

基于注意力机制的无人机集群协同分群控制算法

任双,周洁,高嵩,陈超波

(西安工业大学电子信息工程学院,陕西西安 710021)

摘要: 针对基于避碰、组队和聚集规则的无人机集群无法响应部分感知引起的多重刺激问题,本文提出一种基于注意力机制的无人机集群协同分群控制算法. 为确保无人机对邻居信息的高效选择,文中考虑视线遮挡因素设计感知规则,然后引入注意力机制计算交互邻居中无人机对局部群体有序性的贡献;为解决多重刺激下无人机决策冲突的问题,文中设计一种基于注意力机制的状态转换模型,特别地设计亚激活状态计算刺激源的动态权重,以提高集群响应多重刺激的灵敏度;为实现无人机对目标持续准确的跟踪,基于无人机的运动状态确定运动策略,然后调整运动模型;通过仿真分析集群响应多重刺激时运动轨迹和运动方向的变化过程,并利用应激精度、子群序参量和分群耗时对分群运动过程进行分析. 仿真结果表明:所提算法使无人机集群在5 s左右即可完成分群运动,实现对刺激快速准确的跟踪.

关键词: 无人机集群;部分感知;多重刺激;注意力机制;状态转换;动态权重

基金项目: 陕西省技术创新引导专项(基金)计划项目(No.2022QFY01-16);陕西省重点研发计划项目(No.2021GY-067)

中图分类号: TP301.6;V249.121 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)07-1898-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221378

Cooperative Fission Control Algorithm of UAV Swarm Based on Attention Mechanism

REN Shuang, ZHOU Jie, GAO Song, CHEN Chao-bo

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: Aiming at the problem that unmanned aerial vehicle (UAV) swarm based on separation, alignment and cohesion rules cannot respond to multiple stimuli caused by partial perception, a cooperative fission control algorithm of UAV swarm based on attention mechanism is proposed. In order to ensure the efficient selection of neighbor information by UAV, the perception rule is designed considering the sight occlusion factor, and then the attention mechanism is introduced to calculate the contribution of UAV to the orderliness of local group in interactive neighbors. To solve the problem of UAV decision conflict under multiple stimuli, a state transition model based on attention mechanism is designed. In particular, the sub-activation state is designed to calculate the dynamic weight of stimulus source, so as to improve the sensitivity of swarm response to multiple stimuli. To achieve continuous and accurate tracking of the target by UAV, the motion strategy is determined based on the motion state of UAV, and then the motion model is adjusted. The changes process of motion trajectory and movement direction of the swarm in response to multiple stimuli is analyzed by simulation, and the process of fission motion is analyzed by stress precision, subgroup order parameter and fission time. The simulation results show that the proposed algorithm enables the UAV swarm to complete the fission motion in about 5 s, and realize fast and accurate tracking of stimuli.

Key words: UAV swarm; partial perception; multiple stimuli; attention mechanism; state transition; dynamic weight

Foundation Item(s): Shaanxi Province Technology Innovation Guidance Special (Fund) Program Project (No.2022QFY01-16); Shaanxi Province Key Research and Development Project (No.2021GY-067)

1 引言

无人机集群是利用信息感知与共享完成复杂任务

的智能系统^[1,2],其具有成本低、效率高等优点,因此在目标跟踪、搜索救援等领域被广泛应用^[3-5]. 部分感知

能力指集群中每个无人机传感器的感知范围有限,因此刺激出现时集群中仅有少部分个体可以感知到刺激信息,这种由部分感知引起的多重刺激问题受到众多学者的关注.多重刺激在无人机集群的运动过程中普遍存在,其核心是集群协同控制^[6-8].无人机集群的协同行为包括组群运动和分群运动,组群运动指在某区域随机分布的群体可以避碰、聚集且以编队形式执行任务;分群运动指集群在刺激作用下分裂成多个子群.由于组群运动^[9-11]会弱化和抵消多重刺激,因此关于分群运动^[12-16]的研究至关重要.

当前,分群运动的研究尚处于起步阶段.雷小康等^[17]利用邻居位置信息确定跟随目标,完成多目标的分群运动,但仅实现了等规模分群;刘明雍等^[18]引入信息熵计算邻居信息耦合度,以完成分群控制,但只能实现对称刺激的分群运动;杨盼盼等^[19]将个体与方向变化最大的邻居进行组队,实现机器人集群的分群运动,但组队可能存在冲突;高振龙等^[20]通过位置与速度调节引力系数以改变个体受到的作用力,该方法可以减少边界振荡且实现分群,但个体确定目标时只考虑了距离;杨盼等^[21]基于领导跟随法提出了事件驱动下的有限时间分群控制算法,但若领航者出现故障,跟随者将无法执行跟随任务;李成凤等^[22]将集群运动模型与蚁群算法相结合,以实现期望子群规模的分群运动,但易陷入局部最优.

针对上述仅能实现对称刺激的分群、响应速度慢及分群效率低等问题,本文提出一种基于注意力机制的无人机集群协同分群控制算法(Cooperative Fission Control Algorithm based on Attention Mechanism, AMCFCA).基于感知规则引入注意力机制计算无人机对局部群体有序性的贡献,确保无人机对邻居信息的高效选择;基于注意力机制设计状态转换模型,增加亚激活状态保证决策冲突的无人机快速确定跟随目标;不同运动状态采取不同运动策略,然后根据策略调整运动模型,使其快速准确地响应目标,实现分群运动;通过对不同集群规模和刺激数量的仿真,验证算法的可行性和时效性.

2 问题描述

部分感知使集群中仅有少部分无人机可以获取刺激信息,其余无人机通过信息感知与共享获得刺激信息.本文将能获取刺激信息的无人机称为信息个体,其余无人机为非信息个体.

集群在刺激影响下,可能出现信息个体运动方向不一致的情况,即感知到多重刺激^[14,17-22]:信息个体的运动方向不一致,且偏离集群当前运动方向;信息个体的数量远小于集群规模.

图1描述了两个刺激引发分群运动的过程,图1(a)中信息个体感知到刺激,其运动方向发生变化,图1(b)中刺激通过信息个体传播,感知到信息个体异常运动的邻居产生跟随运动,未感知到的邻居保持当前运动方向,然而,刺激传播过程中,集群中存在决策冲突的无人机,即该无人机不确定跟随哪个信息个体,此时需根据规则确定其跟随目标,使其完成对目标的跟随.

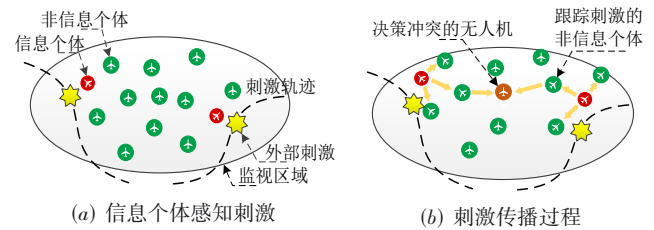


图1 分群运动过程

3 感知规则

个体间的有效通信是信息传递与决策的基础,本文考虑视线遮挡因素设计感知规则.

假设集群中无人机的位置集合为 $\{(x, y)\} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$, dis 表示无人机的感知范围.

为确定无人机 i 的交互邻居,首先,计算感知范围内无人机 i 的邻居集合 T ,即

$$T = \left\{ j \mid \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq dis, j = 1, 2, \dots, N \right\} \quad (1)$$

其次,将无人机 i 周围区域均分为 m_r 个扇形子区间,确定邻居集合 T 在子区域 l 内的子集 T_l ,即

$$T_l = \left\{ \frac{2\pi}{m_r} l - \frac{2\pi}{m_r} \leq T < \frac{2\pi}{m_r} l, l = 1, 2, \dots, m_r \right\} \quad (2)$$

最后,找子集 T_l 内与无人机 i 距离最小的个体作为子区域 l 的交互邻居 n_l ,即

$$n_l = \left\{ q \mid q = \arg \min \left(\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right), j \in T_l \right\} \quad (3)$$

各子区域的交互邻居组成无人机 i 的交互邻居集合 N_i ,即

$$N_i = \{n_l, l = 1, 2, \dots, m_r\} \quad (4)$$

4 基于注意力机制的无人机集群运动模型

4.1 注意力机制

注意力机制包括刺激驱动和任务驱动,其中刺激驱动可由自信息最大化描述,因此忽略任务驱动时,注意力机制更关注有序集群中的无序无人机和无序集群

中的有序无人机这两种自信息较大的无人机. 所谓有序特指集群中所有无人机的运动方向和速率趋于一致,反之为无序^[11,14].

对于无人机 i , 其交互邻居集合为 N_i , 则由自信息可得无人机 $k(k \in N_i)$ 对局部群体 N_i 有序性的贡献为

$$Z_{ik}^{\text{exci}} = -\log_2 p(F=f_k), k \in N_i \quad (5)$$

其中, F 表示交互邻居的运动方向属性, f_k 为无人机 k 的运动方向.

4.2 基于注意力机制的状态转换模型设计

根据无人机对交互邻居有序性的贡献判断其是否注意到邻居的异常运动, 将无人机的运动状态分为未激活状态、亚激活状态和激活状态, 如表 1 所示. 其中未激活状态表示无人机未感知到周围邻居的异常运动, 该状态下无人机保持当前运动方向; 亚激活状态表示无人机感知到周围邻居的异常运动, 该状态下无人机确定跟随目标, 使注意力集中于跟随目标; 激活状态表示跟随目标已确定, 该状态下无人机通过调整运动模型完成对目标的跟踪.

亚激活状态是介于未激活状态和激活状态之间的一种状态, 相较于未激活状态, 传感器的待机模式可以减少无人机对刺激的反应时间; 相较于激活状态, 传感器的待机模式可以减少系统能耗.

表 1 无人机的运动状态

| state | 运动状态 | 动作 | 传感器模式 |
|-------|-------|----------|-------|
| 0 | 未激活状态 | 保持当前运动方向 | 休眠模式 |
| 1 | 亚激活状态 | 确定跟随目标 | 待机模式 |
| 2 | 激活状态 | 跟踪目标 | 工作模式 |

4.2.1 加入亚激活状态的状态转换模型

为避免多重刺激下无人机频繁响应刺激、决策冲突等问题, 设计状态转换模型, 如图 2 所示.

若无人机 i 处于未激活状态, 只有当交互邻居 N_i 中存在无人机 k_1, k_2, \dots, k_r (其对应的刺激源为 $\text{stim}_1, \text{stim}_2, \dots, \text{stim}_r$) 对交互邻居有序性的贡献大于等于阈值 δ_1 , 才认为无人机 k_1, k_2, \dots, k_r 携带的信息具有传播性, 此时无人机 i 由未激活状态转为亚激活状态. 计算无人机 i 与刺激源 $\text{stim}_1, \text{stim}_2, \dots, \text{stim}_r$ 运动方向的残差, 根据残差值确定跟随目标 fol_i , 目标确定后, 无人机 i 由亚激活状态转为激活状态, 完成对目标的跟踪, 跟踪过程中不会响应新的刺激, 只有当无人机 i 与其对应刺激源 stim 运动方向的残差值小于阈值 δ_2 时, 其状态由激活状态转为未激活状态, 才可以响应新的刺激.

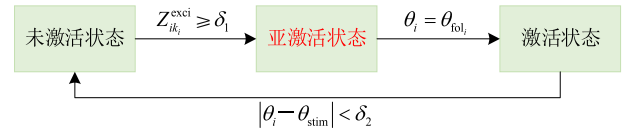


图 2 状态转换图

4.2.2 亚激活状态下无人机确定跟随目标

无人机 i 实时接收邻居信息, 并计算残差:

$$d = \theta_i - \theta_k \quad (6)$$

其中, θ_i 为无人机 i 的运动方向, θ_k 为交互邻居 N_i 中无人机 k 的运动方向.

无人机 i 的跟随目标 fol_i 从交互邻居 N_i 中选取. 若残差值只有一种, 无人机 i 选取感知范围内具有异常运动且距离最近的邻居作为跟随目标 fol_i ; 若残差值有两种, 选取规则为

$$\text{fol}_i = \left\{ j \mid \min_{j \in m_{s_w}} s_{ij} \right\} \quad (7)$$

其中, s_{ij} 为无人机 i 与 j 的欧式距离, m_{s_w} 为动态权重最大的刺激源 s_w 对应的异常运动邻居集合.

$$s_w = \left\{ k \mid \max_{k \in s_q} G_k \right\} \quad (8)$$

其中, s_q 表示刺激源 q , G_k 用来描述刺激源 k 的动态权重, 计算公式为

$$G_k = \frac{|m_k| n \left(\sum_{k \in s_q} \sum_{u=1}^{m_k} (\theta_k^u - \theta_{\text{stim}}^k)^2 \right)}{c_u} \quad (9)$$

其中, m_k 为交互邻居 N_i 中刺激源 k 对应的异常运动邻居集合, n 为跟踪刺激源 k 的无人机数量, θ_k^u 为交互邻居 N_i 中刺激源 k 对应的异常运动邻居 u 的运动方向, θ_{stim}^k 为刺激源 k 的运动方向, c_u 为交互邻居 N_i 中刺激源 k 对应的异常运动邻居的数量.

4.3 运动状态驱动的分群运动模型

基于注意力机制设计状态转换模型, 增加亚激活状态使无人机将注意力集中于跟随目标, 实现无人机集群的分群运动.

分群运动模型中无人机 i 的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}}_i = \boldsymbol{v}_i \\ \dot{\boldsymbol{v}}_i = \boldsymbol{a}_i \\ m \boldsymbol{a}_i = \boldsymbol{F}_i^{\text{pos}} + \boldsymbol{F}_i^{\text{vel}} + \boldsymbol{\zeta}_i \\ \boldsymbol{F}_i^{\text{pos}} = \boldsymbol{F}_i^{\text{coh}} + \boldsymbol{F}_i^{\text{sep}} \\ \boldsymbol{F}_i^{\text{vel}} = \mu_1 \boldsymbol{F}_i^{\text{dir}} + \mu_2 \boldsymbol{F}_i^{\text{spe}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\boldsymbol{p}_i, \boldsymbol{v}_i$ 及 \boldsymbol{a}_i 分别为无人机 i 的位置、速度及加速度, $\boldsymbol{\zeta}_i$ 为无人机 i 受到的随机噪声, m 为无人机的质量, μ_1, μ_2

分别为速度方向的调节因子、速度大小的调节因子, F_i^{pos} 为无人机 i 受到的位置协同力, 包括聚集力 F_i^{coh} 和分离力 F_i^{sep} , F_i^{vel} 为无人机 i 受到的速度协同力, 包括速度方向 F_i^{dir} 和速度大小 F_i^{spe} .

其中, F_i^{coh} 、 F_i^{sep} 、 F_i^{dir} 及 F_i^{spe} 分别为

$$F_i^{\text{coh}} = \frac{\mu_c}{|h_i|} \sum_{j \in h_i} X_c^{ij} s_{ij} \quad (11)$$

$$F_i^{\text{sep}} = \frac{\mu_s}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} X_s^{ij} s_{ij} \quad (12)$$

$$F_i^{\text{dir}} = \frac{\sum_{j \in h_i} \mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{\left\| \sum_{j \in h_i} \mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i \right\|} \quad (13)$$

$$F_i^{\text{spe}} = \sum_{j=1}^{h_i} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i \quad (14)$$

其中, μ_c 、 μ_s 分别为聚集系数、分离系数, v_i 为无人机 i 的速率, s_{ij} 为归一化后无人机 i 与 j 的相对距离, h_i 为 F_i^{coh} 、 F_i^{dir} 及 F_i^{spe} 的邻居集合, $\text{state}_i = 0$ 时, h_i 为交互邻居 N_i ; $\text{state}_i = 2$ 时, h_i 为跟随目标 fol_i . X_c^{ij} 、 X_s^{ij} 分别为无人机 i 受到无人机 j 的聚集力、分离力, X_c^{ij} 可表示为

$$X_c^{ij} = \begin{cases} e^{-\frac{(s_{ij} - D_0)^2}{\sigma^2}}, & s_{ij} \leq D_0 \\ 1, & s_{ij} > D_0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, D_0 为机间不碰撞的最小距离. 该模型遵循近距排斥、远距吸引规则, 即 X_c^{ij} 增大时 X_s^{ij} 减小.

上述分群运动模型亦适用于组群运动, 即随机分布的无人机通过与邻居间的位置协同力和速度协同力可以完成组群运动.

5 模型评价

采用应激精度、子群序参量及分群耗时分析无人

机集群的分群运动特性.

(1) 应激精度: 表征集群中无人机的运动方向与刺激信息方向的偏差大小, 即

$$\kappa = \frac{\gamma - \gamma_0}{1 - \gamma_0} \quad (16)$$

其中, γ 、 γ_0 表示为

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max \left(\frac{1 + \theta_i \cdot \theta_{\text{stim}}^{s_q}}{2} \right) \quad (17)$$

$$\gamma_0 = \max \left(\frac{1 + \theta_{\text{first}} \cdot \theta_{\text{stim}}^{s_q}}{2} \right) \quad (18)$$

其中, θ_i 为无人机 i 的运动方向, $\theta_{\text{stim}}^{s_q}$ 为刺激源 q 的运动方向, θ_{first} 为无人机未感知刺激前的运动方向.

(2) 子群序参量: 表征子群中无人机运动方向的一致性, 即

$$\phi = \frac{1}{n_i} \left\| \sum_{k=1}^{n_i} \mathbf{v}_k \right\| \quad (19)$$

其中, n_i 为子群 i 的规模, \mathbf{v}_k 为无人机 k 的速度.

(3) 分群耗时: 集群分群过程所需的时间, 即

$$\eta = t - t_c \quad (20)$$

其中, t 为分群完成时间, t_c 为集群中信息个体感知到刺激的时间.

6 仿真分析

6.1 集群组群运动

为验证本文模型的组群运动特性, 假设集群规模 $N=20$, 集群中无人机初始位置在半径为 10 的圆形区域内随机选取, 初始速度 $\mathbf{v}_0 = (v_{x0}, v_{y0})$, 其中, $v_{x0}, v_{y0} \in [-10, 10]$, 组群运动结果如图 3 所示.

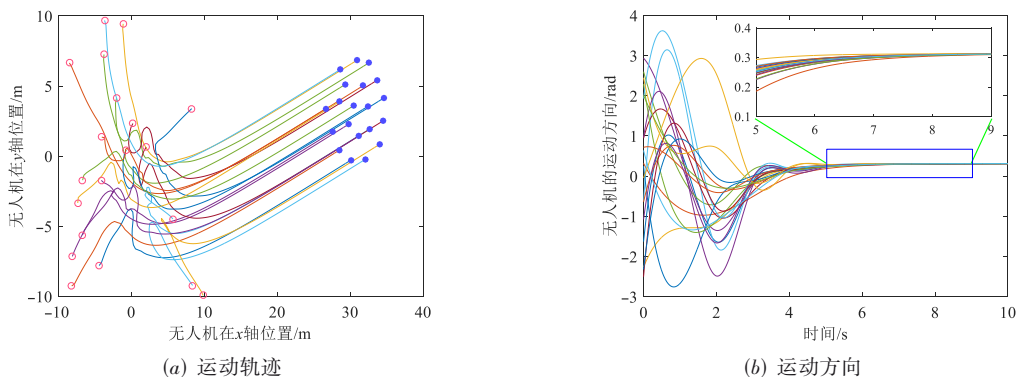


图3 组群运动

图 3 为组群运动的运动轨迹与运动方向变化曲线, 图 3(a) 中, “o” 表示无人机的初始位置, “•” 表

示无人机的终点位置, 位置和速度随机分布的无人机通过与交互邻居间的作用力即可完成组群; 由图

3 (b) 知, 5 s 左右集群中无人机的运动方向趋于一致.

6.2 集群跟踪多重刺激

组群完成后, 无人机 i 的速度 $v_i=v$, 其中

$i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 运动方向 $\theta_i=\theta$, 且处于未激活状态 $state_i=0$. 假设 $t=15$ s 时刺激 A 和 B 作用于不同的信息个体, 其中刺激 A 的方向为 $\theta+\pi/4$, 刺激 B 的方向为 $\theta+(-\pi/4)$, 分群运动结果如图 4 所示.

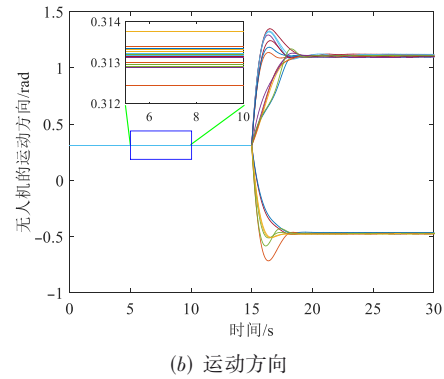
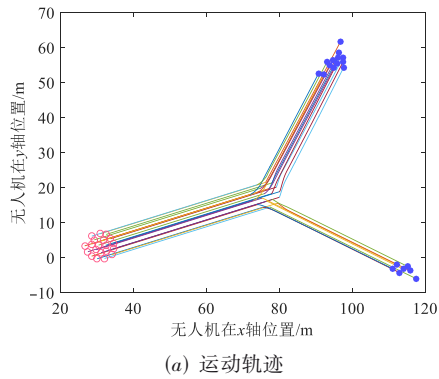


图 4 分群运动

图 4 为分群运动的运动轨迹与运动方向变化曲线, 由图 4(a) 知, 集群感知到刺激 A 和 B 时, 刺激通过信息个体在集群内传播, 无人机根据选取规则确定跟踪目标, 集群产生分群运动; 由图 4(b) 知, 信息个体在 $t=15$ s 时感知到刺激 A 和 B , 集群开始分裂为两个子群, 20 s 左右时子群内无人机的运动方向趋于一致, 分群运动完成.

6.3 分群算法的有效性验证

为验证算法的有效性, 将集群规模增加到 50, 刺激源增加为 3 个, 验证集群分群运动.

集群中无人机的初始位置在半径为 25 的圆形区域内随机选取, 初始速度 $v_0=(v_{x0}, v_{y0})$, 其中, $v_{x0}, v_{y0} \in [-15, 15]$, 组群和分群运动结果如图 5 所示.

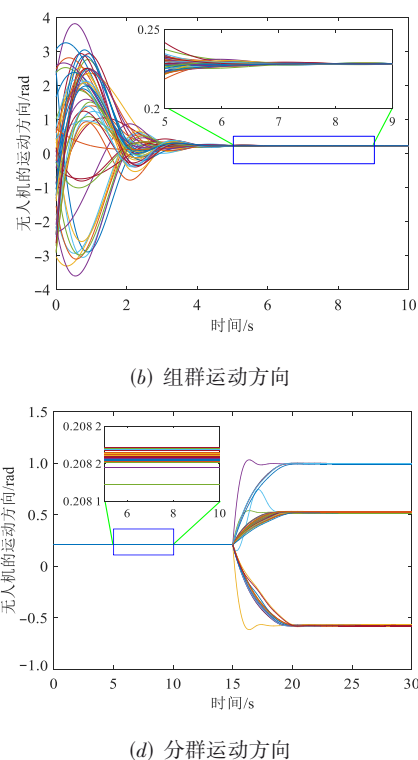
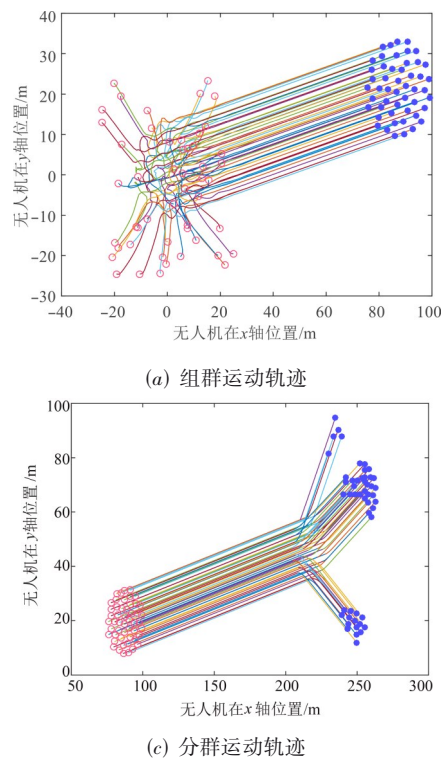


图 5 组群和分群运动

从图 5 可以看出,位置和速度随机分布的无人机 5 s 左右即可完成组群,信息个体在 15 s 感知到刺激时,无人机根据选取规则确定跟随目标,20 s 左右时集群完成分群.

综上,本文算法亦适用于大规模、多个刺激的无人机集群,因此,本文算法下的无人机集群不仅可以提高

完成任务的效率,还可以增强对环境的适应能力.

6.4 参数分析与算法对比

6.4.1 参数分析

采用应激精度、子群序参量和分群耗时分析无人机集群分群运动的运动特性,如图 6 所示.

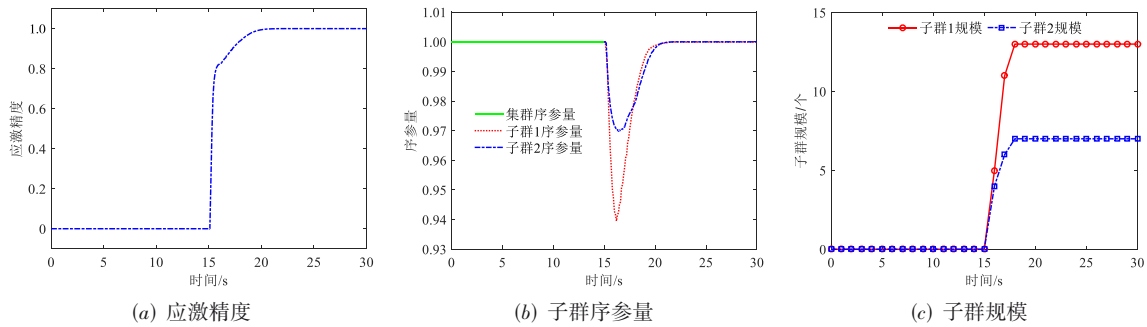


图 6 参数指标

图 6(a)为应激精度,0~15 s 未感知刺激时,应激精度为 0,当 15 s 刺激出现后,应激精度逐渐增大,20 s 左右时集群完成分群,即集群内无人机与刺激源的运动方向趋于一致.

图 6(b)为子群序参量,0~15 s 未感知刺激时,集群中无人机的运动方向保持一致,当 15 s 刺激出现后,子群序参量先减小后增大,20 s 左右时集群完成分群,即子群中无人机的运动方向趋于一致.

图 6(c)为子群规模,子群 1 规模为 13,子群 2 规模为 7.

基于上述,集群的分群耗时为 5 s 左右.

6.4.2 算法对比

从应激精度和子群序参量对 AMCFCA 和传统分群算法(Fission Control Algorithm for Tradition, TFCA)进行对比,为确保实验的有效性和可靠性,设置不同刺激源在两种算法下完成分群运动,如图 7 所示.

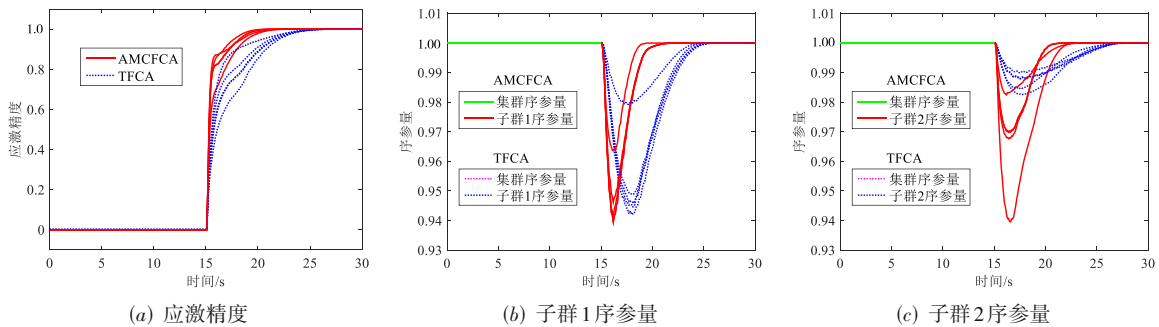


图 7 参数对比

从图 7 可以看出,AMCFCA 的应激精度比 TFCA 增长快,且序参量收敛快.对于 AMCFCA,20 s 左右时即可完成分群,对于 TFCA,25 s 左右时才可以完成分群.因此,相较于 TFCA,AMCFCA 可以快速准确地响应多重刺激,实现分群运动.

7 结论

针对无人机集群响应多重刺激的问题,本文提出

一种基于注意力机制的无人机集群协同分群控制算法.引入注意力机制计算交互邻居中无人机对局部群体有序性的贡献,以确定无人机的运动状态.未激活状态的无人机保持当前运动方向;亚激活状态的无人机根据选取规则确定跟踪目标;激活状态的无人机完成对目标的跟踪.仿真结果表明,本文算法使无人机集群在 5 s 左右即可完成对多重刺激的响应,实现集群的分群运动.

参考文献

- [1] 李鹏举, 毛鹏军, 耿乾, 等. 无人机集群技术研究现状与趋势[J]. 航空兵器, 2020, 27(4): 25-32.
LI P J, MAO P J, GENG Q, et al. Research status and trend of UAV swarm technology[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(4): 25-32. (in Chinese)
- [2] 柳强, 何明, 刘锦涛, 等. 无人机"蜂群"的蜂拥涌进行为识别与抑制机理[J]. 电子学报, 2019, 47(2): 374-381.
LIU Q, HE M, LIU J T, et al. A mechanism for identifying and suppressing the emergent flocking behaviors of UAV swarms[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(2): 374-381. (in Chinese)
- [3] 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.
QIU H X, DUAN H B. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(3): 317-322. (in Chinese)
- [4] HUANG F, LI G X, WANG H C, et al. Navigation for UAV pair-supported relaying in unknown IoT systems with deep reinforcement learning[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(3): 416-429.
- [5] 段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 17-25.
DUAN H B, LI P. Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(7): 17-25. (in Chinese)
- [6] LUO Q N, DUAN H B. Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical strategies[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 70: 257-264.
- [7] CHEN M, DAI F, WANG H B, et al. DFM: A distributed flocking model for UAV swarm networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 69141-69150.
- [8] 高杨, 李东生, 柳向. 无人机集群协同态势觉察一致性评估[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 190-196.
GAO Y, LI D S, LIU X. UAV swarm cooperative situation perception consensus evaluation[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 190-196. (in Chinese)
- [9] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [10] DONG J G, HA S Y, JUNG J, et al. On the stochastic flocking of the cucker: Smale flock with randomly switching topologies[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2020, 58(4): 2332-2353.
- [11] 李沛, 段海滨. 一种基于注意力机制的群集运动模型[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(9): 1040-1050.
LI P, DUAN H B. A flocking model base on selective attention mechanism[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019 49(9): 1040-1050. (in Chinese)
- [12] CHEN Z F, LIAO H M, CHU T G. Clustering in multi-agent swarms via medium-range interaction[J]. Europhysics Letters, 2011, 96(4): 40015.
- [13] 杨盼盼, 刘明雍, 雷小康, 等. 群集系统分群行为建模与控制研究进展[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 193-206.
YANG P P, LIU M Y, LEI X K, et al. Progress in modeling and control of fission behavior for flocking system[J]. Control and Decision, 2016, 31(2): 193-206. (in Chinese)
- [14] 雷小康. 从组群到分群: 自组织群集运动的理论建模与分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
LEI X K. From Grouping to Grouping: Theoretical Modeling and Analysis of Self-organizing Group Movement[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)
- [15] LIU Y Y, SLOTINE J J, BARABÁSI A L. Controllability of complex networks[J]. Nature, 2011, 473(7346): 167-173.
- [16] 李成凤, 张阳伟, 邵俊倩, 等. 多智能体群集系统分群行为研究进展[J]. 电光与控制, 2022, 29(6): 62-67, 92.
LI C F, ZHANG Y W, SHAO J Q, et al. Progress on fission behavior for multi-agent flocking system[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(6): 62-67, 92. (in Chinese)
- [17] 雷小康, 刘明雍, 杨盼盼. 基于邻域跟随的群集系统分群控制算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 741-745.
LEI X K, LIU M Y, YANG P P. Fission control algorithm for swarm based on local following interaction[J]. Control and Decision, 2013, 28(5): 741-745. (in Chinese)
- [18] 刘明雍, 雷小康, 杨盼盼, 等. 基于信息耦合度的群集系统自组织分群方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 271-276.
LIU M Y, LEI X K, YANG P P, et al. Information coupling degree based approach for self-organized fission behavior in flocking system[J]. Control and Decision, 2015, 30(2): 271-276. (in Chinese)
- [19] 杨盼盼, 刘明雍, 雷小康, 等. 基于自组织结对行为的群集机器人分群控制方法[J]. 西北工业大学学报, 2015,

33(1): 147-152.

YANG P P, LIU M Y, LEI X K, et al. A novel fission control method for swarm robots based on self-organized pairwise interaction behavior[J]. Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(1): 147-152. (in Chinese)

- [20] 高振龙, 丁勇, 何金. 注意力跟随机制与 IAP 法相结合的多智能体运动控制[J]. 电光与控制, 2020, 27(3): 58-64.

GAO Z L, DING Y, HE J. Multi-agent movement control combining attention-following mechanism with IAP method[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(3): 58-64. (in Chinese)

- [21] 杨盼, 毕文豪, 张安. 基于事件驱动的多智能体有限时间分群一致控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2925-2933.

YANG P, BI W H, ZHANG A. Finite-time group consensus for second-order multi-agent systems with event-triggered control[J]. Control and Decision, 2022, 37(11): 2925-2933. (in Chinese)

- [22] 李成凤, 邵俊倩, 张阳伟. 基于蚁群算法的群集系统协同分群控制方法[J]. 控制工程, 2021, 28(11): 2215-2222.

LI C F, SHAO J Q, ZHANG Y W. Cooperative fission control method for flocking system based on ant colony algorithm[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(11): 2215-2222. (in Chinese)



高 嵩 男, 1966 年 3 月出生于陕西省西安市. 主要研究方向为智能控制、检测技术、自动化控制系统及其应用. 中国电子学会会员编号: E190084914M.

E-mail: gaos@xatu.edu.cn



陈超波 男, 1978 年 7 月出生于浙江省宁波市. 主要研究方向为智能控制、分数阶系统、故障诊断与容错控制.

E-mail: chenchao@xatu.edu.cn

作者简介



任 双 女, 1998 年 5 月出生于陕西省咸阳市. 主要研究方向为无人机集群协同控制.

E-mail: hyrenshuang@163.com



周 洁(通讯作者) 女, 1985 年 4 月出生于河北省邢台市. 主要研究方向为复杂系统网络控制、类生物集群协同控制与决策. 中国电子学会会员编号: E190067223M.

E-mail: zhoujie@xatu.edu.cn