



控制与决策

Control and Decision

ISSN 1001-0920, CN 21-1124/TP

《控制与决策》网络首发论文

题目: 大规模固定翼无人机集群编队控制方法研究
作者: 王祥科, 陈浩, 赵述龙
DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0076
收稿日期: 2020-01-16
网络首发日期: 2020-07-03
引用格式: 王祥科, 陈浩, 赵述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法研究[J/OL]. 控制与决策. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0076>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

大规模固定翼无人机集群编队控制方法研究

王祥科[†], 陈浩, 赵述龙

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对大规模固定翼无人机集群的编队控制问题, 提出一种分层分组控制方案。首先, 设计了一种分布式的无人机集群分层分组控制架构, 将集群内所有无人机分成若干独立且不相交的群组, 并在群组内分别形成“长机层”和“僚机层”。其次, 对各群组内的长机设计协同路径跟随控制律, 使长机收敛到各自期望路径上的虚拟目标点, 并通过对各虚拟目标点的协调控制实现长机的协同, 进而实现各群组间的协同。再次, 对各组的僚机设计控制律以跟随其所在群组的长机, 使其与长机保持期望的相对位置且朝向一致。设计的大规模集群编队控制律考虑了固定翼无人机的控制约束和环境中风的影响, 并证明了闭环系统的稳定性。100架固定翼无人机集群的全流程数值仿真, 验证了所提出的控制方法的有效性。

关键词: 固定翼无人机; 集群; 编队控制; 协同路径跟随控制; 跟随领航者法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0076

Research on formation control of large-scale fixed-wing unmanned aerial vehicle swarms

WANG Xiang-ke, CHEN Hao, ZHAO Shu-long

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper considers the formation control of large-scale fixed-wing UAV swarms, and proposes a group-based hierarchical method. Firstly, a distributed group-based control architecture is proposed for the UAV swarms, which divides all the UAVs into several distinct and non-overlapping groups, and the UAVs in each group are organized into two layers, the *leader layer* and the *follower layer*. Secondly, for leader UAVs, the coordinated path following control law is proposed, which steers the leader UAVs towards their virtual targets on their desired paths, and achieves the coordination of leader UAVs by coordinating the movement of the virtual targets, and thus the inter-group coordination is achieved. Besides, leader-following formation control law is proposed for the follower UAVs to follow the leader UAVs in their respective groups. The proposed formation control law for large-scale swarms considers the control constraints of fixed-wing UAVs and wind influence, and the closed-loop stability is theoretically guaranteed. Numerical simulations of 100 fixed-wing UAVs in a whole mission process are conducted, which validate the effectiveness of the proposed method for large-scale swarms.

Keywords: fixed-wing UAV; swarm; formation control; coordinated path following control; leader-follower

0 引言

固定翼无人机集群系统在灾难响应、安防巡逻、目标追踪、环境保护等许多军民领域具有重要的应用价值^[1]。编队飞行是无人机集群最典型的协同场景, 也是其执行各类复杂任务的行为基础。在集群编队飞行的过程中, 各无人机需要按照期望的相对位置、距离或方位等形成一定的队形, 并根据任务需求保持队形或进行队形调整。

不同于旋翼无人机其运动模型可用一阶或二阶

积分器表示^[2], 固定翼无人机是典型的具有非完整性约束的非线性运动体, 且存在最大/最小空速以及最大航向角速率等限制, 其编队控制问题更具有挑战性^[3]。文献^[4-6]研究了固定翼无人机协同路径跟随控制问题。文献^[7]基于“长-僚机”框架的跟随领航者法, 为僚机设计了跟随长机的控制律, 实现了两架固定翼无人机的编队飞行, 在飞行过程中, 长机沿着期望航线飞行, 僚机按照设计的控制律与长机形成一定的空间构型。文献^[8]在“长-僚机”

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973309, 61702528).

[†]通讯作者. E-mail: xkwang@nudt.edu.cn.

框架的基础上引入“虚拟长机”的概念,将各真实无人机作为虚拟长机的僚机,并在虚拟长机的轨迹对各无人机已知的情形下,实现了三架固定翼无人机的编队飞行。在上述研究中,无人机集群的规模都比较小,且许多文献未考虑固定翼无人机的控制约束或未讨论控制约束下的稳定性。此外,固定翼无人机集群多在室外使用,不可避免会受到风的作用,文献^[9,10]在处理单无人机路径跟随控制问题时,将风扰下的无人机运动模型简化为以地速和期望航迹角为控制输入的独轮车模型,从而不再单独处理风扰影响;文献^[5]将风扰项纳入到航向角速率的路径跟随控制律中,并将其结果拓展到具有链状通信拓扑的多无人机协同跟随同一条移动路径的情形。总体而言,目前对于风扰下的单无人机飞行控制研究较多,但对于风扰下的无人机编队控制研究相对较少。

随着无人机集群技术的发展,各类研究中所使用的集群规模日益增大。对于旋翼无人机集群,美国宾夕法尼亚大学的GRASP实验室采用分组思想,并通过组内集中式控制、组间分布式协同的方式完成了20架四旋翼无人机的编队飞行^[11];美国的英特尔,中国的亿航、高巨创新等公司目前都已完成规模超过1000架的旋翼机飞行表演,但这些无人机已预设好运动轨迹,在表演时采用轨迹跟踪或集中式控制的方式^[12]。在固定翼无人机集群方面,美国海军研究生院采用跟随领航者法,验证了20架固定翼无人机的集群协同行为^[12];此外,中美两国都开展了规模在100架以上的固定翼无人机集群飞行实验,但这些实验公开的集群协同的具体资料很少,从发布的视频看,其编队飞行的精度有限^[1]。一般而言,数量规模的增大会导致协同难度的指数上升,在系统性能如收敛性和稳定性等方面存在天花板效应^[1]。以传统的跟随领航者法为例,处理大规模集群时,若集群的层级过多,由于误差逐层累积,会使最底层的跟随者与最顶层的全局领航者的协同误差较大^[13];若减小集群的层级,则会导致集群内较多的个体跟随同一个领航者,意味着领航者需要和距离自己较远的跟随者通信,或远处的跟随者需要准确地感知领航者的相对位置等信息,故而对无人机的通信或感知能力提出较高要求,当存在通信时延、丢包或感知不准确时,同样会导致协同误差较大。从文献^[12]的20机编队飞行结果来看,无人机的平均位置误差超过40米,明显不及文献^[7]的两机编队飞行效果。

针对固定翼无人机集群的规模限制、控制约束、风扰影响等挑战,本文研究了面向大规模固定翼无人机集群的编队控制方法。本文的主要贡献有:1)针对固定翼无人机集群的规模限制,提出了分层分组控制方案,实现了大规模集群的分布式编队控制;2)综合考虑固定翼无人机的最大/最小速度以及最大航向角速率的限制,设计了满足固定翼无人机控制约束的编队控制律;3)设计了有风条件下长/僚机的编队控制律,实现了风扰下的稳定编队。论文通过面向固定翼无人机集群实际应用的100架规模全流程数值仿真,验证了所提出的编队控制方法的有效性。

1 面向大规模集群的分层分组控制方案

本节针对大规模集群的编队控制问题,提出了分层分组的控制方案,并基于该控制方案,建立了相应控制问题的数学模型。

1.1 控制方案设计

面向大规模固定翼无人机集群的编队控制,本文提出了分层分组的集群控制方案,将所有无人机分成若干个独立且不相交的群组,并在各群组内形成“长机层”和“僚机层”的集群双层控制架构。每个群组内只有一架长机,对组内其他无人机起引导作用;群组内除长机之外的无人机均作为僚机,接收长机的指令,并采用通信或感知的方式获取长机的状态以跟随长机。该分层分组控制架构如图1所示。

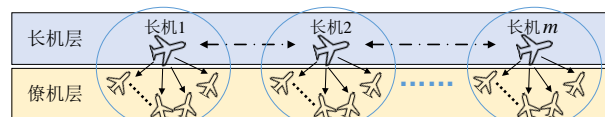


图1 无人机集群分层分组控制架构

基于该控制架构,在长机层,各长机组成通信网络,每个长机与其邻居通信,且相互之间形成特定的期望队形;在僚机层,组内各僚机跟随其长机,并保持相对于长机的期望位置、距离或方位,从而使同一组内的所有无人机形成特定的期望队形。由此,为实现整个无人机集群的编队控制,可分别设计长机层和僚机层的编队控制律,实现长机层各长机的协同以及僚机层各僚机相对于其长机的协同。

为实现长机层的协同,本文为每一架长机规划一条航线,并使各长机在沿其航线飞行的过程中,满足一定的协同关系。在协同控制领域,将此称之为对长机的“协同路径跟随控制”^[4-6]。与轨迹跟踪控制^[14,15]不同,在路径跟随控制问题中,无人机

跟随的期望路径不含有时间参数信息^[10,16], 因此路径较之轨迹的形式化表达更加方便灵活; 此外, 相关研究表明, 对于小型固定翼无人机而言, 路径跟随控制比轨迹跟踪控制更有效^[4,9]。在协同路径跟随控制问题中, 除了使每一架无人机实现路径跟随外, 各无人机还需要满足一定的协同关系, 例如, 使各无人机同步到达各自终点以形成队形^[4], 或在跟随同一条路径的过程中, 相邻两无人机沿路径的距离保持恒定值^[5,6], 等等。

对于各僚机, 需要利用其与长机的相对位置等信息, 设计僚机跟随长机的控制律, 以使同一组内的所有无人机形成该群组的期望队形。

不失一般性, 本文假设为实现各长机之间以及长僚机之间协同所需的其他无人机的信息均由通信获取。采用该分层分组控制方案的主要优点在于:

- i) 该控制方案为分布式, 且充分利用了并行性, 因而适用于大规模集群;
- ii) 基于该控制方案, 每个群组中, 仅长机需要与其他群组的无人机通信; 其余无人机作为僚机, 只需要接收本组长机的信息; 因而在一定程度上降低了通信带宽;
- iii) 由于组内的长机具有引导组内僚机的能力, 因此在规划时只需要为长机规划航线, 对僚机采用基于跟随领航者的编队控制律实现与长机的同步, 因而该方案在一定程度上降低了任务规划的复杂度;
- iv) 该方案的控制架构仅有两层, 克服了因误差逐层累积及层级过多造成的协同误差大的问题; 同时该方案避免了过多个体跟随同一个领航者, 从而降低了对通信能力的需求。

1.2 长机/僚机控制问题描述

在许多任务场景下, 无人机的飞行高度保持不变。此时, 无人机运动学模型可表示为^[5,9]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i + v_w \cos \theta_w, \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i + v_w \sin \theta_w, \\ \dot{\theta}_i = \omega_i, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)^T$ 为惯性坐标系 \mathcal{I} 下无人机 i 的坐标, θ_i 为无人机 i 的航向与 \mathcal{I} 的 x 轴所成的夹角, 控制量 v_i 和 ω_i 分别表示无人机 i 的空速和航向角速率, v_w 和 θ_w 分别表示风速和风向。本文假设无人机处在一个匀强风场中, 即风对所有无人机的作用都相同; 且风速为有界值, 即 $0 < v_w < v_w^{\max}$ 。固定翼无人机的

的 v_i 和 ω_i 取值均存在限制, 可数学化表示为:

$$\begin{cases} 0 < v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max}, \\ |\omega_i| \leq \omega_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, v_{\min} 和 v_{\max} 分别表示无人机在定高飞行中容许的最小和最大空速, ω_{\max} 表示无人机容许的最大航向角速率。

现考虑长机的控制问题。本文使每架长机都跟随一个在路径上移动的虚拟目标点, 记长机 i 在路径上的虚拟目标点为 $\tilde{\mathbf{p}}_i = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)^T$ 。显然, 若长机 i 的位置 \mathbf{p}_i 能够时时与 $\tilde{\mathbf{p}}_i$ 重合, 则实现了对长机 i 的路径跟随控制, 从而各长机的协同则可以通过协调各虚拟目标点在路径上的移动来实现。本文假设任一长机 i 的期望路径均可参数化为 $\Gamma_i := \{\tilde{\mathbf{p}}_i(\xi_i) : \xi_i \in \Xi_i\}$, 其中 ξ_i 是协同目标相关的变量, $\Xi_i \subseteq \mathbb{R}$ 。记 ξ_{ij}^d 为 $\tilde{\mathbf{p}}_i$ 和 $\tilde{\mathbf{p}}_j$ 这两个虚拟目标点的参数期望差异。在本文的研究中, 设 ξ_{ij}^d 为常数, 当 $\xi_i - \xi_j = \xi_{ij}^d$ 时, 意味着长机 i 和长机 j 所对应的虚拟目标点 $\tilde{\mathbf{p}}_i$ 和 $\tilde{\mathbf{p}}_j$ 实现了协调。

注意到长机和僚机的控制量都需满足式(2)的控制约束, 为了给僚机跟随长机的控制留下一定裕度, 可进一步对长机的控制约束限制为:

$$\begin{cases} 0 < v_{\min}^l \leq v_i \leq v_{\max}^l, \\ |\omega_i| \leq \omega_{\max}^l, \end{cases} \quad (3)$$

其中, $v_{\max}^l = v_{\max} - \epsilon_v$, $v_{\min}^l = v_{\min} + \epsilon_v$, $\omega_{\max}^l = \omega_{\max} - \epsilon_\omega$, 且 $\epsilon_v, \epsilon_\omega \geq 0$ 。

综上, 对长机的控制问题可概括如下。

问题 1. 给定 m 架长机的期望路径, 且每一架长机 i 的运动满足式(1)和式(3), 设计控制律, 使长机 i 的位置 \mathbf{p}_i 与其路径上的虚拟目标点 $\tilde{\mathbf{p}}_i$ 重合, 且任意两架长机 i 和 j 满足 $\xi_i - \xi_j \rightarrow \xi_{ij}^d$ 。

注 1 ξ_{ij}^d 表示虚拟目标点 $\tilde{\mathbf{p}}_i$ 和 $\tilde{\mathbf{p}}_j$ 的参数的期望差异, 其值应合理设置以确保任务存在可行解, 即应当存在 $\xi_i^d \in \mathbb{R}$, $\forall i = 1, \dots, m$, 使得 $\xi_i^d - \xi_j^d = \xi_{ij}^d$ 对每一个 ξ_{ij}^d 成立。该性质类似于电路学中的基尔霍夫电压定律^[17]。

对于各僚机, 其利用自身状态以及由通信获得的长机状态信息, 与长机保持期望的相对位置, 并实现与长机的朝向一致。记长机 l 所对应的全体僚机的集合为 \mathcal{F}_l , 则对僚机的控制问题可表述如下。

问题 2. 设长机 l 的运动满足式(1)和式(3), 为运动学满足式(1)和式(2)的僚机 $f \in \mathcal{F}_l$ 设计控制律, 使得 $x_f(t) - x_l(t) \rightarrow d_f^x$, $y_f(t) - y_l(t) \rightarrow d_f^y$, $\theta_f(t) - \theta_l(t) \rightarrow 0$, 其中, $(d_f^x, d_f^y)^T$ 表示僚机相对于长机的期望位置。

路径上的虚拟目标点, 因此, 长机的协同可通过协调虚拟目标点在期望路径上的更新速率来实现。本节研究虚拟目标点的更新控制律, 以实现虚拟目标点的协调控制。

基于本文提出的分层分组控制方案, 各长机需要与其他组的长机交互各自虚拟目标点的信息。长机间的通信拓扑可由有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 表示, 其中 \mathcal{V} 顶点集且 $|\mathcal{V}| = m$, 对应于长机的集合, \mathcal{E} 为边集, 对应于长机两两之间的信息传递关系。若 $(j, i) \in \mathcal{E}$, 则长机 i 可获取长机 j 的虚拟目标点的信息, 记 $\mathcal{N}_i = \{j: (j, i) \in \mathcal{E}\}$ 为长机 i 的邻居集合。定义有向图 \mathcal{G} 的拉普拉斯矩阵 $\mathcal{L} = [\mathcal{L}_{ij}]_{m \times m}$ 如下: 若 $j \neq i$, 且 $j \in \mathcal{N}_i$, 则 $\mathcal{L}_{ij} = -1$; 若 $j \neq i$, 且 $j \notin \mathcal{N}_i$, 则 $\mathcal{L}_{ij} = 0$; 若 $j = i$, 则 $\mathcal{L}_{ij} = -\sum_{k=1}^m \mathcal{L}_{ik}$ 。在图论中, 有如下引理。

引理2^[18] 设 \mathcal{G} 为强连通有向图, 令 $\mathbf{r} = [r_1, \dots, r_m]^T$ 为其拉普拉斯矩阵 \mathcal{L} 的零特征值所对应的左特征向量。定义对角矩阵 $R = \text{diag}\{r_i\} \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 令 $Q = R\mathcal{L} + \mathcal{L}^T R$, 则 R 为正定矩阵, Q 为半正定矩阵, 且 Q 矩阵的零空间为 $\text{Null}(Q) = \{x: x^T Q x = 0\} = \text{Null}(\mathcal{L}) = \text{span}\{\mathbf{1}_m\}$ 。

利用引理2, 各长机的虚拟目标点在路径上的移动可采用如下的控制律:

$$\dot{\xi}_i = -\beta \tanh\left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} k_\xi (\xi_i - \xi_j - \xi_{ij}^d)\right) + \gamma_d, \quad (15)$$

其中, β , k_ξ 和 γ_d 均为正常数。如下定理表明控制律(15)可实现长机虚拟目标点的协调控制。

定理1 若 \mathcal{G} 为强连通有向图, 则采用式(15)所示的控制律能够使 $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_i - \xi_j = \xi_{ij}^d, \forall i, j = 1, \dots, m$ 。

证明 定义Lyapunov函数

$$V = \sum_{i=1}^m r_i \int_0^{-\sum_{j \in \mathcal{N}_i} k_\xi (\xi_i - \xi_j - \xi_{ij}^d)} \tanh(s) ds, \quad (16)$$

其中, r_i 的定义见引理2。根据双曲正切函数的性质, $\int_0^a \tanh(s) ds \geq 0$ 对任意的 $a \in \mathbb{R}$ 成立, 故 $V \geq 0$ 。记

$$u_i = -\sum_{j \in \mathcal{N}_i} k_\xi (\xi_i - \xi_j - \xi_{ij}^d), \quad (17)$$

式(17)对时间求导得

$$\begin{aligned} \dot{u}_i &= -k_\xi \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\dot{\xi}_i - \dot{\xi}_j) = k_\xi \sum_{j=1}^m \mathcal{L}_{ij} \dot{\xi}_j \\ &= -\beta k_\xi \sum_{j=1}^m \mathcal{L}_{ij} \tanh(u_j). \end{aligned} \quad (18)$$

记 $\tanh(\mathbf{u}) = [\tanh(u_1), \dots, \tanh(u_m)]^T$ 。式(16)对时

间求导, 并将式(17)与式(18)代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^m r_i \dot{u}_i \tanh(u_i) \\ &= -\beta k_\xi \sum_{i=1}^m r_i \tanh(u_i) \sum_{j=1}^m \mathcal{L}_{ij} \tanh(u_j) \\ &= -\frac{1}{2} \beta k_\xi (\tanh(\mathbf{u}))^T Q \tanh(\mathbf{u}). \end{aligned} \quad (19)$$

根据引理2, Q 为半正定矩阵, 故 $\dot{V} \leq 0$ 。根据LaSalle定理^[19], $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0$, 由引理2, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tanh(u_1) = \dots = \lim_{t \rightarrow \infty} \tanh(u_m)$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} u_1 = \dots = \lim_{t \rightarrow \infty} u_m$ 。

由于存在 $\xi_i^d \in \mathbb{R}, \forall i = 1, \dots, m$, 使得 $\xi_i^d - \xi_j^d = \xi_{ij}^d$ 对每一个 ξ_{ij}^d 成立, 记 $\tilde{\xi}_i = \xi_i - \xi_i^d, \tilde{\xi} = [\tilde{\xi}_1, \dots, \tilde{\xi}_m]^T, \mathbf{u} = [u_1, \dots, u_m]^T$, 则式(17)可写作

$$\mathbf{u} = -k_\xi \mathcal{L} \tilde{\xi}. \quad (20)$$

对于式(20), 由文献^[20]中的引理2, $u_1, \dots, u_m > 0$ 或 $u_1, \dots, u_m < 0$ 均不成立。因此, $\lim_{t \rightarrow \infty} u_1 = \dots = \lim_{t \rightarrow \infty} u_m$ 意味着 $\lim_{t \rightarrow \infty} u_i = 0, i = 1, \dots, m$ 。再由 $\text{Null}(\mathcal{L}) = \text{span}\{\mathbf{1}_m\}$, 故 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\xi}_i - \tilde{\xi}_j = 0, \forall i, j = 1, \dots, m$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_i - \xi_j = \xi_{ij}^d, \forall i, j = 1, \dots, m$ 。□

2.3 协同路径跟随控制律设计

控制律(12)–(13)能够使各长机收敛到其路径上的虚拟目标点, 控制律(15)能够实现各长机虚拟目标点的协同控制。现将两部分结合, 设计长机的协同路径跟随控制律。根据式(13), 设置空速指令为

$$v_i = \frac{\dot{l}_i - k_s e_{s_i} - \Omega_i}{\cos \bar{\theta}_i}. \quad (21)$$

注意到按控制律(12)计算 ω_i 的过程中需要用到 \dot{v}_i 的信息。式(21)对时间求导, 得

$$\dot{v}_i = \frac{\ddot{l}_i - \dot{\Omega}_i - k_s \dot{e}_{s_i} + v_i \dot{\bar{\theta}}_i \tan \bar{\theta}_i}{\cos \bar{\theta}_i}, \quad (22)$$

式中, $\dot{\Omega}_i = \dot{v}_w \cos(\theta_w - \bar{\theta}_i) - v_w (\dot{\theta}_w - \kappa(l_i) \dot{l}_i) \sin(\theta_w - \bar{\theta}_i)$ 。假设 $\frac{dl_i}{d\xi_i}$ 存在且 $\frac{dl_i}{d\xi_i} \in [\alpha_i^{\min}, \alpha_i^{\max}]$, 其中 $0 < \alpha_i^{\min} < \alpha_i^{\max} < +\infty$ 。根据式(15), 有

$$\begin{aligned} \ddot{l}_i &= -\beta k_\xi \frac{dl_i}{d\xi_i} \text{sech}^2\left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} k_\xi (\xi_i - \xi_j)\right) \cdot \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\dot{\xi}_i - \dot{\xi}_j)\right) \\ &\quad + \frac{d\left(\frac{dl_i}{d\xi_i}\right)}{dt} \dot{\xi}_i. \end{aligned} \quad (23)$$

由式(23)知, 长机的协同过程中, 需要由通信获得邻居长机的 ξ_j 和 $\dot{\xi}_j$ 。

式(22)中还用到了 $\dot{\bar{\theta}}_i$, 因 $\bar{\theta}_i = \vartheta_i + \bar{\theta}_{d_i}$, 由式(9),

可见计算 $\dot{\theta}_i$ 又需要 ω_i , 从而形成代数环。为此, 令

$$A_i = -k_\omega \vartheta_i - \frac{k_\theta v_i e_{d_i} (\sin \bar{\theta}_i - \sin \bar{\theta}_{d_i})}{\vartheta_i} - k_\pi k_d \operatorname{sech}^2(k_d e_{d_i}) \dot{e}_{d_i} - \frac{\dot{\Lambda}_i}{\sqrt{v_i^2 - \Lambda_i^2}}, \quad (24)$$

$$B_i = \frac{\Lambda_i}{v_i \sqrt{v_i^2 - \Lambda_i^2}}, \quad (25)$$

$$C_i = \frac{\ddot{l}_i - \ddot{\Omega}_i - k_s \dot{e}_{s_i}}{\cos \bar{\theta}_i}, \quad (26)$$

$$D_i = v_i \tan \bar{\theta}_i. \quad (27)$$

将式(22)与式(26)–(27)联立, 得

$$\dot{v}_i = C_i + D_i \dot{\theta}_i. \quad (28)$$

另一方面, $\dot{\theta}_i = \dot{\vartheta}_i + \dot{\bar{\theta}}_{d_i} = \omega_i - \kappa(l_i) \dot{l}_i$, 将其与式(12)和式(24)–(25)联立可得,

$$\dot{\theta}_i = A_i + B_i \dot{v}_i. \quad (29)$$

将式(28)与式(29)联立, 并由 $\omega_i = \dot{\theta}_i + \kappa(l_i) \dot{l}_i$, 可得

$$\omega_i = \kappa(l_i) \dot{l}_i + \frac{A_i + B_i C_i}{1 - B_i D_i}. \quad (30)$$

式(21)与式(30)共同构成了长机的协同路径跟随控制律。两式中的 \dot{l}_i 项可根据 $\dot{l}_i = \frac{dl_i}{d\xi_i} \dot{\xi}_i$ 和式(15)求得。如下定理总结了长机协同路径跟随闭环控制系统的稳定性。

定理2 考虑 m 架运动学模型如式(1)所示的长机的协同路径跟随控制问题, 长机间通信拓扑为强连通有向图。记 $\theta_\eta = \arcsin \frac{v_{w_{\max}}}{v_{\min}} + k_\pi$, 并有 $\theta_\eta < \frac{\pi}{2}$. 长机 $i = 1, \dots, m$ 均满足初始条件:

$$\phi_i(t_0) \in M \triangleq \{\phi_i: V_i \leq c^2\}, \quad (31)$$

其中, $V_i = \frac{1}{2} e_{s_i}^2 + \frac{1}{2} e_{d_i}^2 + \frac{\vartheta_i^2}{2k_\theta}$, 且有如下各式成立,

$$0 < c < \frac{\pi - 2\theta_\eta}{2\sqrt{2k_\theta}}, \quad (32)$$

$$\tan(\theta_\eta - k_\pi) \tan(\theta_\eta + \sqrt{2k_\theta}c) < 1, \quad (33)$$

$$\frac{\alpha_i^{\max}(\gamma_d + \beta) + \sqrt{2k_\theta}c + v_w^{\max}}{\cos(\theta_\eta + \sqrt{2k_\theta}c)} \leq v_{\max}^l, \quad (34)$$

$$\alpha_i^{\min}(\gamma_d - \beta) - \sqrt{2k_\theta}c - v_w^{\max} \geq v_{\min}^l. \quad (35)$$

则对于 $\forall i, j = 1, \dots, m$, 控制律(21)与(30)使得 $\phi_i(t) \in M$ 和 $v_i \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$ 在整个控制过程中恒成立; 且 $t \rightarrow \infty$ 时, $\phi_i \rightarrow \mathbf{0}$, $\xi_i - \xi_j \rightarrow 0$.

证明 首先证明, 整个控制过程中 $\phi_i(t) \in M$, $v_i(t) \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$ 恒成立。由于 $\phi_i(t_0) \in M$, 故 $e_{s_i}(t_0) \leq \sqrt{2}c$, $\vartheta_i(t_0) \leq \sqrt{2k_\theta}c$, $\bar{\theta}_i(t_0) = \bar{\theta}_{d_i}(t_0) + \vartheta_i(t_0) \leq \theta_\eta + \sqrt{2k_\theta}c$, 根据式(21), (34)和(35), 有 $v_i(t_0) \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$ 。现基于反证法证明 $\phi_i(t) \in M$, $v_i(t) \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$ 对 $t \geq t_0$ 恒成立, 若不然, 假设长机 i 违背了这两个条件中的任一个,

则有以下三种情况:

情况一: $\phi_i(t) \in M, \forall t \geq t_0$ 成立, 但 $v_i(t) \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$ 并非一直成立。记 t' 为第一次不满足长机空速约束的时刻, 由于 $\phi_i(t') \in M$, 类比对 t_0 时刻 v_i 的分析, 可得 $v_i(t') \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$, 与假设矛盾, 故该情况不可能发生。

情况二: $v_i(t) \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l], \forall t \geq t_0$ 成立, 但 $\phi_i(t) \in M$ 并非一直成立。由于 V_i 连续可微, 且 $V_i(t_0) \leq c^2$, 故存在时刻 t' 满足 $V_i(t') = c^2$ 且 $\dot{V}_i(t') > 0$ 。由于式(33)成立, 故控制律(30)中的 $1 - B_i D_i = 1 - \tan \varpi_i \tan(\bar{\theta}_i) \geq 1 - \tan(\theta_\eta - k_\pi) \tan(\theta_\eta + \sqrt{2k_\theta}c) > 0$, 意味着式(30)不会产生奇异性, 即控制律(30)等价于控制律(12), 根据文献^[5]中定理1的分析, 恒有 $\dot{V}_i(t) \leq 0$, 与假设矛盾, 故该情况不可能发生。

情况三: $v_i(t) \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$ 和 $\phi_i(t) \in M$ 都不能始终成立, 此时必然有时刻 t' 为长机 i 第一次不满足 $v_i \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$ 的时刻, 并由 V_i 的连续可微性, 必然有时刻 t'' 为第一次使得 $V_i(t'') = c^2$ 且 $\dot{V}_i(t'') > 0$ 。此时, 又有三种子情况: (1) $t' < t''$; (2) $t' > t''$; (3) $t' = t''$ 。对于前两种子情况, 可类比情况一和情况二, 证明这两种子情况不可能发生; 对于子情况三, 由于 $\dot{V}_i(t) \leq 0, t \in [t_0, t']$, 故而 $\phi_i(t') \in M$, 与假设矛盾, 故该子情况也不可能发生。

综上, $\phi_i(t) \in M, v_i(t) \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l], \forall t \geq t_0$ 。由于式(33)成立, 故控制律(30)中的 $1 - B_i D_i > 0$, 因而控制律(30)等价于控制律(12), 由引理1, 得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_i = \mathbf{0}$; 由定理1, $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_i - \xi_j = 0, \forall i, j = 1, \dots, m$. 证毕。□

注意到定理2并未保证 $\omega_i \in [-\omega_{\max}^l, \omega_{\max}^l]$ 能始终满足。虽然通过对控制律(30)中 A_i, B_i, C_i, D_i 各项的分析, 仍可建立使 $\omega_i \in [-\omega_{\max}^l, \omega_{\max}^l]$ 始终满足的充分条件, 但该条件会过于苛刻; 与此同时, 在实际问题中, 存在约束关系(32)–(35)不能同时满足的情况。在此, 本文提出一般情形下, 长机协同路径跟随算法的工程实现。算法的步骤如下:

step 1: 依据式(4)计算 $e_{s_i}, e_{d_i}, \bar{\theta}_i$;

step 2: 利用虚拟目标点信息 $\tilde{p}_i, \tilde{\theta}_i$ 以及风扰项 $v_w, \dot{v}_w, \theta_w, \dot{\theta}_w$, 计算 $\Omega_i, \dot{\Omega}_i, \Lambda_i, \dot{\Lambda}_i$;

step 3: 依据式(15)计算 $\dot{\xi}_i, \dot{l}_i = \frac{dl_i}{d\xi_i} \dot{\xi}_i$;

step 4: 依据式(21)计算 v_i ;

step 5: if $v_i > v_{\max}^l$ or $v_i < v_{\min}^l$, then $v_i = \operatorname{Sat}(v_i, v_{\max}^l, v_{\min}^l)$; $\dot{l}_i = v_i \cos \bar{\theta}_i + k_s e_{s_i} + \Omega_i$, $\dot{\xi}_i = \frac{d\xi_i}{dl_i} \cdot \dot{l}_i$;

step 6: 依据式 (30) 计算 ω_i ;

step 7: $\omega_i = \text{Sat}(\omega_i, \omega_{\max}^l, -\omega_{\max}^l)$;

step 8: 更新 ξ_i , 并向其邻居长机广播 $\xi_i, \dot{\xi}_i$.

在 step 5 和 step 7 中所使用的饱和函数 $\text{Sat}(x, a, b)$ 定义如下 (设 $a > b$): 若 $x \geq a$, 则 $\text{Sat}(x, a, b) = a$; 若 $b \leq x < a$, 则 $\text{Sat}(x, a, b) = x$; 若 $x < b$, 则 $\text{Sat}(x, a, b) = b$. 饱和函数的引入保证了优先满足长机的控制约束, 在此基础上, 算法尽可能实现长机的协同路径跟随控制。

3 僚机控制律设计

本节设计僚机的基于跟随领航者法的编队控制律。为求解问题 2, 首先通过坐标变换(36), 将惯性坐标系 \mathcal{I} 下的僚机跟随长机的误差转化到僚机 f 的机体坐标系下, 如图 3 所示。

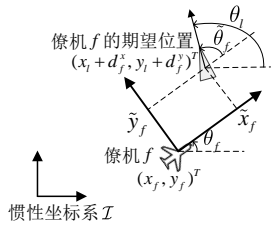


图 3 僚机跟随误差示意图

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_f \\ \tilde{y}_f \\ \tilde{\theta}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_f & \sin \theta_f & 0 \\ -\sin \theta_f & \cos \theta_f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l - x_f + d_f^x \\ y_l - y_f + d_f^y \\ \theta_l - \theta_f \end{bmatrix}. \quad (36)$$

从图3可以看出, $\tilde{\theta}_f$ 是一个角度, 因此可将其无差别地转化到 $[-\pi, \pi]$ 区间上。因此问题2等价于设计满足僚机控制约束的编队控制律, 使得任意满足 $[\tilde{x}_f(t_0), \tilde{y}_f(t_0)]^T \in \mathbb{R}^2$ 和 $\tilde{\theta}_f(t_0) \in [-\pi, \pi]$ 的初始状态, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\tilde{x}_f(t) \rightarrow 0, \tilde{y}_f(t) \rightarrow 0, \tilde{\theta}_f(t) \rightarrow 0$ 。

对式 (36) 求导可得,

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_f = \omega_f \tilde{y}_f - v_f + v_l \cos \tilde{\theta}_f, \\ \dot{\tilde{y}}_f = -\omega_f \tilde{x}_f + v_l \sin \tilde{\theta}_f, \\ \dot{\tilde{\theta}}_f = \omega_l - \omega_f. \end{cases} \quad (37)$$

从式(37)中可以看出, 当所有无人机处于一个匀强风场中时, 风扰不会对僚机跟随长机的误差产生影响。针对式(37)所描述的系统, 僚机的控制律可设计为如下形式:

$$\begin{cases} \omega_f = \text{Sat}(\omega_l + k_1 \cdot (k_2 \tilde{\theta}_f + \frac{\tilde{y}_f}{\sqrt{1 + \tilde{x}_f^2 + \tilde{y}_f^2}}), \\ \quad -\omega_{\max}, \omega_{\max}), \\ v_f = \text{Sat}(v_l \cos \tilde{\theta}_f + k_3 \tilde{x}_f, v_{\min}, v_{\max}); \end{cases} \quad (38)$$

其中, k_1, k_2, k_3 均为正常数。

注2 文献^[14]指出, 对于系统(37), 若长机的空速 v_l 和航向角速率 ω_l 满足式(3), 则采用控制律(38), 通过配置参数 k_1, k_2, k_3 的值, 可使得 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\tilde{x}_f(t) \rightarrow 0, \tilde{y}_f(t) \rightarrow 0, \tilde{\theta}_f(t) \rightarrow 0$ 。

文献^[14]给出了实现 $\tilde{x}_f(t) \rightarrow 0, \tilde{y}_f(t) \rightarrow 0, \tilde{\theta}_f(t) \rightarrow 0$ 的控制目标且满足控制约束式(2)的一系列关于参数选择的充分非必要条件, 但该条件复杂且苛刻。事实上, 参数在不满足这些条件时, 仍可能实现控制目标, 这一点在文献^[14]的仿真中也得以验证。本文在文献^[14]所使用的参数的基础上, 通过多次仿真优化以选择合适的僚机控制参数。

4 集群控制律整体分析

在论文第1节建立的面向大规模固定翼无人机集群分层分组控制方案的基础上, 第2节和第3节分别设计了长机和僚机的控制律。本节在此基础上, 对长机和僚机组成的闭环系统整体进行分析。

定理2指出, 若长机间通信拓扑为强连通有向图, 且长机 $l = 1, \dots, m$ 均满足式(31)的初始条件, 且不等式组(32)–(35)成立, 则控制律(21)与(30)可保证所有长机协同路径跟随闭环控制系统的稳定性, 从而实现了组间的协同; 且在整个过程中, 长机的空速恒满足 $v_l \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l]$. 若进一步在整个控制过程中, $\omega_l \in [-\omega_{\max}^l, \omega_{\max}^l]$ 恒成立, 则由注2知, 对僚机采用式(38)的控制律可保证各僚机跟随其长机闭环控制系统的稳定性, 即实现了组内的协同。由于长僚机的控制误差均收敛到零, 故而保证了整个集群闭环控制系统的渐近稳定性。

在实际中可能存在式(32)–(35)不能同时满足等情况, 为此, 本文第2节在控制律(21)与(30)的基础上, 提出了长机协同路径跟随算法的工程实现, 该算法优先保证满足长机的控制约束, 即 $v_l \in [v_{\min}^l, v_{\max}^l], \omega_l \in [-\omega_{\max}^l, \omega_{\max}^l]$. 在此前提下, 算法尽可能实现长机的协同路径跟随控制。由注2知, 此时对僚机采用式(38)的控制律仍可保证各僚机跟随其长机闭环控制系统的稳定性。因此, 此做法可以视作在优先保证组内协同的基础上, 尽可能达到组间的协同。由于通常情况下对于同一组内的无人机的相对位置保持的精度要求高于不同组之间的相对位置的精度, 这一做法也符合实际应用的需求。

注3 本文提出的编队控制算法可结合一些分布式冲突消解算法以避免同一组内或不同组之间的无人机发生碰撞。例如, 在实际应用中, 可以设定一个安全阈值, 当与其他无人机之间的距离小于此安全阈值时, 则开始执行文献^[21]的冲突消解算法;

当与其他无人机的距离均大于此安全阈值时, 则执行本文设计的编队控制律。

5 仿真分析

为验证提出的大规模集群编队控制方法的有效性, 本文面向典型的集群侦察和打击任务, 开展了100架规模的固定翼无人机集群全流程数值仿真。任务想定如图4所示, 无人机集群需要穿过山谷, 到达敌方区域执行覆盖搜索和目标打击任务。整个任务可以划分为以下四个阶段:

- 阶段一: 整个集群以纵“二”字队形出动;
- 阶段二: 各群组到达A点后, 变换成纵“一”字队形通过山谷;
- 阶段三: 各群组通过山谷到达B点后, 转为横“一”字队形, 分别执行覆盖搜索任务;
- 阶段四: 当第一个群组的无人机到达C点后, 接到打击目标区域的任务, 要求整个集群收缩队形, 以覆盖打击目标区域。

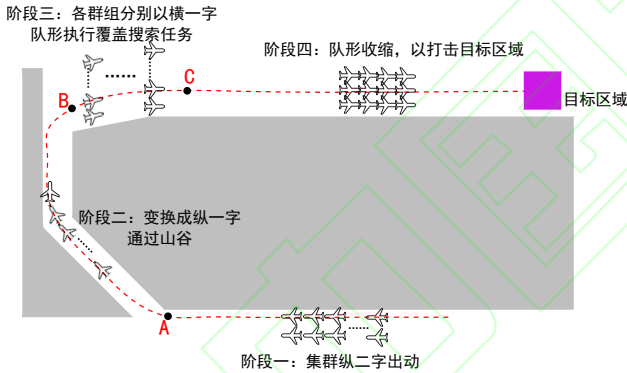


图4 大规模集群仿真实验任务想定

为完成该任务, 本文将100架无人机分为10个群组, 每组10架无人机, 并指定每个群组的第一架无人机为长机, 其他无人机作为僚机, 从而形成图1中的分层分组控制架构。长机间形成的通信拓扑如图5所示, 图中的数字代表长机所对应的编号, 可以看出该拓扑为强连通有向图。

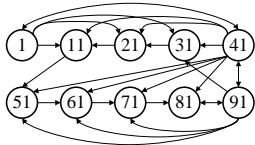


图5 长机间形成的通信拓扑

仿真中, 采用表1中的航路点拟合生成三次B样条曲线^[10], 作为长机的期望路径, 本仿真设定在任务执行过程中, 所有长机共用同一条期望路径, 控

制目标是使相邻两长机沿曲线的距离保持期望值, 故而 $\xi_i = l_i$ 。无人机的参数设置为 $v_{\max} = 50\text{m/s}$, $v_{\min} = 20\text{m/s}$, $\omega_{\max} = 0.54\text{rad/s}$; 风为定常风, $v_w = 5\text{m/s}$, $\theta_w = -\frac{3}{4}\pi$ 。控制参数设置为 $k_\pi = 0.2\pi$, $k_d = 0.01$, $k_\omega = 2$, $k_s = 0.25$, $\gamma_d = 35$, $\beta = 10$, $k_\xi = 5$, $k_\theta = 0.015$, $\epsilon_v = \epsilon_\omega = 0$, $\epsilon_v = 1.5$, $\epsilon_\omega = 0.2$ 。在数值计算过程中, 设置仿真步长为10毫秒, 并采用欧拉法求解常微分方程。

表1 生成三次B样条曲线的航路点

航路点序号	1	2	3	4	5	6
X (m)	4000	2000	0	-1000	-1500	-2500
Y (m)	0	0	0	0	0	500
航路点序号	7	8	9	10	11	12
X (m)	-3000	-3500	-4000	-4000	-4000	-3600
Y (m)	1000	1500	2500	3250	3700	4100
航路点序号	13	14	15	16		
X (m)	-2000	0	5000	10000		
Y (m)	4500	4500	4500	4500		

图6展示了任务执行过程中长机的控制误差, 从图中可以看出, 各长机的路径跟随误差最终都收敛至零。根据定理1的分析, $\lim_{t \rightarrow \infty} u_i = 0$, $i = 1, \dots, m$ 意味着实现了各长机虚拟目标点的协调控制, 故而 u_i 可以用于衡量长机的协同误差。在 $t = 326\text{s}$ 时, 相邻两长机沿路径的期望距离由300米变为30米, 但从图6中可以看出, 协同误差 u_i 在此之前和之后都能收敛到零。

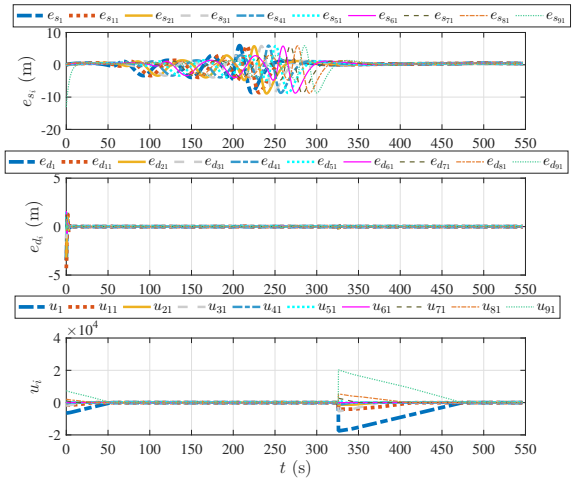


图6 各长机的控制误差

现分析僚机的控制效果。不失一般性, 在此选择第1个群组的僚机在阶段一的控制效果进行分析。在该阶段, 设置组内的序号为奇数的无人机 $d_f^x = 60 \times [f/2]$, $d_f^y = 0$, $f = 3, 5, \dots, 9$, 序号为偶数的无人机 $d_f^x = 60 \times ([f/2] - 1)$, $d_f^y = -30$, $f = 2, 4, \dots, 10$, 其中 $[\cdot]$ 表示向下取整数。第1个群组的

僚机在阶段一对长机的跟随误差如图7所示。从图中可以看出, 跟随误差 \tilde{x}_f , \tilde{y}_f 以及 $\tilde{\theta}_f$ 在控制律(38)的作用下, 收敛到零。

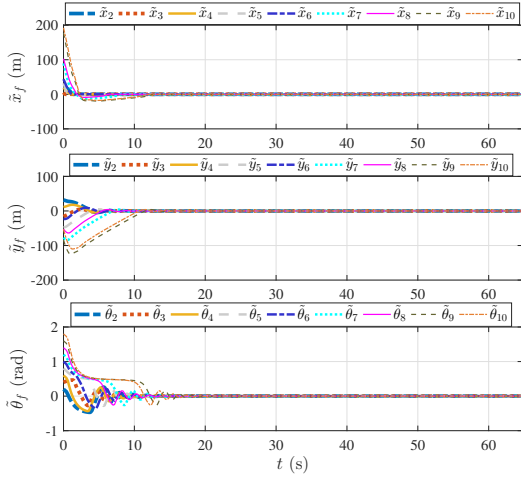


图7 在阶段一组1内所有僚机的跟随误差

图8–图11展示了大规模集群在各阶段的整体编队情况。图中深色的楔形表示长机, 浅色的楔形表示各群组的僚机, 图中的曲线为长机的期望路径。图8以上下两个子图的形式展示了所有无人机在阶段一形成的纵“二”字形队形。各群组的长机到达图4中的A点后, 该组无人机变换成纵“一”字形队形通过山谷, 进入阶段二, 如图9所示。在该阶段各僚机沿长机的虚拟目标点处的路径切线方向, 以30米的间隔按序号依次排在长机后面。与此同时, 相邻两长机之间沿曲线的期望距离保持不变。

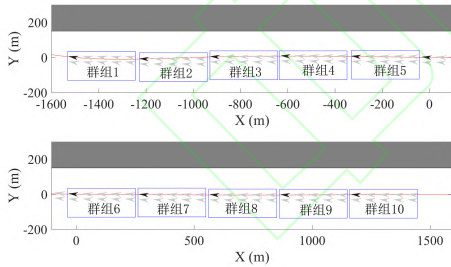


图8 大规模集群在阶段一形成的纵“二”字形队形

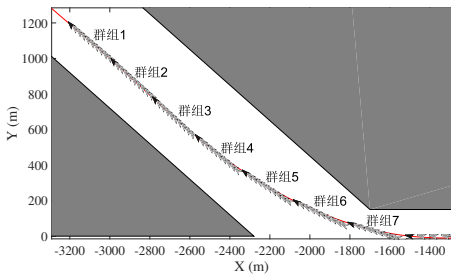


图9 大规模集群在阶段二形成的纵“一”字形队形

各群组的长机通过山谷到达图4中的B点后, 该群组的无人机转为横“一”字形队形, 进入阶段

三, 执行覆盖搜索任务。各组的编队设置为 $d_f^x = 0$, $d_f^y = -30(f-1)$, $f = 2, 3, \dots, 10$ 。图10展示了通过山谷后无人机以多组横“一”字形队形进行覆盖搜索时的轨迹。

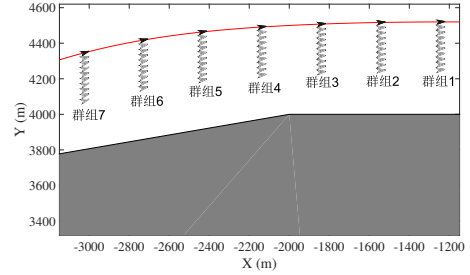


图10 大规模集群在阶段三形成的多组横“一”字形队形

图11展示了无人机在阶段四的打击目标时刻形成的队形, 目标区域的大小为 $250\text{m} \times 250\text{m}$, 期望队形是100架无人机形成 10×10 的方阵, 无人机前后左右的距离均为30m, 且每一群组的无人机在同一横排。从图中可以看出, 采用本文提出的控制方法, 无人机集群可以实现对目标区域的覆盖打击。

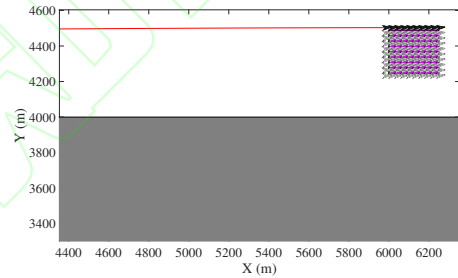


图11 大规模集群在阶段四打击目标区域时形成的队形

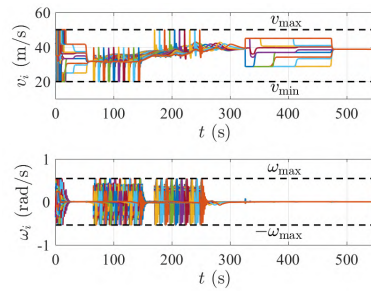


图12 任务执行过程各无人机的控制量

图12展示了整个任务执行过程中所有无人机的控制量, 从中可以看出无人机的控制约束都能得到满足, 表明本文设计的编队控制算法可以有效应对固定翼无人机控制约束带来的挑战。

6 结论

本文针对大规模固定翼无人机集群的编队控制问题, 采用分组的思想, 并借助“长—僚机”框架的层级结构, 提出一种分层分组控制方案; 在此基础上, 分别设计了长机的协同路径跟随控制律和僚

机的跟随长机控制律。本文的方法可以有效地应对固定翼无人机集群的规模限制、控制约束和环境风的影响。100架规模的固定翼无人机集群全流程数值仿真结果表明,采用本文提出的方法,控制误差收敛到零,且在实现集群整体协同的同时,始终满足固定翼无人机的控制约束。

下一步研究可借鉴文献^[15]的模糊自适应控制方法,并设计僚机之间的协同策略,解决存在模型不确定性以及未知外界干扰情况下的编队控制问题。

参考文献(References)

- [1] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2019. doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23732.
(Wang X K, Liu Z H, Cong Y R, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: Survey and directions [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019. doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23732.)
- [2] Vászárhelyi G, Virágh C, Somorjai G, et al. Optimized flocking of autonomous drones in confined environments[J]. Science Robotics, 2018, 3(20): eaat3536.
- [3] Wang X K, Shen L C, Liu Z H, et al. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(11): 212204.
- [4] Xargay E, Kaminer I, Pascoal A, et al. Time-Critical cooperative path following of multiple unmanned aerial vehicles over time-varying networks[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2013, 36(2): 499–516.
- [5] Wang Y Z, Wang D W, Zhu S Q. Cooperative moving path following for multiple fixed-wing unmanned aerial vehicles with speed constraints[J]. Automatica, 2019, 100: 82–89.
- [6] Chen H, Cong Y R, Wang X K, et al. Coordinated Path Following Control of Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicles[J]. arXiv preprint arXiv:1906.05453, 2019.
- [7] Wilson D B, Goktogan A H, Sukkarieh S. Vision-aided guidance and navigation for close formation flight[J]. Journal of Field Robotics, 2016, 33(5): 661–686.
- [8] Watanabe Y, Amiez A, Chavent P. Fully-autonomous coordinated flight of multiple UAVs using decentralized virtual leader approach[C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Tokyo, Japan: IEEE, 2013: 5736–5741.
- [9] Sujit P B, Saripalli S, Borges Sousa J. Unmanned aerial vehicle path following: A survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2014, 34(1): 42–59.
- [10] Zhao S L, Wang X K, Lin Z Y, et al. Integrating vector field approach and input-to-state stability curved path following for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018. doi: 10.1109/TSMC.2018.2839840.
- [11] Kushleyev A, Mellinger D, Powers C, et al. Towards a swarm of agile micro quadrotors[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(4): 287–300.
- [12] Chung T H, Clement M R, Day M A, et al. Live-fly, large-scale field experimentation for large numbers of fixed-wing UAVs[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden: IEEE, 2016: 1255–1262.
- [13] Das A K, Fierro R, Kumar V, et al. A vision-based formation control framework[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18 (5): 813–825.
- [14] Ren W, Beard R W. Trajectory tracking for unmanned air vehicles with velocity and heading rate constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12 (5): 706–716.
- [15] 沈智鹏, 曹晓明. 输入受限四旋翼飞行器的模糊自适应动态面轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1401–1408.
(Shen Z P, Cao X M. Fuzzy adaptive dynamic surface trajectory tracking control for quadrotor UAV with input constraints[J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1401–1408.)
- [16] 张皓, 张洪铭, 王祝萍. 基于事件触发的无人驾驶汽车路径跟随预测控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2421–2427.
(Zhang H, Zhang H M, Wang Z P. Event-triggered predictive path following control for unmanned autonomous vehicle[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2421–2427.)
- [17] Chen H, Zelazo D, Wang X K, et al. Convergence Analysis of Signed Nonlinear Networks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(1): 189–200.
- [18] Zhang H W, Lewis F L, Qu Z H. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 3026–3041.
- [19] Khalil H K. Nonlinear Systems[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002: 126–133.
- [20] Li Y, Xiang J, Wei W. Consensus problems for linear time-invariant multi-agent systems with saturation constraints[J]. IET Control Theory and Applications, 2011, 5(6): 823–829.
- [21] Yang J, Yin D, Shen L C. Reciprocal geometric conflict resolution on unmanned aerial vehicles by heading control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(10): 2511–2523.

作者简介

王祥科(1981—), 男, 教授, 博士, 从事无人机自主控制、集群控制等研究, E-mail: xkwang@nudt.edu.cn;

陈浩(1991—), 男, 博士研究生, 从事无人机编队控制的研究, E-mail: chenhao09@nudt.edu.cn.

赵述龙(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事无人机飞行控制、模型预测控制等研究, E-mail: jaymaths@nudt.edu.cn.