

doi: 10.7690/bgzd.2025.01.020

基于速度协同一致的分布式无人机集群技术

许为乐, 李春涛

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

摘要: 针对无人机集群中交互机制和运动决策问题, 提出一种基于速度协同一致的分布式无人机集群方法。无人机采用区域化固定邻居数目 (regionalized fixed number of neighbors, RFNN) 交互机制, 仅与周围少量无人机进行信息交互, 使邻居信息得以高效利用, 有效避免冗余信息带来的通信资源浪费。根据无人机与其邻居之间的相对位置和速度约束关系设计速度协同量作为自身期望速度, 解决集群运动中的无人机控制问题, 且提高无人机群同步收敛性能。仿真实验结果表明: 该方法能够仅通过局部交互作用实时协调无人机之间的速度, 实现集群有序运动和集群速度跟踪。

关键词: 分布式; 无人机集群; 速度协同; 区域化固定邻居数目; 集群速度跟踪

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Distributed UAV Swarm Technology Based on Velocity Coordination and Consensus

Xu Weile, Li Chuntao

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To address the problems of interaction mechanism and motion decision in UAV swarm, a distributed UAV swarm method based on velocity coordination and consensus is proposed. UAVs adopt the regionalized fixed number of neighbors (RFNN) interaction mechanism to interact with only a small number of surrounding UAVs, which enables efficient use of neighbor information and effectively avoids the waste of communication resources caused by redundant information. Furthermore, according to the relative position and velocity constraints between the UAV and its neighbors, the velocity coordination quantity is designed as its own desired speed, which solves the UAV control problem in swarm motion and improves the synchronous convergence performance of UAV swarm. Simulation experiments show that the method can coordinate the velocity among UAVs in real time only through local interactions, and achieve orderly swarm motion and swarm velocity tracking.

Keywords: distributed; UAV swarm; velocity coordination; RFNN; swarm velocity tracking

0 引言

近年来, 多无人机集群逐渐成为无人机领域的研究热点。多无人机之间相互协作, 凭借群体的数量优势, 在协同侦察、区域搜索和灾难救援等领域能够发挥出显著作用^[1-2]。不同于单无人机系统的研究, 多无人机集群系统面临着集群建模、交互机制、运动决策、协同控制等更加复杂的问题^[3]。

针对多无人机集群问题, 国内外学者开展了大量的研究。Reynolds^[4]受鸟群、鱼群等群体运动启发, 提出著名的 Boid 模型, 规定了集群运动分离、聚集和对齐 3 个基本行为。后续研究者在 Boid 模型基础上, 对生物集群运动模型展开了更深入的研究, 提出了 Vicsek、Couzin、Cucker-Smale 等模型, 用来描述群体中个体之间的行为机制。无人机集群运动与生物群集行为存在高度的相似性^[5], 现有集群

算法大多是在生物集群理论基础上进行设计。邱华鑫等^[6]通过研究生物群集运动行为, 提出一种基于鸽群行为机制的集群控制方法, 利用鸽群层级领导交互机制和人工势场理论, 结合固定翼无人机运动模型, 通过无人机间的网络通信实现了少量无人机的集群飞行仿真。该方法对群体中单个无人机的交互对象有明确的指派, 导致系统的通信拓扑设计难度会随着群体规模的扩大而增大。Olfati-Saber 等^[7]提出了 Flocking 蜂拥集群算法, 认为集群运动中个体之间具有位置约束, 提出了明确的集群构型概念, 规定个体之间必须保持相等的间距, 通过个体之间的相对位置关系构建势能函数来实现期望集群构型, 并对集群运动的稳定性进行了详细的理论证明。然而, 对于多无人机集群而言, 并不需要无人机之间保持相同的间距, 只需要保证彼此之间不发生碰

收稿日期: 2024-07-11; 修回日期: 2024-08-15

第一作者: 许为乐(1997—), 男, 江苏人, 硕士。

撞。Vásárhelyi 等^[8-9]设计了基于速度约束作用的集群算法,将无人机间的位置约束也转化为速度指令,侧重在群体对齐行为的实现,该团队在 2018 年完成了户外有限空间中 30 架无人机集群实验。Mulgaonkar 等^[10-11]以微型四旋翼无人机为研究对象,通过光学运动捕捉使得无人机获得全局感知信息,实现室内集群飞行实验;此外,该团队还设计了一种仅依靠机载视觉传感器获取无人机实时位置的方法,从而实现了室外飞行验证。Zhou 等^[12-13]依靠无人机机载传感器对周边环境进行实时地图建模,再对无人机的运动进行轨迹规划,将集群问题转化单机飞行最优规划问题,在复杂的树林环境中进行了无人机集群实验。

笔者在 Reynolds 集群行为准则下,重新定义集群运动中无人机的位置和速度约束。无人机间采用区域化固定邻居数目交互机制确定自身邻居,将自身感知范围按照距离划分为排斥域、协同域和吸引域,仅与区域中距离自身最近的固定数目邻居进行信息交互。进一步,根据邻居所处感知区域的不同,利用相对位置和速度关系分别进行速度协同量设计,从而给出无人机的期望速度,通过速度控制实现多无人机集群运动。最后,从无人机之间的位置关系、速度关系、信息交互量和系统能量 4 方面考虑,建立不同的评价指标进行集群飞行质量评价。

1 问题描述

考虑由 N 架无人机组成的集群系统,假设所有无人机能够以相同的高度飞行,并将无人机模型简化到 2 维空间,采用如下运动模型^[14]:

$$\begin{cases} d\bar{p}_i(t)/dt = \bar{v}_i(t) \\ d\bar{v}_i(t)/dt = \bar{u}_i(t) \end{cases}, i=1,2,\dots,N. \quad (1)$$

式中: $\bar{p}_i(t)=[x,y]^T$, $\bar{v}_i(t)=[v_x,v_y]^T$, $\bar{u}_i(t)=[u_x,u_y]^T$ 分别为无人机 i 的位置、速度和控制输入向量,满足无人机运动约束,即 $\|\bar{v}_i(t)\| \leq v_{\max}$, $\|\bar{u}_i(t)\| \leq u_{\max}$ 。

为方便描述多无人机在集群运动过程中的信息交互机制,笔者采用无向图 $G=(V,E)$ 表示无人机间的交互拓扑结构,如图 1 所示。将每个无人机看作图中的一个节点,无人机群可用集合表示为 $V=\{1,2,\dots,N\}$,交互拓扑表示为 $E=\{e_{ij}=(i,j)|i,j \in V,i \neq j\}$, $e_{ij} \in E$ 表示无人机 i 与无人机 j 能够互相获取彼此的运动状态信息。

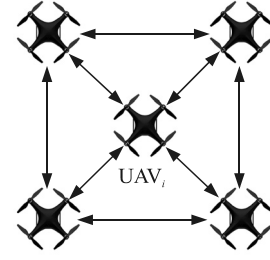


图 1 无人机的交互拓扑

每架无人机的通信范围是有限的,定义无人机间的交互作用范围为 r 。只有当 2 架无人机的距离在通信范围内,二者才能进行信息交互。无人机 i 的邻居集合可表示为:

$$\Gamma_i = \{j \in V, j \neq i \mid \|\bar{p}_j - \bar{p}_i\| < r\}, \forall i \in V. \quad (2)$$

在局部的交互作用下,无人机通过与自身邻居交换各自位置和速度信息来实现集群运动。无人机群最终状态需要表现出:1) 速度上,所有无人机的运动趋于一致;2) 位置上,在避免群体分散的同时,无人机之间需要保持安全间距;因此,通过定义无人机之间的相对速度和相对位置关系,就能够对期望集群状态进行描述,得出集群运动约束^[15]:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{v}_i(t) - \bar{v}_j(t)) = 0 \\ d_{\text{down}} \leq \lim_{t \rightarrow \infty} (\|\bar{p}_i(t) - \bar{p}_j(t)\|) \leq d_{\text{up}} \end{cases}, \forall i \in V, \forall j \in \Gamma_i. \quad (3)$$

式中 d_{down} , d_{up} 为无人机与邻居之间保持的最小距离(安全间距)和最大距离。

2 集群运动算法

笔者根据多无人机集群运动约束进行集群运动算法设计,通过局部交互作用实时协调无人机之间的速度矢量,从而实现无人机群有序运动。需要解决无人机之间信息交互问题以及速度协同问题。

2.1 无人机 RFNN 交互机制

无人机之间的信息交互机制决定个体的邻居选择,而邻居信息的作用对群集运动的形成起到关键性作用。笔者设计的无人机间交互机制遵循 Reynolds 集群行为,将无人机通信范围 r 内的感知区域按距离划分为排斥域(repulsive, REP)、对齐域(aligned, AL)和吸引域(attractive, ATT),分别对应无人机与其邻居之间的分离、对齐和聚集作用,如图 2 所示。

定义无人机排斥域感知距离 d_{rep} ,对齐域感知距离 d_{al} ,吸引域感知距离 d_{att} ,满足如下关系:

$$d_{\text{down}} = d_{\text{rep}} < d_{\text{al}} = d_{\text{up}} < d_{\text{att}} = r. \quad (4)$$

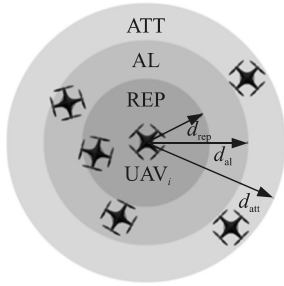


图 2 无人机感知作用区域

根据无人机的感知作用区域，位于不同区域中的邻居对无人机产生的作用也不相同，与无人机同时交互的邻居数目取决于通信范围，即采用的是固定邻居范围 (fixed neighborhood region, FNR) 交互方式。FNR 是一种理想化的交互方式，无人机将自身通信范围内的所有无人机都视为自身邻居，并进行信息交互。尽管交互方式简单，环境适应性强，但无人机之间的信息交互量会随着群体规模的扩大而增加，造成巨大的通信负载压力，难以实现，而且过多的邻居个数反而会带来信息冗余问题，造成通信资源浪费。

笔者采用 RFNN 交互方式，无人机仅选择感知范围内距离自身最近的少量无人机作为邻居进行信息交互，在交互数量上远小于 FNR，并且不会随着集群密集程度变化而变化^[16]。RFNN 考虑了无人机实际的通信能力，更贴合自然界中鸟类成群飞行时的信息交互方式，侧重依靠群体内部的信息传递作用实现集群运动交互。虽然交互数量较少，但能够高效利用邻居信息，避免了通信资源浪费。RFNN 交互机制下的邻居集合表示为：

$$\Gamma_i^R(\lambda) = \left\{ j \in \Gamma_i \mid j = \arg \min \|\bar{p}_j - \bar{p}_i\| \right\}, \forall i \in \mathbf{V}。 (5)$$

式中 λ 为固定邻居个数。

再将无人机的邻居细分为排斥邻居、对齐邻居和吸引邻居，便于后续设计无人机间的协同算法，即：

$$\begin{aligned} N_{i, \text{rep}} &= \left\{ j \in \Gamma_i^R \mid \|\bar{p}_{ij}\| \leq d_{\text{rep}} \right\} \\ N_{i, \text{al}} &= \left\{ j \in \Gamma_i^R \mid d_{\text{rep}} < \|\bar{p}_{ij}\| \leq d_{\text{al}} \right\}。 (6) \\ N_{i, \text{att}} &= \left\{ j \in \Gamma_i^R \mid d_{\text{al}} < \|\bar{p}_{ij}\| \leq d_{\text{att}} \right\} \end{aligned}$$

式中： $\bar{p}_{ij} = \bar{p}_j - \bar{p}_i$ 为无人机 i 与其邻居无人机 j 之间相对位置矢量； $\|\bar{p}_{ij}\|$ 为二者间欧氏距离。

2.2 无人机速度协同一致

假设无人机在感知范围内采用 RFNN 交互机制确定自身邻居，能够获取到邻居无人机的实时状态

信息。根据式(3)所述集群运动约束，无人机通过自身与邻居无人机之间相对位置和相对速度关系进行集群算法设计，得到期望速度 $\bar{v}_{i,d}(t)$ ，即：

$$\bar{v}_{i,d}(t) = \bar{v}_{i, \text{pos}}(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_{|\Gamma_i^R|}) + \bar{v}_{i, \text{coor}}(\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_{|\Gamma_i^R|})。 (7)$$

式中： $|\Gamma_i^R|$ 为与无人机 i 交互的邻居个数； $\bar{v}_{i, \text{pos}}$ 为位置速度项，由无人机 i 与其邻居相对位置关系决定； $\bar{v}_{i, \text{coor}}$ 为协同速度项，由无人机 i 与其邻居相对速度关系决定。

位置速度项是为实现无人机与其所有邻居无人机之间保持安全距离，避免发生碰撞，同时保证群体不会分散，体现了集群运动交互规则中个体间的聚集与分离作用。协同速度项则是为实现无人机与邻居之间运动一致，即对齐作用。在 RFNN 交互机制作用下，无人机 i 期望速度 $\bar{v}_{i,d}(t)$ 是由多种作用矢量叠加得到，式(7)可进一步表述为：

$$\bar{v}_{i,d}(t) = \bar{v}_{i, \text{pos}} + \bar{v}_{i, \text{coor}} = \bar{v}_{i, \text{rep}}(t) + \bar{v}_{i, \text{att}}(t) + \bar{v}_{i, \text{al}}(t) + \bar{v}_{i, \text{nav}}(t)。 (8)$$

式中： $\bar{v}_{i, \text{rep}}$ 、 $\bar{v}_{i, \text{att}}$ 、 $\bar{v}_{i, \text{al}}$ 分别为分离速度项，聚集速度项和对齐速度项，三者共同反映了无人机 i 与不同区域内的邻居无人机之间速度关系； $\bar{v}_{i, \text{nav}}$ 为导航速度项，设为常值速度。

分离速度项 $\bar{v}_{i, \text{rep}}$ 是为引导无人机远离排斥域内的邻居，以避免发生碰撞，确保无人机之间保持安全距离，无人机间距离越小，则排斥作用越强。聚集速度项 $\bar{v}_{i, \text{att}}$ 与分离速度项的作用相反，能够使得无人机与吸引域内的邻居彼此相互吸引，从而增强群体的凝聚作用。对齐速度项 $\bar{v}_{i, \text{al}}$ 是为让无人机与对齐域的邻居保持速度协同，实现运动一致。在三者共同作用下，多无人机能够最终达到期望集群状态。

假设在某时刻下，无人机 i 有 3 个邻居无人机与之交互，恰好分布在排斥域、对齐域和吸引域，综合多个邻居作用叠加得到期望速度 $\bar{v}_{i,d}$ 。无人机 i 受到的相互作用如图 3 所示。

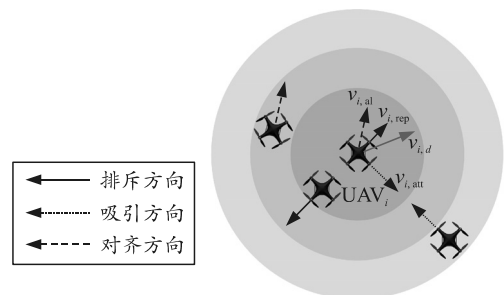


图 3 邻居无人机的速度协同作用

分离速度项和聚集速度项对应集群运动的位置约束，大小取决于无人机间相对距离；对齐速度项对应集群运动的速度约束，大小取决于无人机间相对速度差。无人机 i 的分离速度项、聚集速度项及对齐速度项分别设计为^[17-18]：

$$\begin{aligned} \bar{v}_{i, \text{rep}} &= \frac{k_{\text{rep}}}{|N_{i, \text{rep}}|} \sum_{j \in N_{i, \text{rep}}} \left(\|\bar{p}_{ij}\| - d_s \right) \frac{\bar{p}_{ij}}{\|\bar{p}_{ij}\|}, \\ \bar{v}_{i, \text{att}} &= \frac{k_{\text{att}}}{|N_{i, \text{att}}|} \sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \frac{\bar{p}_{ij}}{\|\bar{p}_{ij}\|}, \quad \bar{v}_{i, \text{al}} = \frac{k_{\text{al}}}{|N_{i, \text{al}}|} \sum_{j \in N_{i, \text{al}}} \bar{v}_{ij}. \end{aligned} \quad (9)$$

式中 k_{rep} , k_{att} , k_{al} 分别为无人机间的分离增益、聚集增益和对齐增益。

结合无人机最大速度约束，无人机在集群运动过程中的期望速度最终表示为：

$$\bar{v}_{i, d}(t) = \frac{\bar{v}_{i, d}(t)}{\|\bar{v}_{i, d}(t)\|} \min \left\{ v_{\text{max}}, \|\bar{v}_{i, d}(t)\| \right\}, \quad \forall i \in V. \quad (10)$$

考虑到无人机自身重量和空气动力学的影响，不能够立即改变速度。式(1)中的控制输入 $\bar{u}_i(t)$ 可表示为：

$$\bar{u}_i(t) = \frac{\bar{v}_{i, d}(t) - \bar{v}_i(t)}{\tau_v}, \quad \forall i \in V. \quad (11)$$

式中 τ_v 表示无人机的速度时间常数。

无人机个体能够通过自身速度控制达到集群算法所得期望速度 $\bar{v}_{i, d}(t)$ ，实现多无人机集群运动。在无人机之间速度协同的作用下，无人机群能够由散乱无序的初始状态达到集群有序的稳定状态。

2.3 稳定性分析

根据笔者设计的集群运动算法，可将所有无人机看作一个集群系统，通过研究无人机之间的相对状态关系分析系统稳定性^[19]。假设集群系统的能量由无人机间相对位置产生的势能和相对速度产生的动能组成，定义系统能量函数为：

$$Q(p, v) = U(p) + E(v) = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Gamma_i^R} U_{ij}(\bar{p}_{ij}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Gamma_i^R} E_{ij}(\bar{v}_{ij}). \quad (12)$$

式中： $U_{ij}(\bar{p}_{ij})$ 为无人机 i 的相对势能； $E_{ij}(\bar{v}_{ij})$ 为无人机 i 相对动能，分别表示为：

$$\left. \begin{aligned} U_{ij}(\bar{p}_{ij}) &= \Phi \left(\|\bar{p}_{ij} - \bar{p}_i\| \right) \\ E_{ij}(\bar{v}_{ij}) &= (\bar{v}_i - \bar{v}_j)^T (\bar{v}_i - \bar{v}_j) \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

$\Phi(\|\bar{p}_{ij}\|)$ 为无人机 i 与邻居产生分离和聚集作

用的势函数，满足 $\Phi(\|\bar{p}_{ij}\|) \geq 0$ ，并且在方向上具有对称性，即：

$$\nabla_{p_{ij}} \Phi(\|\bar{p}_{ij}\|) = -\nabla_{p_{ji}} \Phi(\|\bar{p}_{ji}\|). \quad (14)$$

定理：考虑由 N 架无人机组成的集群系统，无人机的运动模型由式(1)给出，采用设计的速度协同控制输入(8)，能够保证所有无人机速度最终趋于一致，系统达到稳定状态。

根据势函数定义，式(9)所设计的分离速度项和聚集速度项与无人机间相对位置相关，可由势函数求导得到：

$$\begin{aligned} \bar{v}_{i, \text{rep}} &= -\sum_{j \in N_{i, \text{rep}}} \nabla_{p_{ij}} \Phi_1(\|\bar{p}_{ij}\|); \\ \bar{v}_{i, \text{att}} &= -\sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \nabla_{p_{ij}} \Phi_2(\|\bar{p}_{ij}\|). \end{aligned} \quad (15)$$

$\Phi_1(\|\bar{p}_{ij}\|)$, $\Phi_2(\|\bar{p}_{ij}\|)$ 共同构成系统势能，能量函数进一步可表示为：

$$Q(p, v) = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j \in N_{i, \text{rep}}} \Phi_1(\|\bar{p}_{ij}\|) + \sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \Phi_2(\|\bar{p}_{ij}\|) + \frac{1}{2} \sum_{j \in \Gamma_i^R} \bar{v}_{ij}^T \bar{v}_{ij} \right]. \quad (16)$$

将能量函数中的势能部分和动能部分，分别对时间求导：

$$\begin{aligned} \dot{U}(p) &= \sum_{i=1}^N \left[2 \sum_{j \in N_{i, \text{rep}}} \nabla_{p_{ij}} \Phi_1(\|\bar{p}_{ij}\|) \bar{v}_{ij} + 2 \sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \nabla_{p_{ij}} \Phi_2(\|\bar{p}_{ij}\|) \bar{v}_{ij} \right] = \\ &= 2 \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j \in N_{i, \text{rep}}} \nabla_{p_{ij}} \Phi_1(\|\bar{p}_{ij}\|) \bar{v}_{ij} + \sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \nabla_{p_{ij}} \Phi_2(\|\bar{p}_{ij}\|) \bar{v}_{ij} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}(v) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Gamma_i^R} \bar{v}_{ij}^T \dot{\bar{u}}_{ij} = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Gamma_i^R} \bar{v}_{ij}^T \left[(\bar{v}_{i, d} - \bar{v}_i) - \right. \\ &\quad \left. (\bar{v}_{j, d} - \bar{v}_j) \right] = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_{i, \text{rep}}} \bar{v}_{ij}^T \left[-\nabla_{p_{ij}} \Phi_1(\|\bar{p}_{ij}\|) + \right. \\ &\quad \left. \nabla_{p_{ji}} \Phi_1(\|\bar{p}_{ji}\|) \right] + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \bar{v}_{ij}^T \bar{v}_{ij} = \\ &= -2 \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_{i, \text{rep}}} \bar{v}_{ij}^T \nabla_{p_{ij}} \Phi_1(\|\bar{p}_{ij}\|) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \bar{v}_{ij}^T \bar{v}_{ij}. \end{aligned} \quad (18)$$

从而得到系统能量函数对时间的导数：

$$\dot{Q}(p, v) = \dot{U}(p) + \dot{E}(v) = -\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_{i, \text{att}}} \bar{v}_{ij}^T \bar{v}_{ij} \leq 0. \quad (19)$$

可证式(12)所述能量函数能够随时间衰减到 0，并且由式(13)可得 $\bar{v}_i - \bar{v}_j = 0$, $\forall i \in V, j \in \Gamma_i^N$ ，证明集群内部所有无人机都能与其邻居无人机之间速度实

现一致，进而能够保证所有无人机速度最终趋于一致，说明系统能够达到稳定。

3 集群运动评价指标

为评价无人机集群飞行的质量，从无人机之间的位置关系、速度关系、信息交互量和系统能量 4 方面考虑，定义如下评价指标^[20]。

1) 最小间距 d_{\min} 和最大间距 d_{\max} :

$$\begin{aligned} d_{\min} &= \min \|\bar{p}_{ij}\|, \quad \forall i, j \in V, i \neq j. \\ d_{\max} &= \max \|\bar{p}_{ij}\| \end{aligned} \quad (20)$$

d_{\min} 关系到无人机之间的避撞，当系统达到稳定状态后，应该满足 $d_{\min} > d_{\text{down}}$ 。 d_{\max} 决定了群体的空间位置分布规模，若 d_{\max} 过大，说明群体过于分散。

2) 序参量 V_s :

$$V_s = \frac{1}{N} \left\| \sum_{i=1}^N \frac{v_i}{\|v_i\|} \right\|, \quad V_s \in [0, 1]. \quad (21)$$

序参量用来描述集群运动的有序性，表征所有无人机运动方向趋于一致的程度，体现了集群运动的速度约束。序参量越大，则认为群体运动更同步。

3) 平均邻居个数 N_s :

$$N_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Gamma_i|. \quad (22)$$

平均邻居个数定义为所有无人机邻居数量的平均值，表示集群运动个体间的信息交互情况。平均邻居个数越少，则群体通信负载越小。

4) 误差函数 Q_s :

$$Q_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Gamma_i^N} Q_{ij}, \quad Q_{ij} = \begin{cases} \|\bar{p}_{ij}\| - d_s, & j \in N_{i, \text{rep}} \\ \|\bar{v}_{ij}\|, & j \in N_{i, \text{al}} \\ \|\bar{p}_{ij}\| - d_{\text{al}}, & j \in N_{i, \text{att}} \end{cases}. \quad (23)$$

误差函数反映了系统能量变化，能衡量集群运动过程的准确度。无人机与其邻居之间的误差与邻居所在的感知区域相关，对于排斥域、吸引域内的邻居，无人机间的能量为相对位置差，而对齐域内的邻居，无人机间的能量为相对速度差。误差函数会随着群体一致化程度的提高而衰减到 0。

4 仿真验证

4.1 集群仿真系统架构

多无人机集群仿真系统架构如图 4 所示。假设无人机之间能够通过虚拟网络通行进行自身状态信

息交互，集群算法作为个体无人机的上层设计。无人机通过 RFNN 交互规则选择与自身交互的邻居集合，依据自身状态信息与邻居的状态信息，结合速度协同一致集群算法计算出自身的期望速度，最后通过速度控制进行单机飞行。最终，实现整个多无人机系统的协调有序运动。

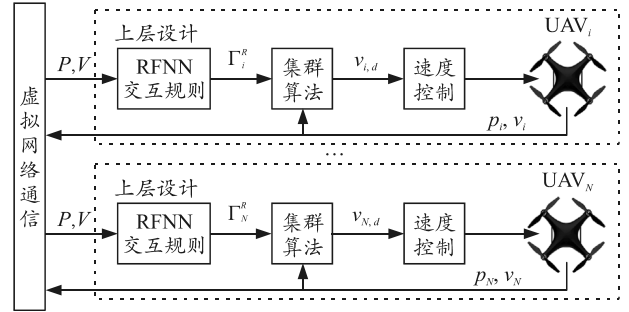


图 4 无人机集群仿真系统架构

多无人机集群运动仿真的具体实现过程如下:

- 1) 初始化系统内所有无人机的初始状态，给定集群的导航速度项。
- 2) 根据 RFNN 集群运动交互规则，由式(5)确定自身邻居集合，并由式(6)区分出排斥邻居集合、对齐邻居集合和吸引邻居集合。
- 3) 依据邻居无人机的位置和速度状态，由式(9)计算出各个速度项，再由式(8)叠加得到无人机期望速度。
- 4) 按照期望速度，无人机进行速度控制，并更新自身的实时状态。
- 5) 返回 2)，直至仿真结束。

4.2 仿真结果及分析

为验证笔者提出的基于速度协同一致集群算法的有效性，下面给出数值仿真结果。仿真包括集群有序运动和集群速度跟踪 2 场景。结果表明：所设计的速度协同算法能够使得无人机群在满足集群运动约束下，由散乱无序的初始状态达到期望稳定的有序运动，并且在达到稳定状态后，群体无人机能够较好的跟踪导引速度。本文中的仿真实验是在 Matlab 2020a 中进行的，计算机操作系统为 Windows10，64 位，处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-3632QM @2.20 GHz。

假设共有 20 架无人机在 2 维空间中飞行，相关参数设置如表 1 所示。

4.2.1 集群有序运动场景验证

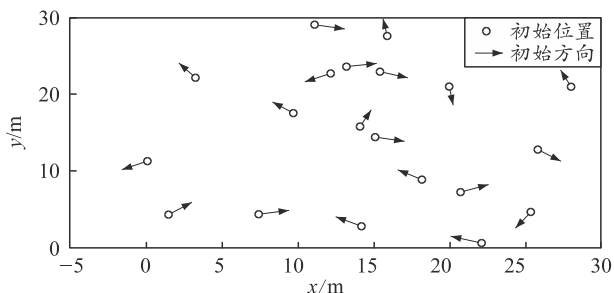
设定仿真时间 60 s，步长 0.05 s。所有无人机的初始位置状态随机生成在 $[0, 30] \times [0, 30]$ 区域内，

初始速度状态随机生成在 $[-3, 3] \times [-3, 3]$ ，并给定群体运动的导航速度项 $\vec{v}_{nav} = [3, 3]$ 。

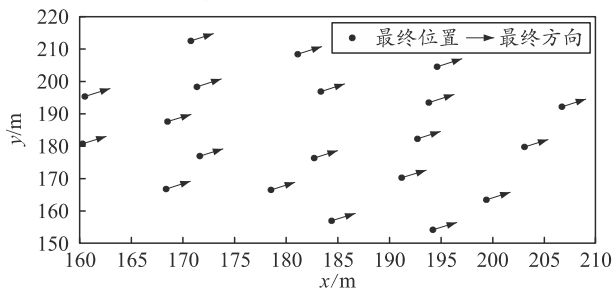
表 1 仿真参数设置

参数	数值
无人机总数 N	20
交互作用范围 r/m	30
安全距离 d_{down}/m	10
作用域感知距离 $(d_{rep}, d_{al}, d_{att})/m$	(10, 20, 30)
固定邻居个数 λ	4
速度项增益 $(k_{rep}, k_{al}, k_{att})$	(3, 1, 2)
速度时间常数 τ_v/s	3
最大速度限制 $v_{max}/(m/s)$	5

图 5 展示了无人机群的初始随机状态和最终有序状态。从图中看出：无人机在速度协同的作用下，无人机群能够由散乱无序的初始状态达到群体一致状态，实现多无人机集群有序运动。



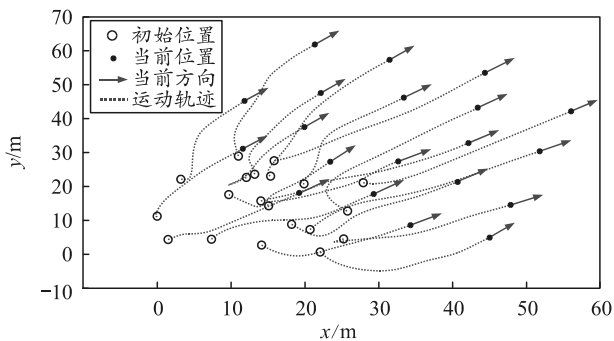
(a) 无人机群初始状态



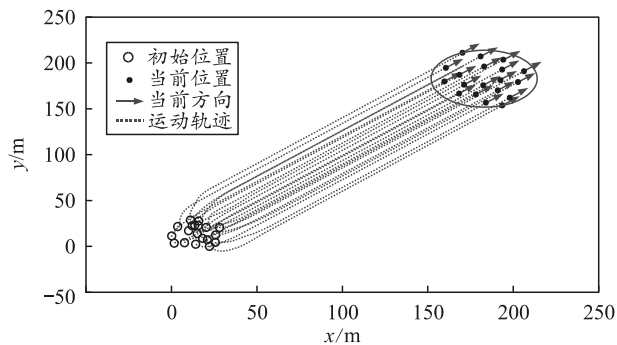
(b) 无人机群最终状态

图 5 无人机群状态变化

图 6 为无人机分别在 $t=0 \sim 10$ s 和 $t=0 \sim 60$ s 的运动轨迹，表明无人机能够远离自身的排斥邻居，靠近吸引邻居，并与对齐邻居进行协同，从而实现同步运动。



(a) 0~10 s 段无人机群轨迹



(b) 0~60 s 段无人机群轨迹

图 6 无人机群轨迹变化

图 7—10 为多无人机在集群有序运动过程中相关评价指标的变化。从图 7 可以看出：无人机之间的最小间距能够稳定在 10.2 m，满足仿真设定的安全间距 10 m 的位置约束条件，而最大间距稳定在 62.1 m，说明 20 架规模的无人机群实现有序运动后，空间位置能够分布在以最大间距为直径的圆内。

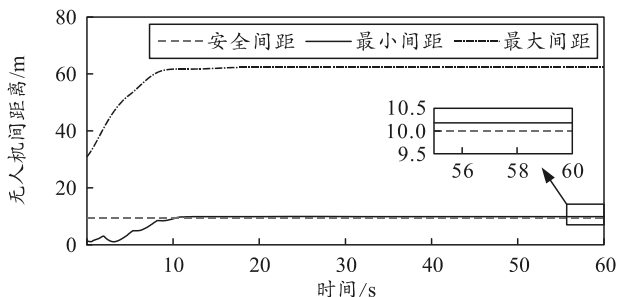


图 7 无人机之间距离变化

图 8 所示的序参量变化和图 9 所示的误差函数变化表征了多无人机集群运动的收敛性和稳定性。序参量最终稳定在 1，说明群体中所有无人机的速度能够趋于一致，代表无人机群能够朝着相同的方向同步运动；误差函数随着时间变化收敛到 0，表示无人机之间满足集群运动约束，多无人机系统达到稳定。

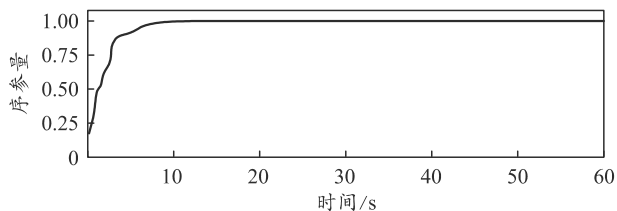


图 8 无人机群序参量变化

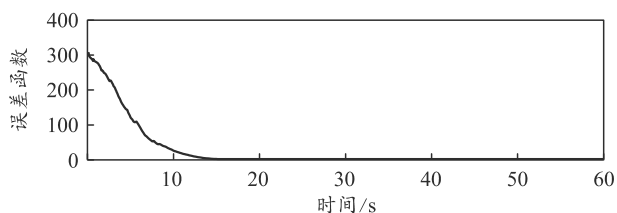


图 9 无人机群误差函数变化

图 10 为无人机平均邻居个数变化。可见：笔者采用的 RFNN 交互方式($\lambda=4$)，其平均邻居个数远小于 FNR 交互方式，有效减少了多无人机在集群过程中的信息交互量，能够高效利用邻居信息。此外，在区域化的交互机制作用下，无人机的排斥邻居个数和吸引邻居个数逐渐减少，而对齐邻居个数逐渐增加，最后实现所有无人机之间的速度协同一致。

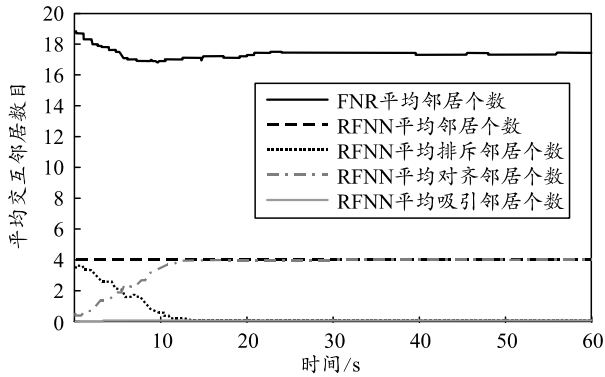


图 10 无人机平均交互邻居数目变化

4.2.2 集群速度跟踪场景验证

在多无人机能够实现基于速度协同一致集群有序运动，达到稳定状态的基础上，验证无人机群对导引速度的跟踪能力。设定总仿真时间为 240 s，在 0~60 s 时，给定导航速度项 $\vec{v}_{nav} = [3, 3]$ ，多无人机完成有序运动，达到集群稳定状态。在 $t=60$ s 时，更改 $\vec{v}_{nav} = [4, 0]$ ，验证对直线导引速度的跟踪能力，并在 $t=120$ s 时，更改 $\vec{v}_{nav} = [4\cos\theta, 4\sin\theta]$ ，以验证对曲线导引速度的跟踪能力。

图 11 为无人机群在导引速度跟踪仿真中 60~240 s 的运动轨迹，图 12 为导引速度跟踪下无人机群的横向和纵向速度变化情况。仿真结果表明：无人机群在初始速度随机的情况下，能够通过速度协同算法实现速度一致，并且在到达稳定状态后，还能够对给定的直线和曲线导引速度进行实时跟踪。

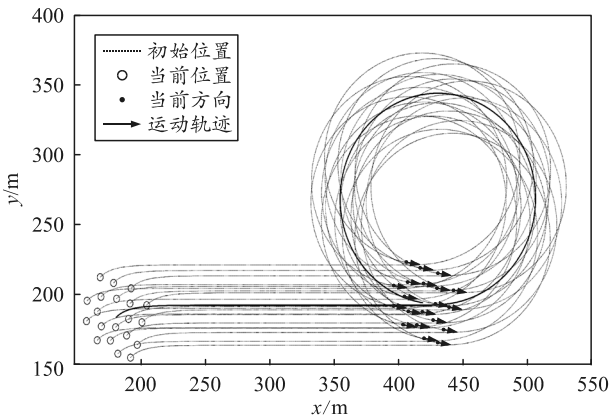
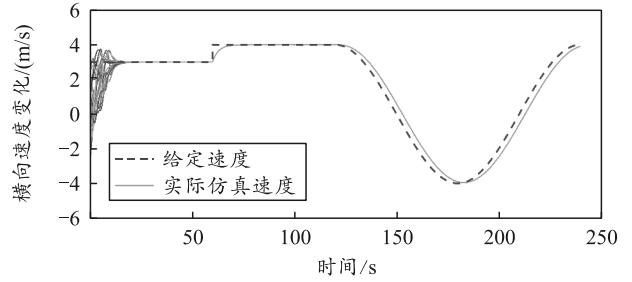
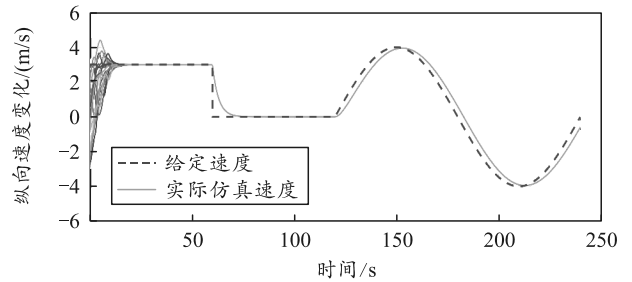


图 11 无人机群速度跟踪运动轨迹



(a) 无人机群横向速度变化



(b) 无人机群纵向速度变化

图 12 无人机群速度变化

5 结束语

笔者提出的基于速度协同一致的分布式无人机集群控制方法，将多无人机集群控制问题转化为个体无人机速度控制。无人机在感知范围内采用 RFNN 交互机制确定自身邻居，能够高效利用邻居信息，只需通过少量的局部信息交互作用就实现了集群有序运动和集群速度跟踪，避免了通信资源的浪费。但该方法没有对更大规模的无人机群进行仿真，未能验证方法的适用性和扩展性。

在未来的工作中，将对算法在不同规模下无人机集群运动的效果，并考虑将该方法移植到真实无人机上，以验证方法的实用性。除此之外，在该方法基础上将进一步研究多无人机集群航路跟踪的问题。

参考文献：

- [1] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 1-14.
- [2] 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, 2020, 41(4): 20-45.
- [3] CHUNG S J, PARANJAPPE A A, DAMES P, et al. A Survey on Aerial Swarm Robotics[J]. IEEE Trans. Robotics, 2018, 34(4): 837-855.
- [4] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [5] 邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队[J]. 工程科学学报, 2017, 39(3): 317-322.

- [6] 邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1298-1304.
- [7] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. IEEE TransAutomatContr, 2006, 51(3): 401-420.
- [8] VÁSÁRHELYI G, VIRÁGH C, SOMORJAI G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots[C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014.
- [9] GÁBOR V, CSABA V, GERGO S, et al. Optimized flocking of autonomous drones in confined environments[J]. Science Robotics, 2018, 3(20): 3536.
- [10] MULGAONKAR Y, MAKINENI A, GUERRERO-BONILLA L, et al. Robust Aerial Robot Swarms Without Collision Avoidance[J]. IEEE Robotics andAutomation Letters, 2018, 3(1): 596-603.
- [11] WEINSTEIN A, CHO A, LOIANNO G, et al. Visual Inertial Odometry Swarm: An Autonomous Swarm of Vision-Based Quadrotors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 1801-1807.
- [12] ZHOU X, ZHU J C, ZHOU H Y, et al. EGO-Swarm: A Fully Autonomous and Decentralized Quadrotor Swarm System in Cluttered Environments[C]//International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2021.
- [13] ZHOU X, WEN X Y, WANG Z P, et al. Swarm of micro flying robots in the wild[J]. Science Robotics, 2022, (66)7: 1-17.
- [14] 马鸣宇, 董朝阳, 马思迁, 等. 基于 SO(3)的多四旋翼无人机编队协同控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1229-1238.
- [15] FU X W, PAN J, WANG H X, et al. A formation maintenance and reconstruction method of UAV swarm based on distributed control[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 104(4): 105981.
- [16] 刘金龙, 张泽旭, 徐田来, 等. 基于自适应通信拓扑的无人机集群弱路径约束下的分布式控制器设计[J]. 宇航学报, 2022, 43(5): 665-674.
- [17] AGRAWAL A, GUPTA A, BHOWMICK J, et al. A Novel Controller of Multi-Agent System Navigation and Obstacle Avoidance[J]. Procedia Computer Science, 2020, 171(C): 1221-1230.
- [18] SCHILLING F, LECOEUR J, SCHIANO F, et al. Learning Vision-based Flight in Drone Swarms by Imitation[C]//International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2019.
- [19] 费思远, 鲜斌, 王岭. 基于群集行为的分布式多无人机编队动态避障控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(1): 1-11.
- [20] 张令, 段海滨, 雍婷, 等. 于寒鸦配对交互行为的无人机集群编队控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(2): 391-397.

(上接第 69 页)

参考文献:

- [1] 毛龙灿, 杨南. 基于大数据背景的皮革人才培养优化研究[J]. 中国皮革, 2021, 50(9): 38-41.
- [2] 杨涛. 互联网时代下皮革行业电商物流体系研究分析[J]. 中国皮革, 2021, 50(8): 82-85.
- [3] 钟建棚, 余少锋, 廖崇阳, 等. 基于云计算的电力设备智能监测系统[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 37-41.
- [4] 谢可, 余晗, 郝艳亚, 等. 基于可信数据的综合能源交易系统设计与实现[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(10): 44-48.
- [5] 王柯元, 于雷, 颜拥, 等. 基于区块链的电力数据资产化及交易系统设计与实现[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 166-173.
- [6] 杨文涛, 文福拴, 张显, 等. 基于有机朗肯循环系统的分布式多能源交易机制[J]. 电力建设, 2019, 40(12): 11-21.
- [7] 谭期文, 覃健荣, 梁盛盛, 等. 基于区块链的电力市场交易系统设计与实现[J]. 电力学报, 2021, 36(5): 466-474.
- [8] 张国潮, 王瑞锦. 基于门限秘密共享的区块链分片存储模型[J]. 计算机应用, 2019, 39(9): 2617-2622.