

无人机编队管理的研究综述

王国强^{1,2,3}, 罗贺^{1,3}, 胡笑旋^{1,3}, 马华伟^{1,3}

(1. 合肥工业大学飞行器网络系统研究所, 合肥 230009; 2. 安徽中医学院医药信息工程学院, 合肥 230031;
3. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 合肥 230009)

摘要: 多个无人机(UAV)组成编队执行协同探测、侦察、作战等任务的整体性能相比单个 UAV 会有很大程度的提高。将 UAV 编队执行任务的生命周期分为编队形成、编队向任务区域飞行、编队向任务区域飞行过程中动态调整队形、编队进入任务区域执行任务并动态调整队形、编队返回、编队解散 6 个阶段, 并归结为编队集结、编队保持和编队重构 3 个关键技术问题。对它们的研究现状进行了分析和总结, 并对未来的发展方向和研究挑战进行了展望。

关键词: 无人机; 编队集结; 编队保持; 编队重构

中图分类号: V279 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2013)08-0048-06

A Survey on Coordinated UAV Formation Management

WANG Guoqiang^{1,2,3}, LUO He^{1,3}, HU Xiaoxuan^{1,3}, MA Huawei^{1,3}

(1. Aircraft Network Systems Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Medical Information Technology, Anhui University of Traditional Chinese Medicine, Hefei 230031, China;

3. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-Making, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: Compared with a single Unmanned Aerial Vehicles (UAV), the UAV formation of has a better overall performance in cooperative detection, reconnaissance or combat. The task execution lifecycle of UAV formation is divided into six stages, including formation forming, formation flying toward the task area, formation reconfiguration while flying toward the task area, formation reconfiguration while performing tasks in the task area, formation return and formation dissolution. These six stages are summarized in three key technical issues including formation rendezvous, formation keeping and formation reconfiguration. The current situation of study on them is discussed and analyzed respectively. Finally, the future development challenges and research tendency are proposed.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); formation rendezvous; formation keeping; formation reconfiguration

0 引言

无人机(UAV)在军事领域(如侦察、打击)和民用领域(如救援、监测)有着广阔的应用前景,特别是在危险、偏远或恶劣的环境下已逐渐地替换了有人机系统^[1]。由于单个 UAV 所能携带的传感器数量有限,其执行任务的能力也受到相应的限制。比如单个 UAV 无法同时从多个角度观察或监测目标区域,而多个

UAV 组成编队协同完成任务的能力相比单个 UAV 增强很多,能够完成单个 UAV 无法完成的高精度定位、协同探测等复杂任务^[2-3]。

1 国内外及本文研究

针对 UAV 协同编队的控制和决策,国外已开展了大量的研究。例如:美国国防高级研究项目局(DARPA)资助的 MICA 项目^[4],其研究重点是提高 UAV 的自主控制和协同控制能力,实现较少的操作员对大规模 UAV 编队的控制;麻省理工学院的无人机 SWARMS 健康管理项目^[5],其研究目标是实现多 UAV 编队在动态环境下持续不断地执行预定任务;欧盟委员会资助的 COMETS 项目^[6],其研究目标是设计和实现一个包括无人直升机和无人飞艇在内的多种异构无人飞行平

收稿日期:2013-03-28

修回日期:2013-04-23

基金项目:国防基础科研计划资助(B1420110145);国家自然科学基金项目(71131002,71071045);中航工业产学研项目(CXY2011HFGD20);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2012HGZY0009)

作者简介:王国强(1982—),男,四川资中人,博士生,讲师,研究方向为无人机编队管理。

台协同执行任务的分布式控制系统。研究内容包括：实时协作控制的体系结构和技术,无人直升机/无人飞艇的自主控制技术,协同环境感知技术等。

国内在 UAV 协同编队控制和决策的研究相对起步较晚,但也取得了大量的研究成果。例如:文献[3, 7-8]在 UAV 编队的协同控制、任务资源分配、协同目标跟踪、航迹规划、编队集结等方面做了相关的研究;文献[9-12]在 UAV 编队的飞行控制、队形优化、仿真、队形保持变换等方面做了相关的研究;文献[13-14]在 UAV 编队的集结、队形保持、协同航迹规划、协同攻击策略等方面做了相关的研究;文献[15-17]在 UAV 编队的协同控制、仿真方面做了相关的研究。

基于生命周期理论,本文将 UAV 协同编队执行任务的过程分为以下 6 个阶段,如图 1 所示。

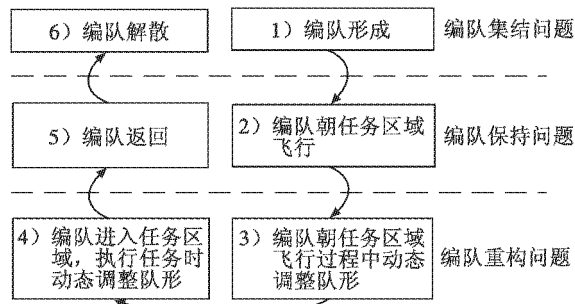


图 1 UAV 编队执行任务的生命周期

Fig. 1 The task execution lifecycle of UAV formation

1) 编队中的所有 UAV 从相同或不同的机场起飞后,在规定的时间内到达预定的集结点,并形成相应的编队队形。

2) 集结完成后,编队朝着任务区域继续飞行,并在飞行过程中控制各 UAV,以保持编队队形不变。

3) 编队飞行过程中为了平衡各 UAV 之间的燃料消耗或者遭遇障碍时,可能需要重构/调整编队的队形。

4) 进入任务区域之后,编队进行决策,各个 UAV 分别执行各自的任務。任务执行过程中,UAV 可能出现故障或损毁,同时环境的情况也会发生变化,因此,可能也需要重构/调整编队的队形。

5) 任务完成之后,编队返回。返回过程中控制各 UAV,以保持编队队形不变。

6) 编队返回到某个预定点后,编队解散,编队中的 UAV 在规定时间内降落到各自的机场。若只有一个 UAV 降落到机场,则自主控制降落^[18]即可;若是多个 UAV 都降落在同一个机场,则又等同于一个集结问题,即多个 UAV 集结降落到同一个机场。

因此,可以将阶段 1) 和阶段 6) 归结为编队集结问题,阶段 2) 和阶段 5) 归结为编队保持问题,阶段 3) 和

阶段 4) 归结为编队重构问题。

接下来,本文以 UAV 协同编队执行任务的生命周期为主线,分析和总结编队集结、编队保持和编队重构 3 个关键技术问题的研究现状,最后指出未来可能的研究方向。

2 编队集结

编队集结问题指的是编队从任意初始状态开始,依据某种性能指标和约束条件,通过调整各个 UAV 的飞行参数,最终使得编队中的所有 UAV 能够在有限的时间内达到某个集结点。编队集结过程需要考虑到性能指标和约束条件有:1) 消耗能量最少;2) 编队集结的完成时间最短;3) 能够有效地避开障碍物或威胁;4) 避免 UAV 之间的碰撞;5) UAV 的转弯半径和速度既有上限也有下限;6) UAV 之间的通信可能出现延迟或者中断。

编队集结问题的分类如图 2 所示。从集结时间要求的角度来看,编队集结问题可以分为两类:1) 要求所有 UAV 在同一时刻到达集结点,这也是目前编队集结问题研究的主流,由于强调在时间上的同时到达,这类编队集结问题又被称为多无人机同时到达问题;2) 只要求在有限的时间范围内所有 UAV 到达集结点即可,比如编队解散时多个 UAV 按照一定的时间间隔集结降落到同一个机场,这类集结问题主要使用基于滑模 (Sliding Mode, SM) 的控制方法^[19]来解决。

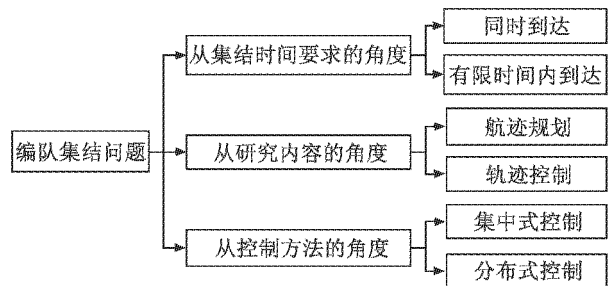


图 2 编队集结问题的分类

Fig. 2 The classification of the UAV formation rendezvous problem

从研究内容的角度来看,编队集结问题包括航迹规划和轨迹控制两个方面的研究内容^[8]。航迹规划是指在考虑环境因素和与其他 UAV 协同的因素下如何为每个 UAV 规划其飞行的航迹;轨迹控制是指在每个 UAV 沿其规划航迹飞行的过程中,如何调整其速度等运动参数,以保证最终多个 UAV 同时到达预定的集结点。早期的研究没有将航迹规划和轨迹控制严格地分隔开来,而是以航迹规划为主,当 UAV 的航迹确定下来的同时其速度也就确定下来了^[20]。由于航迹规划的计算比较耗时,而 UAV 飞行的速度很快,对实时性

要求又很高,所以是不允许频繁地进行航迹规划的。针对此问题,可以将航迹规划和轨迹控制分成两个相对独立的模块,在一次性规划完各个 UAV 的航迹之后,在集结过程中主要通过实时调整各个 UAV 的速度来实现同时到达,只有在特殊情况下(如遭遇突发威胁、速度控制不能保证同时到达时)才重新进行航迹规划^[8]。

从控制方法的角度来看,编队集结问题的控制方法分为集中式控制和分布式协同控制两种。最初的研究以集中式控制方法^[20]为主。集中式控制方法的最大优点是能够得到全局最优解。但是它的计算需要知道整个编队内所有 UAV 的信息,因此对 UAV 之间的通信要求比较高;对负责进行集中式计算的中心 UAV 的性能要求也比较高,一旦中心 UAV 失效,就会导致整个编队失效。而基于一致性算法的分布式协同控制方法^[8,21]虽然不一定能得到全局最优解,但它不需要中心 UAV,不会出现由于某架 UAV 的失效导致整个编队失效的问题,每个 UAV 只需和自己的邻居 UAV 交互信息,并根据这些局部信息计算调整自己的航迹或速度,最终保证所有 UAV 同时到达集结点。因此相比于集中式控制方法,分布式协同控制方法具有计算更简单、通信更少、可靠性更高的优点。

从以上的分析可知,对编队集结问题的研究,主要集中在多 UAV 同时到达问题上;并以基于一致性算法的分布式协同控制方法为主;同时倾向于将航迹规划和轨迹控制独立开来,以轨迹控制为主,航迹规划为辅。但何时重新进行航迹规划是一个比较复杂的决策问题,有待于进一步研究。此外,对集结过程中的碰撞避免^[22]、通信延迟或中断^[23]等约束条件的研究还较少,有待于进一步深入研究。

3 编队保持

编队保持问题指的是在编队飞行过程中,如何实时地控制各个 UAV 的运动,以保持编队队形的几何关系不变,同时在遇到障碍物或某个 UAV 暂时离队的情况下能够尽快恢复原来的编队队形。编队保持有很重要的意义,比如在使用 UAV 编队对目标进行定位时,编队队形的保持精度将影响到最终对目标定位的精度。同样,编队保持过程也需要考虑到各种约束条件:1)能够有效地避开障碍物或威胁;2)避免 UAV 之间的碰撞;3)UAV 之间的通信可能出现延迟或者中断;4)UAV 之间的气流扰动。

从控制策略的角度来看,目前编队保持的控制策略主要包括以下 3 种。

1) 领航-跟随者(Leader-Follower)策略。

领航-跟随者策略是目前最为成熟的编队控制策略,最初用于移动机器人的编队控制^[24]。它的基本思想是:编队里面选择一个 UAV 作为领航者,其余的 UAV 作为跟随者,编队飞行过程中,领航者按照自己的航迹飞行,跟随者实时地跟踪领航者的位置来调整自身的运动参数,以保持和领航者的相对位置不变,从而达到保持编队队形的目的。

由于每个 UAV 只需跟随领航者 UAV 的位置即可,因此计算量很少,控制简单。但是所有 UAV 都依赖于同一个领航者 UAV,一旦这个领航者 UAV 发生故障或损坏,将导致整个编队瘫痪。为了解决这个问题,出现了一些领航-跟随者策略的变种,比如:分散重叠控制策略(Decentralized Overlapping Control Laws)^[25],也可称为链式领航-跟随者策略,即每个 UAV 只需要跟随其前一个 UAV,而不是所有 UAV 都跟随同一个 UAV;最近邻居跟随策略^[26],即每个 UAV 跟随前面距离最近的 UAV;最快邻居跟随策略,即每个 UAV 跟随前面性能最好的 UAV。

2) 虚拟结构(Virtual Structure)策略。

这种策略也起源于机器人编队控制领域^[27]。其基本思想是:将编队队形看成一个虚拟结构,从中寻找一个虚拟的固定点作为虚拟的领航者,编队中的每个 UAV 相对于这个虚拟领航者的位置不变。当编队飞行时,每个 UAV 实时地跟踪这个虚拟领航者的位置来调整自身的运动参数,以保持和虚拟领航者的相对位置不变,从而达到保持编队队形的目的。由于编队跟随的不是真实的 UAV,因此克服了领航-跟随者策略中“领航者一旦失效,将导致整个编队队形失效”的缺点。

虚拟结构策略具体可分为两种^[28]:刚性虚拟结构(Rigid Virtual Structure)策略和弹性虚拟结构(Flexible Virtual Structure)策略。在刚性虚拟结构策略中,每个 UAV 和虚拟领航者的参考位置之间始终只相差一个恒定的相对直线矢量,因此只要计算出虚拟领航者的参考航迹,结合相对直线矢量,就可以分别得到每个 UAV 的参考航迹^[29],但这种策略会影响到编队的转弯性能,特别是当虚拟领航者的航迹的曲率是不连续的情况下,而弹性虚拟结构策略可以克服这个缺点,在弹性虚拟结构策略中,除了虚拟领航者之外,还定义了另外一个虚拟参考点,它与原来的虚拟领航者的位置之间相差一个恒定的相对曲线矢量。计算出这个虚拟参考点的航迹后再得到每个 UAV 的航迹,就可以使得整个编队能够平滑地进行转弯操作^[28]。

3) 基于行为(Behavior)策略。

这种策略最初也是起源于机器人编队控制领域^[30]。该策略的基本思想是:为每个 UAV 预先设计

几种基本行为,比如目标跟随、碰撞避免、障碍物回避、队形保持等,然后在编队飞行过程中每个 UAV 根据传感器信息和其他 UAV 的信息,将几种基本行为按照一定的策略进行加权合成后,作为当前的输出行为来控制 UAV。基本行为的加权合成策略有以下几种^[31]。

① 加权平均法:将各个基本行为向量和相应权重乘积的矢量和归一化后作为当前的行为输出,其中权重的大小表示相应基本行为的重要性。

② 行为抑制法:按一定原则确定每种基本行为的优先级,然后选择高优先级的行为作为当前的行为输出,即高优先级行为抑制低优先级行为。

③ 模糊逻辑法:根据模糊规则将各个基本行为综合后作为当前的行为输出。

文献[32]使用基于行为控制策略,实现了 UAV 编队飞行过程中的队形保持。

表 1 对以上 3 种控制策略进行对比。可以看出,3 种控制策略都各有优缺点,如果将它们混合起来使用,就可以取长补短,达到更好的效果^[33]。但如何根据实际情况自主有效地选择对应的控制策略是一个比较复杂的决策问题,还有待于进一步研究。

表 1 3 种编队保持控制策略的对比

Table 1 The comparison of three formation keeping control strategies

策略名称	优点	缺点
领航-跟随者策略	控制简单,每个 UAV 只需要跟随领航者的位置即可,很大程度地减少了每个 UAV 的计算量。	领航者没有跟随者的位置误差反馈,领航者运动过快可能导致跟随者掉队;链式领航-跟随者策略存在位置误差的传递迭代,越后面的跟随者的位置误差越大;领航者发生故障,会导致整个编队失效。
虚拟结构策略	每个 UAV 跟踪的是同一个虚拟固定点,因此不存在链式领航-跟随者策略中的位置误差传递迭代问题;同时可以避免领航-跟随者策略中的“领航者发生故障,可能导致整个编队失效”的问题。	合成虚拟领航者的位置和将其传输给每个 UAV,需要复杂的计算和大量的通信;由于虚拟领航者的位置固定不变,整个编队的障碍物避免能力较差。
基于行为策略	通信量较少;对环境变化响应速度快;当 UAV 同时有多个相互冲突的行为目标时,可以很容易地得到控制输出;同时有队形的反馈。	编队的整体行为是“隐现”出来的,难以明确定义;难以对基本行为进行准确的数学描述;队形的稳定性难以保证。

从具体控制方法的角度来看,编队保持问题常用的控制方法有经典 PID 法^[17]、结合其他技术(如模块

控制理论、自适应控制技术、Kalman 滤波技术等)的混合 PID 法^[9,11,34]、滑模控制法^[35]、非线性动态逆控制法^[15]、鲁棒反推自适应控制法^[16]、非线性动态逆和滑模控制综合法^[36]等。其中,大部分研究基于二维空间,对三维空间内的编队保持^[17]的研究还相对较少;另外,对编队保持过程中的影响因素的研究也相对较少,比如 UAV 之间的气流扰动因素^[17]、UAV 之间的通信延迟或中断因素^[37]等。因此,目前还没有一个能够满足各种约束条件的编队保持控制方法,还需要进一步深入研究。

4 编队重构

编队重构问题指的是编队在飞行过程中,可能会遇到障碍物或敌方目标,或者我方某个编队个体出现故障或被摧毁时,或者敌方情况发生较大变化时,需要根据当时的环境或态势及时地改变编队结构,以达到避免或提高任务效能的目的。同样,编队保持过程也需要考虑到各种约束条件:1) 重构时间最短;2) 消耗能量最少;3) 避免 UAV 之间的碰撞;4) UAV 之间的通信可能出现延迟或者中断;5) UAV 之间的气流扰动。

从编队重构场景的角度来看,编队重构问题可以分为以下 4 种类型。

1) 平衡编队的燃油消耗。

由于空气动力学的影响,使用领航-跟随者策略进行编队飞行时,跟随者会比领航者节省燃油。为平衡编队各 UAV 之间的燃油消耗,可以在编队飞行过程中各 UAV 轮流充当领航者,比如定期地切换领航者^[38]。但由于切换本身也会增加燃油消耗,因此切换的频率不能太高,比如使用划分求精算法(Partition Refinement Algorithm)来计算领航者切换的时间间隔^[39]。

2) 遇到障碍物。

编队飞行过程中,当遇到障碍物并且当前队形无法正常通过时,就需要改变编队队形以保证所有 UAV 能够安全通过障碍物。比如,当三角形形状的长僚编队遇到障碍物并且直接无法通过时,可以命令僚机变成线形队形,长机在前,僚机在后,逐一通过。通过障碍物之后,长机再命令僚机恢复原来的队形^[40]。又比如,基于图论中的“最小刚图(Minimally Rigid Graphs)”理论,将当前的编队队形映射成一个刚性大图,当遇到障碍物且无法直接通过时,可以将当前编队(刚性大图)分离(Split)成多个小的子编队(刚性子图),通过障碍物之后,再将这些子编队(刚性子图)编队重聚(Rejoin)成原来编队(刚性大图)^[41]。

3) UAV 出现故障或损毁。

当编队中的某个 UAV 出现故障或者损毁时,可以用编队中别的 UAV 来完成编队重构,从而保持编队队形稳定或达到最优队形,其中的核心问题是如何选择 UAV 来完成编队重构。例如,可以仿照鸟类飞行,当队形出现空缺位置时,由最近的 UAV 来填补,从而保持队形。另外,可以选择受气流影响最大或者处在最不利位置的 UAV 来填补空缺位置,从而可以提高整个编队的飞行效率^[42]。

4) 根据敌我双方态势的变化。

在 UAV 编队作战过程中,根据敌我双方战场态势的变化,适当地重构我方编队队形,可以充分发挥我方优势,提高战斗效能。例如,使用遗传算法来优化空战队形,每种编队队形的适应度函数值为对抗双方的损失比^[43]。另外,使用自适应遗传算法来优化空战队形,每种编队队形的适应度函数值是在利用市场机制完成目标分配后的各 UAV 的收益与代价之差的和,遗传算法运行过程中,其交叉和变异概率能够自适应地改变^[40]。

从具体控制方法的角度来看,编队重构问题常用的控制方法有 PID 控制法^[12]、基于最小持久图 (Minimally Persistent Graph) 理论的编队重构算法^[44]、控制作用参数化与时间离散化 (Control Parameterization and Time Discretization, CPTD) 和粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 的混合算法^[45]、CPTD 和遗传算法 (GA) 的混合算法^[46]、差分进化 (Differential Evolution, DE) 和滚动时域控制 (Receding Horizon Control, RHC) 的混合算法^[47] 等。其中,大部分研究基于二维空间,对三维空间内的编队重构的研究还相对较少;另外,对编队重构过程中的影响因素的研究也相对较少,这些内容都还需要进一步地深入研究。

5 总结与展望

综上所述,UAV 协同编队飞行的研究涉及到飞行力学、自动化控制、空气动力学、网络通信、图像处理、信息融合、航迹规划、管理决策、效能评估等诸多方面内容,是一个复杂的交叉学科研究问题。虽然国内外已经进行了大量研究,取得了很多研究进展和成果,但距实现真正的 UAV 协同编队飞行还有一定的差距。例如,对编队中单个 UAV 的自主控制和决策研究较多,但对 UAV 之间的协同机制研究相对不足;对协同编队飞行的控制方法问题的研究较多,对协同编队飞行的管理决策问题的研究相对较少;在理想约束条件下的研究较多,在有各种约束条件(三维空间、通信延迟或中断、UAV 间的气流扰动、UAV 之间的碰撞避免等)下的研究较少。因此,未来可能有以下研究

方向。

1) 编队中 UAV 之间的协同机制。

由于编队中每个 UAV 依靠局部或有限的信息自主控制和决策,因此 UAV 之间的控制和决策就不可避免会发生冲突,这时,一种能够有效、快速地消除 UAV 之间冲突的协同机制就显得尤为重要了,而现有的这方面研究还较少。

2) UAV 编队飞行的全生命周期管理。

例如编队集结时如何选择合理的集结点,编队保持过程中如何根据环境变化选择有效的控制策略,编队重构的触发条件判断以及选择何种新的编队队形才最优等等,这些问题都有待进一步研究。

3) 满足各种约束条件的编队控制。

在真实环境中,UAV 编队是在三维空间中飞行,UAV 之间会存在通信延迟、通信中断、气流扰动、碰撞避免等问题,要真正实现 UAV 协同编队飞行,必须要综合考虑到这些因素。因此,满足各种约束条件下的 UAV 编队控制问题有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] ANON. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) roadmap 2005-2030[M]. Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [2] YORK G, PACK D J. Ground target detection using cooperative unmanned aerial systems [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 65(1-4):473-478.
- [3] 张庆杰. 基于一致性理论的多 UAV 分布式协同控制与状态估计方法[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [4] MICHAEL O. Mixed Initiative Control of Automa-teams (MICA): A progress report[C]//AIAA the 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Chicago, USA, DOI: 10.2514/6.2004-6483, 2004.
- [5] ANON. UAV swarm health management project website [DB/OL][2013-03-18]. <http://vertol.mit.edu>.
- [6] OLLERO A, LACROIX S, MERINO L, et al. Multiple eyes in the skies: Architecture and perception issues in the COMETS unmanned air vehicles project[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2005, 12(2):46-57.
- [7] 李远. 多 UAV 协同任务资源分配与编队轨迹优化方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [8] 袁利平,陈宗基,周锐,等. 多无人机同时到达的分散化控制方法[J]. 航空学报,2010(4):797-805.
- [9] 肖亚辉,王新民,王晓燕,等. 无人机三维编队飞行模糊 PID 控制器设计[J]. 西北工业大学学报,2011(6):834-838.

- [10] 夏庆军,张安,张耀中. 大规模编队空战队形优化算法[J]. 控制理论与应用,2010(10):1418-1422.
- [11] 刘小雄,章卫国,王振华,等. 无人机自适应编队飞行控制设计与仿真[J]. 系统仿真学报,2009(5):1420-1422.
- [12] 邓婉,王新民,王晓燕,等. 无人机编队队形保持变换控制器设计[J]. 计算机仿真,2011(10):73-77.
- [13] 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [14] 朱艳萍. 多无人机协同攻击策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [15] 宋敏,魏瑞轩,沈东,等. 基于非线性动态逆的无人机编队协同控制[J]. 控制与决策,2011(3):448-452.
- [16] 李雪松,李颖晖,李霞,等. 无人机鲁棒反推自适应编队导引控制设计[J]. 应用科学学报,2012(5):552-558.
- [17] 陈春东,魏瑞轩,董志,等. 无人机紧密编队协同控制设计与仿真[J]. 电光与控制,2012(7):18-22,27.
- [18] 程士广. 无人机自动起飞/着陆的控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [19] HARL N, BALAKRISHNAN S N. Co-ordinated rendezvous of unmanned air vehicles to a formation using a sliding mode approach [C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G; Journal of Aerospace Engineering, 2011:105-119.
- [20] MCLAIN T W, BEARD R W. Coordination variables, coordination functions, and cooperative-timing missions [J]. AIAA Journal of Guidance Control and Dynamics, 2005, 28:150-161.
- [21] BEARD R W, MCLAIN T W, NELSON D B, et al. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs [J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(7):1306-1324.
- [22] MANATHARA J G, GHOSE D. Rendezvous of multiple UAVs with collision avoidance using consensus [J]. Journal of Aerospace Engineering, Special Section: Intelligent Unmanned Systems, 2012, 25(4):480-489.
- [23] 李少斌,陈炎财,杨忠,等. 具有通信延迟的多无人机编队飞行控制[J]. 信息与控制,2012(2):142-146.
- [24] WANG P K C. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation [J]. Journal Robotics System, 1991, 8(2):177-195.
- [25] STIPANOVIC D M, INALHAN G, TEO R, et al. Decentralized overlapping control of a formation of unmanned aerial vehicles [C]//Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002:2829-2835.
- [26] TANNER H G, PAPPAS G J, KUMAR V. Leader-to-formation stability [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(3):443-455.
- [27] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures [J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4):387-403.
- [28] CHANG B L, QUEE SAN N. A flexible virtual structure formation keeping control for fixed-wing UAVs [C]//The 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 2011:621-626.
- [29] LINORMAN N H M, LIU H H T. Formation UAV flight control using virtual structure and motion synchronization [C]//American Control Conference, 2008:1782-1787.
- [30] LAWTON J R T, BEARD R W, YOUNG B J. A decentralized approach to formation maneuvers [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(6):933-941.
- [31] 张明中. 基于粒子群优化算法的多机器人编队控制技术[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [32] KIM S, KIM Y. Optimum design of three-dimensional behavioural decentralized controller for UAV formation flight [J]. Engineering Optimization, 2009, 41(3):199-224.
- [33] CAI D, SUN J, WU S. UAVs formation flight control based on behavior and virtual structure [M]. AsiaSim, Springer Berlin Heidelberg, 2012:429-438.
- [34] 张鹏,刘振东. 新型无人机编队飞行控制系统的研究 [C]//中国自动化学会控制理论专业委员会 A 卷, 2011:946-949.
- [35] GALZI D, SHTESSEL Y. UAV formations control using high order sliding modes [C]//American Control Conference, DOI:10.1109/ACC.2006.1657386, 2006.
- [36] SHIN H S, KIM T H, TAHK M J, et al. Nonlinear formation guidance law with robust disturbance observer [J]. Aeronautical & Space Sciences, 2009, 10(1):30-36.
- [37] SEO J, KIM Y, KIM S, et al. Consensus-based reconfigurable controller design for unmanned aerial vehicle formation flight [C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G; Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(G7):817-829.
- [38] WAGNER G, JACQUES D R, BLAKE W. An analytical study of drag reduction in tight formation flight T-38 [M]. Air Force Institute of Technology, 2002.

- CNS/ATM systems [S]. 2nd ed. Quebec: International Civil Aviation Organization, 2007.
- [2] ICAO Doc 9849 AN/457. Global Navigiton Satellite System (GNSS) manual [S]. Quebec: International Civil Aviation Organization, 2005.
- [3] ACKLAND J, IMRICH C T, MURPHY T. Global navigation satellite system landing system [C]//AERO Boeing, First-Quarter, January, 2003 :3-11.
- [4] NASA. Cddis NASA'S archive of space geodesg data [DB/OL]. [2013-06-05] <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/2011/034/11n/>.
- [5] RTCA/DO-246D. GNSS-based precision approach Local Area Augmentation System (LAAS) signal-in-space Interface Control Document (ICD) [S]. UAS; RTCA, 2008.
- [6] LEE J. GPS-based aircraft landing systems with enhanced performance; Beyond accuracy [D]. Department of Aeronautics and Astronautics of Stanford University, March 2005.
- [7] RTCA DO-245A. Minimum aviation system performance standards Local Area Augmentation System (LAAS) [S]. Washmgton DC; RTCA, Inc. December 9, 2004.
- [8] MURPHY T. Program for the investigation of airborne multipath errors [C]//Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institnte of Navigation, San Diego, California, USA, 2004 :781-792.
- [9] KAYTON M, FRIED W R. Avionics navigation systems [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1997 :598-599.
- [10] Federal Aviation Administration (FAA). Navigation programs—Ground Based Augmentation System (GBAS) [DB/OL]. [2013-06-04] http://www.faa.gov/about/office_org/headquaters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/.
-
- (上接第 53 页)
- [39] RICHERT D, CORTES J. Optimal leader allocation in UAV formation pairs under no-cost switching [C]// American Control Conference, 2012 :3297-3302.
- [40] 张森, 康凤举, 高立娥, 等. 多机编队队形控制建模及可视化仿真系统设计 [J]. 系统仿真学报, 2010 (11) : 2667-2671.
- [41] SABER R O, MURRAY R M. Graph rigidity and distributed formation stabilization of multi-vehicle systems [C]//The 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002 :2965-2971.
- [42] 刘小雄, 章卫国, 李广文, 等. 无人机自主编队飞行控制的技术问题 [J]. 电光与控制, 2006, 13 (6) : 28-31.
- [43] 钱斌, 姜长生. 遗传算法在直升机空战编队优化中的应用 [J]. 电光与控制, 2008, 15 (1) : 6-9.
- [44] HENDRICKX J M, FIDAN B, CHANGBIN Y, et al. Formation reorganization by primitive operations on directed graphs [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53 (4) : 968-979.
- [45] DUAN H B, MA G J, LUO D I. Optimal formation reconfiguration control of multipleUCAVs using improved particle swarm optimization [J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5 (4) : 340-347.
- [46] 熊伟, 陈宗基, 周锐. 运用混合遗传算法的多机编队重构优化方法 [J]. 航空学报, 2008 (s1) : 209-214.
- [47] ZHANG X Y, DUAN H B. Differential evolution-based receding horizon control design for multi-UAVs formation reconfiguration [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2012, 34 (2/3) : 165-183.

本刊国内邮发代号为 36 - 693 欢迎订阅