和求解时间两方面比较了集中、顺序分散和完全分散三种求解方法的性能。文献[10]

基于双模MPC方法设计了领航-跟随无人机编队控制律,并采用粒子群优化求解方法得到所有飞行器的控制输入。

1.3 编队避碰与避障

多无人机编队避碰与避障(图7)是指在多无人机协同执行任务的过程中,必须保证编队中每一架无人机规避战场环境中的障碍物。此外,编队中的无人机之间也不能发生碰撞。



图7 多无人机编队避障与避碰

对于多无人机编队飞行,碰撞很可能会带来灾难性的结果。如果多无人机编队规模较小,任意一架无人机的损失将使多无人机编队的战力大打折扣;而如果多无人机编队规模较大,无人机之间的碰撞或是无人机与障碍物的碰撞也可能会引发连锁反应,造成其它无人机的碰撞。

麻省理工学院(MIT)How J P领导的研究小组采用混合整数规划(MILP)方法进行集中式航迹协调^[11],通过引入辅助决策变量将优化问题转化为MILP问题,并且采用线性化方法将非线性约束转化为一组线性约束,然后采用CPLEX优化工具集中式求解。这种方法在求解小规模问题时比较有效,但当系统规模较大时,决策变量很多,优化求解将变得十分复杂,在线的计算效率不高。文献[12]通过设计一系列预定的机动动作进行规避,这种方法在环境不复杂时有较好的控制效果。文献[13]将分布式导航函数用于非完整约束无人机的避碰控制,但只考虑了转动角速度约束。

飞航导弹 2016年第1期

多无人机编队控制中的实时避碰和避障问题基本上可归结到单个无人机进行实时航迹规划来实现避碰,但是当编队规模较大时,需要进行协同避碰,这样才能具有更好的控制效果和良好的扩展性。

1.4 编队重构

战场态势瞬息万变,多无人机编队在执行任务的过程中一般不可能只有一个编队队形。编队中的某架无人机因故(自身故障、被敌方摧毁、燃料耗尽)无法继续执行任务,战术任务临时改变后编队按照新任务执行,被敌方雷达探测,遭遇敌方攻击、干扰,遇到不可躲避的障碍物等,这些情况的出现都需要多无人机编队改变现有的编队队形,进行编队重构(图8)。

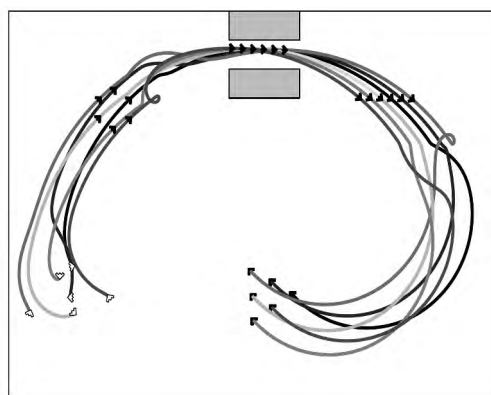


图8 多无人机编队重构

在多无人机编队队形重构过程中,需要考虑各种客观条件对问题的约束,如碰撞避免约束、时间周期约束、燃料剩余量、通信干扰等。基于这些考虑,编队队形重构时,最优轨迹规划问题可以抽象为一个多约束下的参数优化问题。对于多无人机协同编队队形重构来说,需要考虑的主要因素是安全性和快速性。

文献[14]和文献[15]基于高度差和S型机动的策略设计了编队飞行中单个无人机位置变换的参考飞行轨迹,并基于LQR方法设计了非线性轨迹跟踪控制器。文献[16]将无人机编队重构问题转化为控制能力最优轨迹生成问题,并设计了滑模轨迹跟踪控制器。

飞航导弹 2016年第1期

2 关键技术

纵观飞机的发展历史,由有人机发展到无人机,由单机作战发展到多机协同空战,有人机与无人机都解决了太多的问题。一方面,新颖的多无人机协同空战必然比单机作战、有人机协同空战具有更大的优势、更高的战斗性能,另一方面,多无人机协同空战也比单机作战、有人机协同空战涉及的学科更多,关注的问题更多。与目前各国研究人员解决的问题相比,自主控制比较高的多无人机协同编队仍然有许多关键技术(图9)需要突破,主要包括无人机编队队形设计技术、数据融合技术、动态调整技术、网络通信技术。

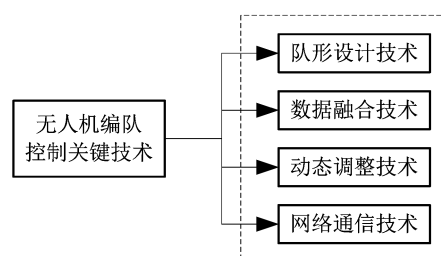


图9 多无人机编队控制关键技术

1) 队形设计技术

多无人机协同编队队形设计贯穿于整个编队飞行,优异的队形设计不仅有助于多无人机编队增加飞行航程、节省燃料消耗,还能大大提高多无人机编队的避碰、避障概率,从而最大限度地保证其生存概率和任务完成率。美国Saber R O等综合考虑编队队形形成的快速性与稳定性,提出了基于二维空间虚拟几何中心编队构型^[17]。考虑到三维空间这一现实,日本Yang E F等将这一方法拓展到了三维空间,但是计算量显然大大增加^[18]。

2) 数据融合技术

未来的世界将是一个传感器遍地的世界,多无人机系统本身就是一个传感器的有序组合,合理地运用这些传感器采集的数据可以尽可能多地提取多无人机需要的信息(图像、声音、电流、压力等)。虽然机载传感器能够提取大量信息,但是这些信息却是无序的,如何将这些信息快速、准确地变换成无人机控制系统能够识别、处理、做出决策的信息

才是关键,这一技术称之为多传感器数据融合。先进的数据融合技术可以增强多无人机协同编队的可靠性与稳定性;反之,也能降低其性能,甚至带来毁灭。

3) 动态调整技术

多无人机协同编队队形不可能从执行任务的开始到结束都保持同一种编队队形。多无人机编队中的某架无人机掉队后,需要其它无人机补上空缺变换队形,天气、气流的突然变化,发现敌方雷达、导弹威胁等,这些情况都需要编队队形的动态调整。面对战场态势、环境地形的突然变化,如何在最短的时间内快速地生成各项性能指标最优的队形将是多无人机协同编队控制队形设计技术的评价指标。以节省编队燃料消耗为目的,美国 Wanger G 等提出了定时按顺序调整编队前后无人机位置的方法^[19]。

4) 网络通信技术

多无人机协同编队飞行的安全性(避碰、避障、快速队形变换)是建立在编队中无人机之间的通信基础上的,目前研究的多无人机编队控制技术大多都是采用简化的模型且没有考虑随机扰动和时延的影响。对于实际战场的无人机编队来说,无人机之间的通信、编队与地面指挥机构的通信不可能时刻没有干扰。恶劣的天气、敌方通信干扰、通信设备自身故障都会带来通信时延,甚至短时间或长时间无法通信。研究鲁棒性强的网络通信技术将大大提高多无人机协同编队的安全性能。

3 未来的发展趋势

在过去的十几年里,多无人机协同编队控制一直是一个备受关注的研究热点。人类在分析鸟类迁徙的过程中,发现鸟类能够通过队形形成、保持与重构而节省体力以及对抗天敌,以此得到启发进行多无人机协同编队控制的研究。多无人机协同编队作战不但能够充分发挥单机的功能,还能够发挥团队的作用。结合目前多无人机协同编队控制的关键技术以及未来无人机自主能力的发展趋势,多无人机协同编队未来的研究方向主要包括以下几点。

3.1 基于一致性收敛的简易分布式控制方法

多无人机协同编队集中式控制方法简单,易于

理解,但是过度依赖于中央控制单元的计算能力,当编队重构时,容易出现碰撞。与之相比,分布式控制方法不依赖于某一个控制单元,编队中所有的无人机具有平等的地位,编队中的任意一架无人机出现故障或被摧毁对整个编队不会有太大的影响,但分布式控制方法比较复杂,不能长时间保证所有飞机收敛到一致状态。研究基于一致性收敛的简易分布式控制方法将改善这一现状。

3.2 不同用途、不同类型无人机协同编队控制

从古至今战争都不是单一兵种、军种、武器能够完成的,古代的陆战场有步兵、骑兵、弓箭手等。现代战争也是如此,未来的空战不是仅仅依靠单一类型、单一用途的无人机能够完成的,电子干扰机、电子对抗机、空中预警机、侦察机、战斗机、轰炸机、空中加油机等都需要。目前需要解决的主要问题可能仅仅是同一类型、同一用途的无人机的协同编队控制,从长远看,多用途、多类型的无人机进行协同编队作战更是必然。然而,不同用途、不同类型的无人机体型、质量、气动外形、速度等性能指标不尽相同,所以,研究如何将不同用途、不同类型的无人机组合起来进行多无人机协同编队是一个非常前沿的热点。

3.3 考虑通信时延拓扑结构的三维编队控制律设计

多无人机协同编队控制的关键在于通信,而目前各国学者在研究这一问题时基本都是假设理想的通信环境或固定时延的通信环境。显然,这与实际情况大相径庭。

信息的时效性与完整性对于多无人机编队作战的胜负起着举足轻重的作用。当敌方战术布置发生改变或战场环境发生变化,地面指挥中心需要及时与前方战场的多无人机编队进行通信,使其快速做出有利于己方的应变;当己方无人机进行编队重构时,良好的通信是编队避碰的基础和关键,即使出现了通信时延,也需要将其考虑在内,设计合适的控制律避免发生碰撞。另一方面,由于技术水平有限,目前研究的控制律大多只考虑了二维情况,即使考虑了三维空间,计算量也非常大,控制效果远远达不到实时性的要求。因此,考虑通信时延拓扑结构的三维编队控制律设计是多无人机协同编队控制的重要发展方向。

4 结束语

多无人机协同编队作战是未来空战的主要作战形式,随着各种多无人机协同编队队形形成/保持/重构算法、多传感器数据融合技术、动态队形调整技术、网络通信技术的深入研究,多无人机协同编队控制技术也会越来越完善,同时还会出现新的协同编队控制方法。研制或提出更多新颖算法,解决当前未完成的难题,对未来发展前景、趋势做出更可靠、可行的预测,将成为未来世界无人机领域不可忽视的力量^[20]。

参考文献

- [1] 李文皓,张珩. 多无人机编队飞行技术的研究现状与展望. 飞行力学, 2007, 25(1)
- [2] 樊琼剑,杨忠,方挺,等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状. 航空学报, 2009, 30(4)
- [3] 沈林成,牛轶峰,朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法. 北京: 国防工业出版社, 2013
- [4] 任伟, Randal W Beard. 多航行体协同控制中的分布式一致性理论与应用. 北京: 电子工业出版社, 2014
- [5] Pereira G A S, Das A K, Kumar V, et al. Formation control with configuration space constraints. Proc of the IEEE/RJS Int Confon Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, 2003
- [6] Balch T, Arkin R. Behavior-based formation control for multi-robot teams. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 14, 1998
- [7] Lawton J R T, Beard R W, Young B J. A decentralized approach to formation maneuvers. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 19, 2003
- [8] Campa G, Napolitano M R, Brad S, et al. Design of control laws for maneuvered formation flight. Proceedings of the American Control Conference, Boston, USA, IEEE, 2004
- [9] Jongho Shin, H Jin Kim. Nonlinear model predictive formation flight. IEEE Transactions on systems, man and cybernetics-part A: systems and humans, 2009, 39(5)
- [10] Duan H B, Liu S Q. Non-linear dual-mode receding horizon control for multiple unmanned air vehicles formation flight based on chaotic particle swarm optimisation. IET Control Theory and Applications, 2010, 11(4)
- [11] Schouwenaars T, How J P, Feron E. Decentralized cooperative trajectory planning of multiple aircraft with hard safety guarantees. In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, August, 2004
- [12] Timothy W, McInain Phillip R, Meir Pachter A. Decomposition strategy for optimal coordination of unmanned air vehicles. Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, June, 2000
- [13] Dimos V, Dimarogonas Kostas J, Kyriakopoulos Dimitris, et al. Totally distributed motion control of sphere world multi-agent systems using decentralized navigation functions. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May, 2006
- [14] Sriram Venkataramanan, Atilla Dogan. Nonlinear control for reconfiguration of UAV formation. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, August, 2003
- [15] Atilla Dogan, Sriram Venkataramanan. Nonlinear control for reconfiguration of unmanned aerial vehicle formation. Journal of guidance, control and dynamics, 2005, 28(4)
- [16] Fidelis Adhika, Pradipta Lie, Tiau Hiong Go. A collision-free formation reconfiguration control approach for unmanned aerial vehicles. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(5)
- [17] Saber R O, Murray R M. Distributed structural stabilization and tracking for formations of dynamic multi agents. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002
- [18] Yang E F, Masuko Y, Mita T. Dual controller approach to three-dimensional autonomous formation control. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 27(3)
- [19] Wagner G, Jacques D, Blake W, et al. An analytical study of drag reduction in tight formation flight. AIAA-2001-4075, 2001
- [20] 高凯,张翼麟,王一琳. 新兴国家典型无人机系统发展现状. 飞航导弹, 2014(5)