仿狼群狩猎空间交互机制的无人机集群合围控制

张岱峰¹, 段海滨^{1,2*}, 范彦铭³

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院仿生自主飞行系统研究组, 北京 100083;

2. 鹏城实验室, 深圳 518000;

3. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035

* E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2021-01-27; 接受日期: 2021-05-08; 网络版发表日期: 2021-07-30

科技创新2030“新一代人工智能”重大项目(编号: 2018AAA0102403)、国家自然科学基金(批准号: U20B2071, 91948204, U1913602, U19B2033)和航空科学基金(编号: 20185851022)资助项目

摘要 感知范围受限下的无人机集群合围控制不同于传统意义上的集群协同控制问题. 受限于感知距离, 集群拓扑结构无法始终保证全局拓扑的连通性. 尽管人工势场控制模型通过引入吸引与排斥作用提供了一种可能的解决途径, 但其理想的节点探测能力要求并不符合实际过程. 当集群处于信号干扰下的任务环境中时, 部分节点甚至会丧失探测能力, 需要依赖相邻节点形成稳定合围, 导致集群会自发形成功能强弱不同的异构子群. 狼群是一种典型的机会主义捕食群体, 擅长依靠团队协作捕获猎物, 在狩猎过程中具有明显的空间布局和交互行为特征. 结合实证数据分析, 提出了一种分层结构的狼群交互动力学模型, 利用空间概率分布实现分层交互势场的自适应强度调节. 进一步地, 基于狼群交互动力学模型, 结合一种层次目标观测器, 提出了一种无人机集群异构合围控制策略, 通过对异构子群进行分层布局和交互强度调节, 强化异构节点的交互作用, 以提升感知受限条件下的集群合围控制鲁棒性. 仿真结果表明, 在部分节点出现探测失效的情况下, 所提算法保持了较好的合围编队稳定性, 同时对机载感知能力的要求相对更低, 因而可适用于较为恶劣的任务环境.

关键词 无人机集群, 合围控制, 狼群智能, 交互势场, 感知受限

1 引言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)集群是由一组以高规模形式聚集、互补互通的无人机所组成的群集系统, 可承担传统意义上单一飞行器无法涉及的任务层次^[1-3]. 分布式作战被认为是未来战争的典型作战样式, 诸如美军相继提出的拒止环境协同作战^[4]、进攻性蜂群使能战术^[4]、马赛克战^[5]等项目或作战概念.

编队合围是集群协同作战的一种典型形式, 通过将敌方目标包围在特定圆域内^[6], 对目标实施干扰、引导或阻击, 从而降低其威胁能力.

尽管合围控制问题在多智能体协调控制领域已得到广泛研究, 但任务环境的不确定性、合围过程中可能出现的失效和中断等未知因素仍旧是其亟待解决的主要难点. 传统合围控制方法按照不同约束条件可分为基于连通拓扑的一致性控制^[7-12]与人工势场^[13-17]两

引用格式: 张岱峰, 段海滨, 范彦铭. 仿狼群狩猎空间交互机制的无人机集群合围控制. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1555–1570

Zhang D F, Duan H B, Fan Y M. UAV swarm containment control inspired by spatial interaction mechanism of wolf-pack foraging (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1555–1570, doi: [10.1360/SST-2021-0042](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0042)

类方法。一致性控制方法主要基于固定或连通拓扑结构设计控制律,以求使集群系统能够在有限时间内收敛于相对目标实时位置的期望合围队形,常用于存在模型和环境不确定性的任务环境。Zhang等人^[10]提出了一种分布式异构控制律用于解决目标和控制输入存在未知动态的集群合围,结合一种自适应观测器对目标及输入不确定性进行实时观测和补偿。相似工作可见于文献^[11],采用了一种模糊算法实现对无人艇不确定动态的在线观测。Duan等人^[12]针对合围过程中可能存在的感知传感器失效问题,利用一种切换拓扑策略实现了突发状况下合围编队的稳定保持与重构,有效提升了在不确定环境下的编队控制鲁棒性。然而,一致性算法对全局拓扑结构的依赖性较高,当节点通信距离无法达到控制需求时,全局拓扑的连通性无法保证,一致性算法便失去了应有效能。

相应地,人工势场模型是解决受限通信问题的主要策略,其中以连通保持控制^[13~17]为典型的解决方案。人工势场模型利用相邻节点之间的吸引与排斥作用使彼此之间保持在有效通信范围之内,进而保证网络连通度。文献^[13~15]通过预测代数连通度,并在势场模型中加入连通度约束保证集群通信拓扑的连通性。然而,此类连通保持约束强制将拓扑连通性加入到集群控制会导致与特殊集群队形(例如合围队形)产生矛盾,且连通估计计算负载较重,对个体实时处理能力也提出了较高的要求。Sun等人^[16]提出了一种滑模势场函数以解决存在不确定动态的集群合围控制问题,无需对连通保持进行强制约束,但对节点感知距离要求较高。当探测范围较小或受限时,算法的性能会显著降低。Cong等人^[17]考虑部分节点无感知能力的情况,采用反步法设计了一种集群势场函数实现四轴无人机的目标合围。该方法着重考虑了集群合围过程中可能出现的异构分化问题,但对感知节点的探测能力要求较高,当感知节点出现异常时会影响其工作效能。

综上所述,尽管现有工作对集群分布式合围控制进行了较为广泛而深入的研究,但在以下层面仍存在缺陷。

(1) 探测和通信范围受限情况下,无法保证集群系统合围任务的有效执行;

(2) 当集群部分节点出现探测失效,进而形成有效和失效两类异构子群情况下,无法保证失效子群的合围控制鲁棒性。

为解决上述问题,失效节点需要依赖相邻的有效节点增强其环境适应性并维护合围编队稳定性。自然界中的生物群集能够自发构成特有的运动模式,涌现出协调有序的群体智能^[18,19]。狼群是一类高度社会化、组织严密的生物群体,作为一种典型的机会主义捕食者,善于采取团队协作提高捕食成功率^[20]。实证分析已得出狼群捕食过程在空间分布方面具有明显的统计特性^[21~24]。Cozzi等人^[23]通过定位项圈及摄像机捕捉等方式对非洲土狼在猎物尸体附近的空间分布情况进行了实证研究,得出了以猎物为局部中心的分层布局。Schlägel等人^[24]结合资源选择函数(resource selection function, RSF)与空间分布特征对狼群在领地附近的捕食和移动策略进行了建模,通过与实证数据的对比验证了理论模型的高逼真程度。Escobedo等人^[25]则通过构建吸引-排斥交互势场对狼群狩猎过程进行了仿真,通过设定不同参数得出了狼群的空间分层布局条件。上述研究揭示了狼群狩猎过程会呈现出一定的空间分层交互特性,并提供了RSF、交互势场等理论工具对狼群狩猎过程的交互行为进行分析和建模。分层布局与交互作用本质是一种异构群集捕食作用的结果,不同能力的个体分布于猎物周围的不同层次,通过相互协作提高群体杀伤率并防止猎物逃逸。因此,这种分层交互特性在很大程度上与集群异构合围控制的目标相一致。借鉴狼群狩猎空间交互机制,能够为集群合围控制提供有效的解决方法。然而,利用此类仿生机制解决无人机集群异构合围控制的相关研究较为罕见,文献^[25]给出了一种模拟狼群围捕行为的同构智能体协调控制方法,但其对个体的感知能力要求极高,需要全域内的感知距离,且未考虑异构属性,故在实际任务环境中应用受限。

本文针对感知受限及部分节点探测失效条件下的无人机集群异构合围控制问题,提出一种仿狼群狩猎机制控制策略。通过建立和映射狼群交互动力学模型,给出一种集群分层控制律,利用空间概率分布实现对分层交互作用的自适应调节,以提升异构集群的合围控制鲁棒性。论文贡献可概括如下。

(1) 通过实证分析,建立了一种基于狩猎空间分布与分层交互势场的狼群交互动力学模型;

(2) 给出了一种层次化目标状态观测器,用于异构集群中探测失效节点的目标跟踪与合围;

(3) 通过狼群机制映射,提出了一种无人机集群异

构合围控制策略, 结合分层布局及势场强度的自适应调节, 增强异构节点的交互作用, 以提升感知受限下的无人机集群合围控制鲁棒性.

2 问题描述

2.1 无人机运动模型

考虑每架无人机均配置了马赫数、航向和高度镇定自动驾驶仪, 由指令到动作存在一定响应时间, 则无人机集群满足以下运动模型^[1,2]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = V_i \cos \chi_i, \\ \dot{y}_i = V_i \sin \chi_i, \\ \dot{z}_i = \lambda_i, \\ \dot{V}_i = \frac{1}{\tau_V} (V_i^c - V_i), \quad V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, \\ \dot{\chi}_i = \frac{1}{\tau_\chi} (\chi_i^c - \chi_i), \quad \frac{n_{\min} g}{V_i} \leq \dot{\chi}_i \leq \frac{n_{\max} g}{V_i}, \\ \dot{\lambda}_i = \frac{1}{\tau_z} (z_i^c - z_i) - \frac{1}{\tau_\lambda} \lambda_i, \quad \text{s.t.} \quad \lambda_{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max}, \\ i \in \{1, \dots, N\}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, N 为无人机数量; x_i, y_i, z_i 为第 i 架无人机的三维位置; V_i, χ_i, λ_i 为其水平空速、航向角与上升速度; $V_{\min}, V_{\max}, n_{\min}, n_{\max}, \lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ 分别为水平空速、横向过载与上升速度限制范围; $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度; V_i^c, χ_i^c, z_i^c 为空速、偏航与高度指令; $\tau_V, \tau_\chi, \tau_z, \tau_\lambda$ 分别为自驾仪速度、偏航、高度与升速响应时间.

注1 本文涉及的无人机模型工作环境不需要产生高机动动作, 自驾仪控制飞行动作的响应时间变化较小, 故认为自驾仪具有固定控制时延, 在此设为定常响应时间.

2.2 控制指令转换

式(1)一般需要经过指令转换通过将自驾仪指令转为等效二阶积分器指令方可用于设计集群系统控制律. 这里给出以下控制指令转换器^[2], 用于将二阶系统控制量转换为自驾仪三通道指令:

$$\begin{bmatrix} V_i^c \\ \chi_i^c \\ z_i^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_V (u_{i,x} \cos \chi_i + u_{i,y} \sin \chi_i) \\ \tau_\chi (u_{i,y} \cos \chi_i - u_{i,x} \sin \chi_i) / V_i \\ \tau_z \lambda_i / \tau_\lambda + \tau_z u_{i,z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_i \\ \chi_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}_i = (u_{i,x}, u_{i,y}, u_{i,z})^T$ 为第 i 架无人机的等效二阶积

分器系统控制量. 同理, 得到如下转换关系可将自驾仪指令转为二阶系统控制量:

$$\begin{bmatrix} u_{i,x} \\ u_{i,y} \\ u_{i,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \chi_i & -\sin \chi_i & 0 \\ \sin \chi_i & \cos \chi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_V} (V_i^c - V_i) \\ \frac{V_i}{\tau_\chi} (\chi_i^c - \chi_i) \\ \frac{1}{\tau_z} (z_i^c - z_i) - \frac{1}{\tau_\lambda} \lambda_i \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.3 异构合围控制问题

定义1 具有有限探测距离的无人机称为有效无人机, 否则不具备探测能力, 称为无效无人机.

定义2 设无人机运动满足式(1), 具有最大通信距离 r_c . 给定一组由 N 个节点构成的无人机集群, 包括 N_L 个有效节点及 N_F 个失效节点. 设有效节点探测距离为 r_d , 令 $\mathbf{p}_* = (x_*, y_*, z_*)^T$, $\mathbf{v}_* = (v_{*,x}, v_{*,y}, v_{*,z})^T$ 及 $\mathbf{u}_* = (u_{*,x}, u_{*,y}, u_{*,z})^T$ 分别为相应对象的三维位置、速度和加速度矢量. 若存在目标 P 满足以下运动规则:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_P = \mathbf{v}_P, \\ \dot{\mathbf{v}}_P = \mathbf{u}_P, \end{cases} \quad (4)$$

则合围控制需设计一种集群控制器使以下结论成立:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i(t) &= \rho_i^*, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\varphi_i(t) - \varphi_j(t)| &= \delta_{ij}^*, \quad \forall j \in N_i^*, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (z_i(t) - z_P(t)) &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_P(t) &= \mathbf{0}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ρ_i 和 φ_i 分别表示第 i 架无人机相对目标的径向距离和方位角(如图1所示), 且有

$$\begin{aligned} \rho_i &= \sqrt{(x_i - x_P)^2 + (y_i - y_P)^2}, \\ \varphi_i &= \arctan \left(\frac{y_i - y_P}{x_i - x_P} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, ρ_i^* 表示第 i 架无人机的期望合围半径; δ_{ij}^* 表示相邻节点 i 与 j 关于目标水平方位的期望角间距; $N_i^* = \{j | \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| \leq r_c^* \leq r_c\}$ 表示无人机 i 的有效邻居集合, r_c^* 表示无人机 i 的期望通信距离.

注2 定义1描述了一组由 N_L 个有效节点和 N_F 个失效节点组成的异构无人机集群. 除探测能力的区别外,

图1 (网络版彩图)稳定条件下的无人机集群包围水平视角显示

Figure 1 (Color online) Horizontal view of stable UAV swarm enclosing.

异构属性还体现在通信关系的选择上, 即两类子群可存在不同的有效通信范围. 这里定义 r_c^L 和 r_c^F 分别为有效与失效节点的期望通信距离, 同理 N_i^L 和 N_i^F 分别为有效与失效节点的邻居集合. 此外, 无人机可分布于不同圆周, 形成分层包围. 如图1所示, 节点 i_1 与 j_1 、 i_2 与 j_2 分别位于同一圆周, 但 i_1 与 i_2 不在同一圆周, 其包围半径与角距离也不尽相同. 由于存在失效子群, 即使起始拓扑连通, 在运动过程中仍有可能会出现拓扑变化及个体脱离的情况, 故提升系统整体的鲁棒性是本文涉及的关键问题.

式(5)的包围控制条件表明, 每架无人机需与目标保持相同高度, 这里给出以下高度保持控制器:

$$u_{i,z} = K_1(\hat{z}_p^{(i)} - z_i) + K_2(\hat{v}_{p,z}^{(i)} - v_{i,z}), \quad (7)$$

式中, $\hat{z}_p^{(i)}$ 、 $\hat{v}_{p,z}^{(i)}$ 分别表示无人机 i 对目标高度和垂向速度观测值, 通过后续目标观测器获得; $K_1, K_2 > 0$ 为高度控制增益.

3 狼群狩猎空间交互机制

3.1 实证数据分析

根据文献[22]中公开的狼群狩猎过程原始数据(<https://doi.org/10.5061/dryad.78kn3>), 分析狼群狩猎过程的空间分布与交互关系. 图2(a)给出了其中三只狼

以及附近猎物尸体的空间位置分布. 选择个体1在某时段内的位置数据进行分析, 分别计算其位置散点相对最近一处猎物位置的相对位置, 并采用 50×50 网格对相关区域进行处理以统计在每一网格内的个体出现次数. 在此基础上, 采用Kriging插值法求取个体在连续空间内的出现概率, 得到如图2(b)所示的空间概率分布, 其中黑色散点表示该时段个体的采集数据.

由图2结果可见, 狼群会在猎物周围形成以猎物为中心的包围空间布局, 即不同个体相对猎物的出现位置频率存在差别, 故个体之间在狩猎阶段可能存在一定分层交互特性. 为进一步研究这种交互机制, 文献[24,25]分别提供了两种方法用于描述个体的移动

图2 (网络版彩图)实证数据及关联狼群空间位置分布特征. (a) 三组个体及猎物尸体的空间位置分布; (b) 个体1某时段的空间概率分布

Figure 2 (Color online) Empirical data and the associated spatial distribution pattern of wolves. (a) Spatial distribution of three wolves and prey carcasses; (b) probability distribution of the 1st wolf at a time interval.

行为. 下面利用这两种方法对本组狼群的移动策略及其交互特性进行建模.

3.2 空间分布下的狼群移动策略

首先, 利用文献[24]中的资源选择函数进行狼群移动策略选择. 考虑以下条件概率:

$$P(\mathbf{x}_i | \mathbf{x}_{i-1}) = \frac{k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i-1})w(F(\mathbf{x}_i))}{\sum_{\mathbf{z} \in \Omega_G(\mathbf{x}_{i-1})} k(\mathbf{z}, \mathbf{x}_{i-1})w(F(\mathbf{z}))}, \quad (8)$$

式中, $\mathbf{x}_i$ 表示 t 时刻个体位置; $P(\mathbf{x}_i | \mathbf{x}_{i-1})$ 表示个体由前一时刻位置向下一时刻位置移动的选择概率; $\Omega_G(\mathbf{x}_{i-1})$ 表示下一时刻可选择的移动网格集合, 这里采用周围 5 m 以内的网格坐标; $k(x, y)$ 表示位移核函数, 满足以下 Weibull 分布:

$$k(x, y) = \frac{c}{\zeta} \left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|}{\zeta} \right)^{c-1} \exp \left\{ - \left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|}{\zeta} \right)^c \right\}, \quad (9)$$

式中, $c = 0.5$ 和 $\zeta = 1$ 分别为形状参数和比例参数. $w(F(\mathbf{x}_i))$ 为关于个体位置的 RSF, 且有

$$w(F(\mathbf{x}_i)) = \frac{1}{1 + \exp \{-\beta_1 P_o(\mathbf{x}_i) - \beta_2 \mathbf{x}_{\text{prey}}\}}, \quad (10)$$

式中, $F(\mathbf{x}_i)$ 表示影响下一时刻位置选择的客观因素集合, 包括空间概率分布 $P_o(\mathbf{x}_i)$ 和猎物位置 $\mathbf{x}_{\text{prey}}$, 相邻个体的位置分布暂不考虑; β_1, β_2 分别为两种因素的权重系数, 其由实证数据样本构建下列函数的极大似然估计得到.

$$L(\beta_1, \beta_2) = \prod_{i \in \Omega_S} P(\mathbf{x}_{t_i} | \mathbf{x}_{t_{i-1}}, \beta_1, \beta_2), \quad (11)$$

式中, Ω_S 为实证数据的序列集合. 式(10)表明, 因素的权重系数越大, RSF 对相应因素的选择依赖性越强. 选择个体 1 的数据样本计算得到 $\beta_1 = 2.12$, $\beta_2 = 1.51$. 图 3 给出了在式(8)移动策略规则下, 个体 1 的 100 步仿真轨迹. 可见在空间概率分布作用下, 个体会向出现概率较高的区域移动. 这种移动倾向性可认为是狼群-猎物交互作用的体现, 而空间概率分布则作为交互作用强度的调节依据. 由于不同个体相对猎物的空间布局存在差异, 故狼群会形成以猎物为中心的分层包围. 同理, 上述方法可用于构建不同个体的交互作用, 进而建立狼群交互动力学模型.

3.3 狼群交互动力学模型

文献[25]通过构建狼群与猎物之间的吸引-排斥关系给出了一种狼群狩猎运动模型, 且通过调节种群规模与构型参数得到了分层围捕的空间布局. 然而, 该方法设想的捕猎环境较为单一, 尚未考虑个体之间的能力差异, 且个体感知范围也过于理想, 故只能作为一种初步的狼群机制模型. 如图 4 所示, 不同于文献[25], 这里除考虑狼群-猎物的交互作用外, 补充了不同包围层个体之间的交互作用, 并通过空间概率分布对交互作用进行自适应调节, 得到以下狼群交互动力学模型:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_i = & -\alpha_1(F(\mathbf{x}_i)) \sum_{j \in S_i \cap N_i} \nabla \psi_\alpha^{S_i}(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|) \\ & -\alpha_2(F(\mathbf{x}_i)) \sum_{j \in S_i \cap N_i} \nabla \psi_\beta^{S_i}(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|) \\ & -\alpha_3(F(\mathbf{x}_i)) \nabla \psi_\gamma^{S_i}(\|\mathbf{x}_{\text{prey}} - \mathbf{x}_i\|), \end{aligned} \quad (12)$$

图 3 (网络版彩图)空间概率分布作用下的个体 1 仿真轨迹
Figure 3 (Color online) Simulation trajectory of agent 1 under the effect of the spatial probability distribution.

图 4 (网络版彩图)狼群狩猎空间交互作用示意图
Figure 4 (Color online) Illustration of the spatial interaction effect in wolf-pack foraging.

式中, $\mathbf{f}_i$ 表示个体 i 的移动作用力; $\mathbf{x}_i$ 表示位置矢量; $S_i, \bar{S}_i$ 分别表示与 i 同层、不同层的个体集合; N_i 为其邻居集合; $\psi_a^{S_i}, \psi_\beta^{S_i}, \psi_\gamma^{S_i}$ 分别表示 S_i 内部个体之间、 S_i 个体与异层个体以及猎物之间的交互势场, 用于生成个体间的吸引排斥作用; ∇ 表示梯度运算符; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别表示对应交互势场强度, 且满足

$$\alpha_*(F(x)) = K_{a_*} \frac{w_*(F(x))}{\sum_z w_*(F(z))}, \quad (13)$$

$$\alpha_* \in \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}, w_* \in \{w_1, w_2, w_3\},$$

式中, w_* 表示不同交互势场对应的RSF, 受期望空间布局影响; $K_{a_*} > 0$ 为最大作用强度. $\psi_a^{S_i}, \psi_\beta^{S_i}, \psi_\gamma^{S_i}$ 具有相同的结构属性, 均有以下基本性质:

- (1) $\psi_*^{S_i}(x)$ 在 $(0, \infty)$ 上正定且连续可微;
- (2) $\psi_*^{S_i}(x)$ 在 $(0, r)$ 上存在唯一的极小值点 d ;
- (3) $\psi_*^{S_i}(x) = c_0 > \psi_*^{S_i}(d), \forall x \in (r, \infty)$;
- (4) 若存在 $x_1 \neq x_2 \in (0, r)$, 使 $\psi_*^{S_i}(x_1) \leq \psi_*^{S_i}(x_2)$, 则

$$|\nabla \psi_*^{S_i}(x_1)| \leq |\nabla \psi_*^{S_i}(x_2)|.$$

上述条件表明, 狼群交互势场利用截止点 r 限定交互作用距离, 利用极小点 d 生成个体相对猎物及相邻个体的吸引与排斥作用, 引导形成期望的集群构型. 而性质4则表明, 交互势场在有效作用范围内为平滑凸函数, 其梯度变化由边界向极值点逐渐减弱. 上述交互势场促使不同能力的个体分布在以猎物为中心的不同距离层次, 形成分层合围结构. 通过引入分层交互作用, 提升弱势个体对强势个体的依赖, 进而充分配合强势个体对猎物形成有效合围. 此外, 势场强度会依据期望构型的空间分布特性实现自适应调节, 以拓展交互势场的作用距离及强度, 从而增强个体间的交互作用, 提升系统鲁棒性.

4 基于狼群交互动力学的无人机合围控制

4.1 层次目标状态观测器

在2.3节的问题描述中, 仅有部分节点具备有限探测能力, 为形成有效合围, 需要设计一种目标观测器以使失效节点能够及时跟踪合围目标. 这里给出以下层次目标状态观测器, 为无人机集群提供目标观测和

引导:

$$\begin{cases} \hat{X}_{P,i} = X_P, & \rho_i \leq r_d \text{ and } i \in \Omega_L, \\ \hat{X}_{P,i} = \sum_{j \in N_i} \beta_{ij}(t) a_{ij}(\mathbf{p}) (\hat{X}_{P,j} - \hat{X}_{P,i}), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (14)$$

式中, X_P 与 $\hat{X}_{P,i}$ 分别为目标 P 的真实状态和第 i 架无人机的目标观测状态, X_P 可代表三维位置、速度以及加速度等元素; Ω_L 表示有效无人机集合; $\mathbf{p} = \{\mathbf{p}_i | i = 1, \dots, N\}$ 表示集群位置的堆叠矢量; a_{ij} 表示当前时刻下集群空间拓扑邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 第 i 行 j 列元素, 其满足

$$a_{ij}(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1, & j \in N_i(\mathbf{p}), \\ 0, & j \notin N_i(\mathbf{p}), \end{cases} \quad (15)$$

式中, $N_i = \{j | \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| \leq r_c\}$ 表示无人机能够接收的最大范围邻居集合; $\beta_{ij}(t)$ 为自适应收敛系数, 其值越大, 则目标观测器对相邻无人机 j 的观测依赖性越强. 对任意 $j \in N_i$, 其更新过程满足

$$\beta_{ij}(t) = \begin{cases} \beta \frac{\exp(-h_j(t)^\eta)}{\sum_{k \in N_i, h_k(t) \neq \infty} \exp(-h_k(t)^\eta)}, & h_i(t) \neq \infty, \\ \beta, & h_i(t) = \infty, \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\beta > 0$ 为固定增益系数, β 越大, 则观测器收敛速度越快; $h_i \in \mathbb{Z}^+$ 表示无人机 i 的状态观测层级, 初始值为无穷大; $\eta > 1$ 为固定系数. 状态观测层级体现了无人机获取有效目标信息的即时性, h 越小表示获取目标信息的路径越短, 即时性越高. 规定任意有效无人机的观测层级均为1, 图5给出了一种确定无人机观测层级的迭代算法, 其中 C_i 表示无人机 i 邻居节点的观测层级集合.

对于上述层次目标状态观测器, 以下结论成立.

引理1 对任意失效节点 $i \in \Omega_F$, Ω_F 为失效无人机集合, 若以下条件成立, 则目标观测器(14)可收敛于真实状态.

(1) 在每个时段 $[t_k, t_{k+1})$, $k = 1, 2, \dots$, 总存在一条由无人机 i 到有效无人机的连通路径;

(2) 目标运动状态不存在瞬时突变, 即在每个时段, 有 $\dot{X}_P \rightarrow 0$.

图 5 迭代算法确定无人机目标观测层级

Figure 5 Iterative algorithm to determine the hierarchy levels of UAVs.

证明 由于每时段总存在一条由失效节点到有效节点的连通路程, 因此可将当前时刻的集群通信拓扑分解为若干彼此独立的连通拓扑子图, 每个子图中至少包含一架有效无人机. 设 M, N_F, M_n 分别为子图数量、失效节点数量和第 n 个子图中的失效节点数量. 不失一般性, 设无人机按升序排列依次形成 M 个子图, 且令 $1, \dots, M_1$ 为子图 1 中的失效无人机编号, $M_{n-1}+1, \dots, M_n$ 为子图 n 中的失效无人机编号. 定义 $\bar{\mathbf{X}}_F = [\bar{X}_{F,i} | i \in \Omega_F] \in \mathbb{R}^{N_F}$ 为所有失效节点按照编号排序形成的堆叠目标观测矢量, 则有

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_F = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{L}}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \tilde{\mathbf{L}}_M \end{pmatrix} \bar{\mathbf{X}}_F + \begin{pmatrix} \tilde{d}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \tilde{d}_{N_F} \end{pmatrix} (X_P \mathbf{1}_{N_F} - \bar{\mathbf{X}}_F), \quad (17)$$

式中, $\tilde{\mathbf{L}}_n$ 表示子图 n 中前 M_n 架失效无人机组成连通子图的加权 Laplace 矩阵. 令 $\tilde{a}_{ij} = \beta_{ij}(t) a_{ij}(\mathbf{p})$, 则 $\tilde{\mathbf{L}}_n$ 可表

示为

$$\tilde{\mathbf{L}}_n = \begin{pmatrix} \sum_{j \in N_{M_{n-1}+1}} \tilde{a}_{M_{n-1}+1,j} & \cdots & -\tilde{a}_{M_{n-1}+1,M_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\tilde{a}_{M_n,M_{n-1}+1} & \cdots & \sum_{j \in N_{M_n}} \tilde{a}_{M_n,j} \end{pmatrix}.$$

对于元素 $\tilde{d}_i$, 有

$$\tilde{d}_i = \sum_{j \in N_i \setminus N_F} \beta_{ij}(t) a_{ij}(\mathbf{p}).$$

向量 $\mathbf{1}_m$ 表示长度 m 的全 1 矢量, 对任意 Laplace 矩阵 $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 有 $\mathbf{L} \mathbf{1}_m = \mathbf{0}$. 令 $\tilde{\mathbf{L}} = \text{diag}\{\tilde{\mathbf{L}}_n\}$, $\tilde{\mathbf{D}} = \text{diag}\{\tilde{d}_i\}$, 则式(17)可等效为

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_F = (\tilde{\mathbf{L}} + \tilde{\mathbf{D}})(X_P \mathbf{1}_{N_F} - \bar{\mathbf{X}}_F).$$

令 $\tilde{\mathbf{X}}_F = \bar{\mathbf{X}}_F - X_P \mathbf{1}$, 由于每时段 $\dot{X}_P \rightarrow 0$, 故误差向量 $\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_F = -(\tilde{\mathbf{L}} + \tilde{\mathbf{D}})\tilde{\mathbf{X}}_F$. 对于连通子图, 其 Laplace 矩阵总为半正定, 又因为 $\beta_{ij} > 0$, 故 $\tilde{\mathbf{L}}$ 也为半正定. 由于每架失效无人机至少存在一条路径抵达有效节点, 故 $\tilde{d}_i > 0$, $\tilde{\mathbf{D}}$ 为正定矩阵. 经上述分析可知, 误差 $\tilde{\mathbf{X}}_F$ 渐进收敛于零, 故对任意失效节点 $i \in \Omega_F$, 式(14)最终收敛于真实目标状态, 引理证毕.

注 3 失效节点到有效节点的路径长度是影响上述目标观测器的主要因素, 路径越短, 目标状态的传播途径延迟越小, 失效无人机具有更大的概率跟上目标的变化行迹. 该观测器通过确定各机的观测层级关系, 使每架无人机在更新目标观测状态时侧重于提高对有效邻居的依赖, 促使集群整体响应更为快速, 即使在跟踪高速目标时也具有一定优势.

4.2 狼群机制映射与集群合围控制律设计

将第 3 节中的狼群机制映射到无人机集群合围控制可分为三步实现. 首先, 将无人机集群按照探测能力分为有效和失效两类子群, 并分别布置在以目标为中心的 2 层合围圆周上, 即规划异构集群期望编队构型. 其次, 将式(12)的狼群交互动力学模型对应到每架无人机的等效二阶系统控制量, 并结合期望编队构型和对势函数基本性质实例化交互势场函数 $\psi_a^{S_i}, \psi_\beta^{S_i}, \psi_\gamma^{S_i}$. 最后, 结合期望构型, 设计无人机集群相对目标中心的

空间概率分布 P_o , 进而配置交互势场强度 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 以实现依空间布局的自适应调节。

下面着重介绍狼群交互动力学与无人机集群包围控制的对应关系, 由于已采用式(7)的高度控制器进行了目标高度跟踪, 在此主要考虑二维平面的包围布局。定义上标 Δ 表示由三维矢量衍生的水平方向二维矢量, 如 $\mathbf{p}_i^\Delta = (x_i, y_i)^\top$ 表示无人机 i 的水平位置矢量。考虑异构子群 Ω_L 和 Ω_F , 使其分布于不同圆周, 其在狼群交互动力学中对应于不同包围层的个体集合。定义 ψ_α^L 和 ψ_α^F 分别表示实例化后的有效和失效子群同构交互势场, ψ_γ^L 和 ψ_γ^F 分别为实例化后对应子群相对目标的交互势场, ψ_β^L 和 ψ_β^F 分别为实例化后对应子群相对异构子群的交互势场, 且 $\psi_\beta^L = \psi_\beta^F$ 。则根据式(12), 给出以下异构包围控制律:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^\Delta &= -\sigma_u(\sigma_1(\Gamma_{L,i}) + \sigma_2(\mathbf{v}_i^\Delta - \hat{\mathbf{v}}_{P,i}^\Delta)), \quad i \in \Omega_L, \\ \Gamma_{L,i} &= \alpha_1^L(F(\mathbf{p}_i^\Delta)) \sum_{j \in N_i^L} \nabla \psi_\alpha^L(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|) \\ &\quad + \alpha_2^L(F(\mathbf{p}_i^\Delta)) \sum_{j \in \Omega_F \cap N_i} \nabla \psi_\beta^L(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|) \\ &\quad + \alpha_3^L(F(\mathbf{p}_i^\Delta)) \nabla \psi_\gamma^L(\|\hat{\mathbf{p}}_{P,i}^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^\Delta &= -\sigma_u(\sigma_1(\Gamma_{F,i}) + \sigma_2(\mathbf{v}_i^\Delta - \hat{\mathbf{v}}_{P,i}^\Delta)), \quad i \in \Omega_F, \\ \Gamma_{F,i} &= \alpha_1^F(F(\mathbf{p}_i^\Delta)) \sum_{j \in N_i^F} \nabla \psi_\alpha^F(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|) \\ &\quad + \alpha_2^F(F(\mathbf{p}_i^\Delta)) \sum_{j \in \Omega_L \cap N_i} \nabla \psi_\beta^F(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|) \\ &\quad + \alpha_3^F(F(\mathbf{p}_i^\Delta)) \nabla \psi_\gamma^F(\|\hat{\mathbf{p}}_{P,i}^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|), \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $\hat{\mathbf{p}}_{P,i}^\Delta, \hat{\mathbf{v}}_{P,i}^\Delta$ 分别表示无人机 i 关于目标相应状态的观测值; $\alpha_1^*, \alpha_2^*, \alpha_3^*$ 分别为对应类型的交互势场强度, 由式(13)给出, 其影响因素为空间概率分布 P_o , 且 $\alpha_2^L = \alpha_2^F$ 。 $\psi_\alpha^*, \psi_\beta^*, \psi_\gamma^*$ 实例化采用文献[26]中的平滑对势函数, 其极小值和截止点由期望队形决定, 图6给出了该对势函数的一种可能形式。 $\sigma_u, \sigma_1, \sigma_2$ 分别为关于有界约束 (L, M) 的饱和函数^[27], 用于确保控制输入限制在可行区间内, 其具有以下性质:

- (1) σ 为连续、非递减函数, 且 $L \leq M$;
- (2) $s\sigma(s) > 0, s \neq 0$;

图6 实例化对势函数的典型形状特性

Figure 6 Typical characteristics of the instantiated pairwise potential function.

$$(3) \sigma(s) = s, |s| \leq L;$$

$$(4) |\sigma(s)| \leq M, \forall s \in \mathbb{R}.$$

对于式(1)所示的无人机模型, 受空速、侧向加速度及上升速度等状态约束影响, 需要对自驾仪控制输入进行限幅。由式(3)可知, 自驾仪控制输入与等效二阶控制量 $\mathbf{u}$ 存在方位角变换。为得到饱和函数的有效边界, 在模型参数已知的条件下, 可以提取关于 $\mathbf{u}$ 且满足自驾仪约束的最大边界 B_u , 则 σ_u 参数满足 $L_u \leq M_u \leq B_u$ 。函数 σ_1, σ_2 则分别满足 $L_1 \leq M_1 \leq L_u/2, L_2 \leq M_2 \leq L_u/2$ 。定义以下总势场:

$$H(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = Q_L + Q_F + Q_\beta + Q_\gamma^L + Q_\gamma^F + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\hat{\mathbf{v}}_i^\Delta)^\top \hat{\mathbf{v}}_i^\Delta, \quad (20)$$

式中, $\hat{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_p$ 表示无人机 i 相对目标速度的误差矢量; $Q_L, Q_F, Q_\beta, Q_\gamma^L, Q_\gamma^F$ 分别为同构子群、异构子群以及与目标之间的集群交互势场, 其分别满足

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_L} \sum_{j \in \Omega_L \setminus i} \alpha_1^L \psi_\alpha^L(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|), \\ Q_F &= \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_F} \sum_{j \in \Omega_F \setminus i} \alpha_1^F \psi_\alpha^F(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|), \\ Q_\beta &= \sum_{i \in \Omega_L} \sum_{j \in \Omega_F} \alpha_2^L \psi_\beta^L(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|), \\ Q_\gamma^L &= \sum_{i \in \Omega_L} \alpha_3^L \psi_\gamma^L(\|\hat{\mathbf{p}}_i^\Delta\|), \quad Q_\gamma^F = \sum_{i \in \Omega_F} \alpha_3^F \psi_\gamma^F(\|\hat{\mathbf{p}}_i^\Delta\|), \end{aligned} \quad (21)$$

令 $\Gamma_{L,i,t} = \Gamma_{L,i}(\mathbf{p}(t))$, $\Gamma_{F,i,t} = \Gamma_{F,i}(\mathbf{p}(t))$, 对于式(18)和(19)的控制律, 以下结论成立。

定理1 若引理1条件成立, 初始时刻的总势能 $H_0 = H(\mathbf{p}(t_0), \mathbf{v}(t_0))$ 有界且 $\|\Gamma_{L,i,t_0}\| \leq L_1$, $\|\Gamma_{F,i,t_0}\| \leq L_1$, $\forall i \in \{1, \dots, N\}$, 每架无人机通过式(14)观测目标状态, 则对于式(18)和(19)的合围控制律, 下列结论成立.

(1) 集群渐进收敛于一种双层合围编队;

(2) 若 $H_0 < \alpha_{\min}(k_L \psi_a^L(0) + k_F \psi_a^F(0) + k_\beta \psi_\beta^L(0))$ 且 $k_L + k_F + k_\beta \leq k + 1$, $k \in \mathbb{Z}^+$, 则至多存在 k 次无人机相互碰撞, 其中 $\alpha_{\min} = \min\{\alpha_1^L, \alpha_2^L, \alpha_1^F, \alpha_2^F\}$.

证明 根据对势函数的性质3, 同构集群势场 $Q_* \in \{Q_L, Q_F\}$ 可分解为

$$\begin{aligned} Q_* &= \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_*} \sum_{j \in \Omega_* \setminus N_i} \alpha_1^* \psi_a^*(\|r_c^*\|) + \sum_{j \in \Omega_* \cap N_i} \alpha_1^* \psi_a^*(\|\tilde{\mathbf{p}}_i^\Delta - \tilde{\mathbf{p}}_j^\Delta\|) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_*} \sum_{j \in \Omega_* \setminus N_i} \alpha_1^* \psi_a^*(\|r_c^*\|) + \sum_{j \in N_i^*} \alpha_1^* \psi_a^*(\|\tilde{\mathbf{p}}_i^\Delta - \tilde{\mathbf{p}}_j^\Delta\|), \end{aligned}$$

式中, $r_c^* \in \{r_c^L, r_c^F\}$ 和 $\alpha_1^* \in \{\alpha_1^L, \alpha_1^F\}$ 分别为同构集群势场的截止点和对应位置的势场强度. 由于多机之间为双向通信, 邻接拓扑为无向图, 故

$$\begin{aligned} \dot{Q}_* &= \sum_{i \in \Omega_*} \sum_{j \in N_i^L} (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta)^T \alpha_1^* \nabla \psi_a^*(\|\tilde{\mathbf{p}}_i^\Delta - \tilde{\mathbf{p}}_j^\Delta\|) \\ &= \sum_{i \in \Omega_*} (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta)^T \left[\alpha_1^* \sum_{j \in N_i^L} \nabla \psi_a^*(\|\mathbf{p}_i^\Delta - \mathbf{p}_j^\Delta\|) \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

同理,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_\beta &= \sum_{i \in \Omega_L} (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta)^T \left[\alpha_2^L \sum_{j \in \Omega_L \cap N_i} \nabla \psi_\beta^L(\|\mathbf{p}_i^\Delta - \mathbf{p}_j^\Delta\|) \right] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_L} (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta)^T \left[\alpha_2^L \sum_{j \in \Omega_L \cap N_i} \nabla \psi_\beta^L(\|\mathbf{p}_i^\Delta - \mathbf{p}_j^\Delta\|) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_F} (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta)^T \left[\alpha_2^F \sum_{j \in \Omega_L \cap N_i} \nabla \psi_\beta^F(\|\mathbf{p}_i^\Delta - \mathbf{p}_j^\Delta\|) \right], \\ \dot{Q}_\gamma^* &= \sum_{i \in \Omega_*} (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta)^T \alpha_3^* \nabla \psi_\gamma^*(\|\tilde{\mathbf{p}}_i^\Delta\|), \quad Q_\gamma^* \in \{Q_\gamma^L, Q_\gamma^F\}. \end{aligned} \quad (23)$$

根据引理1, 各机关于目标的观测状态有 $\hat{X}_{p,i} \rightarrow X_p$, $\dot{X}_p \rightarrow 0$, 在此认为目标加速度变化较小即 $\mathbf{u}_p \rightarrow 0$. 由

$\|\Gamma_{L,i,t_0}\| \leq L_1$, $\|\Gamma_{F,i,t_0}\| \leq L_1$, 根据饱和函数性质, 有

$$\mathbf{u}_i^\Delta(t_0) = -\Gamma_{*,i,t_0} - \sigma_2(\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta(t_0)), \quad (24)$$

式中, $\Gamma_{*,i,t_0} \in \{\Gamma_{L,i,t_0}, \Gamma_{F,i,t_0}\}$. 考虑式(18)~(24), 得到

$$\begin{aligned} \dot{H}(t_0) &= \dot{Q}_L(t_0) + \dot{Q}_F(t_0) + \dot{Q}_\beta(t_0) + \dot{Q}_\gamma^L(t_0) \\ &\quad + \dot{Q}_\gamma^F(t_0) + \sum_{i=1}^N (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta(t_0))^T \mathbf{u}_i^\Delta(t_0) \\ &= -\sum_{i=1}^N (\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta(t_0))^T \sigma_2(\tilde{\mathbf{v}}_i^\Delta(t_0)). \end{aligned}$$

根据对势函数性质2, 得到 $\dot{H}(t_0) < 0$, 则下一时刻总势能 $H(t_1) < H(t_0)$. 由于 Q_* , Q_β , Q_γ^* 在变量空间不存在额外的局部极小点, 故 $Q_* + Q_\beta + Q_\gamma^*$ 对应减小. 根据对势函数性质4, 易知 $\|\Gamma_{*,i,t_1}\| \leq \|\Gamma_{*,i,t_0}\| \leq L_1$, 由饱和函数性质推出 $\dot{H}(t_1) < 0$, 故以此类推得到 $\dot{H}(t) < 0$. 根据LaSalle不变集定理, 所有初始状态位于集合 $\Omega_H = \{(\mathbf{p}, \mathbf{v}) | H \leq H_0\}$ 内的系统轨迹收敛于最大不变集 $\Theta_H = \{(\mathbf{p}, \mathbf{v}) | \dot{H} = 0\}$, 因此推得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{v}_i^\Delta(t) = \mathbf{v}_p^\Delta(t)$. 对于 Q_* , Q_β , Q_γ^* , 其各自系统解则收敛于全局极小点. 定义 $l_L(\mathbf{p})$, $l_F(\mathbf{p})$ 分别为空间拓扑中有效及失效子群内部未实际连接的有向边数量, 则

$$Q_* = \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_*} \sum_{j \in N_i^*} \alpha_1^* \psi_a^*(\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|) + l_* \alpha_1^* \psi_a^*(r_c^*).$$

对于固定的 $l_* \in \{l_L, l_F\}$, Q_* 在 $\psi_a^* = 0$ 处取得全局极小点. 定义 $d_{ij}^* \in \{d_{ij}^L, d_{ij}^F\}$ 为对势函数 ψ_a^* 的极小点, 且满足

$$d_{ij}^* = 2\rho_i^* \sin(\delta_{ij}^*/2), \quad \forall j \in N_i^*, \quad (25)$$

则相邻无人机的水平间距 $\|\mathbf{p}_j^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|$ 最终收敛于 d_{ij}^* . 根据几何关系, 易知上式满足式(5)中的角位移关系. 同理, 令 ψ_γ^* 的极小点为 ρ_i^* , 由 Q_γ^* 的极小点可以推出无人机相对目标间距收敛于 ρ_i^* . 由于 Q_γ^L 与 Q_γ^F 存在不同极小点, 故无人机集群会形成一种双层合围编队, 结论1成立.

结论2采用反证法. 设 t_1 时刻无人机集群在有效子

群中、失效子群中以及异构交互过程中分别存在 k_L, k_F, k_β 次两两碰撞. 不失一般性, 设每种交互模式下的前 $k_* \in \{k_L, k_F, k_\beta\}$ 架无人机碰撞, 则

$$\begin{aligned} Q_*(t_1) &= \sum_{i=1}^{k_*} \alpha_1^* \psi_\alpha^*(0) \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i>k_*} \alpha_1^* \sum_{j \in N_i^*} \psi_\alpha^* (\|\mathbf{p}_i^\Delta(t_1) - \mathbf{p}_j^\Delta(t_1)\|) \\ &\geq k_* \alpha_{\min} \psi_\alpha^*(0), \quad k_* \in \{k_L, k_F\}, \quad Q_* \in \{Q_L, Q_F\}. \end{aligned}$$

同理, 可得 $Q_\beta(t_1) \geq \sum_{i=1}^{k_\beta} \alpha_2^L \psi_\beta^L(0) \geq k_\beta \alpha_{\min} \psi_\beta^L(0)$. 由于总势场函数单调递减, 故有

$$\begin{aligned} H_0 &\geq Q_L(\mathbf{p}(t_0)) + Q_F(\mathbf{p}(t_0)) + Q_\beta(\mathbf{p}(t_0)) \\ &\geq Q_L(\mathbf{p}(t_1)) + Q_F(\mathbf{p}(t_1)) + Q_\beta(\mathbf{p}(t_1)) \\ &\geq \alpha_{\min} (k_L \psi_\alpha^L(0) + k_F \psi_\alpha^F(0) + k_\beta \psi_\beta^L(0)). \end{aligned}$$

显然与假设相矛盾, 故结论2成立, 定理证毕.

由上述控制器设计与分析可知, 狼群交互动力学与集群合围控制器的映射关系着重考虑了无人机运动特性约束以及交互势场的实例化. 类似狼群相对猎物的空间布局, 无人机集群交互势场的强度调节也受到无人机相对目标中心的空间概率分布 P_o 影响, 在 P_o 较高处容易产生更强的交互作用, 促使集群在期望相对位置附近密集移动, 进而有利于形成稳定合围队形. 由此可见, 映射后的集群系统在满足无人机运动约束和异构分化的前提下, 具有更强的合围控制稳定性.

注4 对于双层合围编队, 考虑到有效无人机在近距常用可见光或红外进行目标观测, 为避免视线受阻, 这里使其分布于内环, 失效无人机在外环. 分层合围能够拉近异构节点交互距离, 促使失效节点加强与有效节点的信息关联, 克服因探测和通信受限而导致的脱队问题, 进而提高系统整体鲁棒性.

注5 定理1表明, 在式(18)和(19)作用下, 无人机集群不会发生距离为零的相互碰撞, 但无法保证固定的安全距离. 为确保一定安全距离, 可将本文所用方法与其他避碰势场相结合, 并限定避碰势场的作用范围. 只要作用范围设定合理, 即可实现安全距离避碰条件下的稳定合围控制.

注6 若要形成均匀的双层合围编队, 同构无人机

之间需要配置相同的 ψ_α^* 极小点. 根据几何关系, 可得同构相邻节点间的期望距离为

$$\begin{aligned} d_{ij}^L &= 2\rho_i^L \sin(\pi/N_L), \\ d_{ij}^F &= 2\rho_i^F \sin(\pi/N_F), \end{aligned} \quad (26)$$

式中, ρ_i^L, ρ_i^F 分别为有效和失效子群合围半径. 异构间距 d_{ij}^β 则与编队构型相关. 根据文献[26]中相关结论, 实例化对势函数的截止点与极小点需要满足 $r/d = 1 + \varepsilon (\varepsilon \ll 1)$ 以保证其稳定达到极小点. 对于合围半径选择, 应保证 $\rho_i^L < \rho_i^F$, 具体设计需参考探测和通信半径等物理约束. 空间概率分布需保证交互强度 $\alpha_1^*, \alpha_2^*, \alpha_3^*$ 在相对目标中心的期望编队位置附近取得概率最大值.

5 仿真分析

选取50架无人机组成合围集群, 其若干配置为 $r_d=110$ m, $V_{\min}=10$ m/s, $V_{\max}=90$ m/s, $n_{\max}=-n_{\min}=6$, $\lambda_{\max}=-\lambda_{\min}=5$ m/s, $\tau_V=\tau_\chi=\tau_z=\tau_a=3$ s初始空速及航向在区间(10, 20)和(0, 2π)内随机选取. 为形成有效编队, 目标机动能力不应高于无人机. 考虑目标具有对抗性, 这里选用文献[28]中的被捕食者逃逸策略作为目标移动规则:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{P,x} \\ u_{P,y} \end{bmatrix} &= \frac{\sigma_a}{|N_\sigma|} \sum_{i \in N_\sigma} \frac{\mathbf{p}_P^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta}{\|\mathbf{p}_P^\Delta - \mathbf{p}_i^\Delta\|} - \mathbf{v}_P^\Delta, \\ u_{P,z} &= v_{\text{ascend}} - v_{P,z}, \end{aligned} \quad (27)$$

式中, $N_\sigma = \{i \mid \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_P\| \leq r_a\}$ 表示目标感知到的无人机集合, $r_a = 100$ m表示目标感知距离; $v_{\text{ascend}}=3$ m/s为目标期望上升速度; $\sigma_a=20+t/20$ 表示目标相对临近无人机的排斥强度. 式(27)会促使目标向集群合围缺口处移动, 尽量躲避无人机的围捕. 此外, 将集群分为3组, 各取20, 20, 10架无人机, 分别对附近3个目标实施合围, 且每组集群具有对等数量的有效与失效无人机. 在狼群机制映射方面, 令实例化对势函数截止点与极小点比例为 $r/d=1.2$. 设集群规模为10和20架的机载最大通信半径分别为75和40 m, 则对于20架规模的无人机集群, 其双层合围编队的参数设置如下:

$$\begin{aligned}
r_c^F &= r_c = 40 \text{ m}, d_{ij}^F = r_c^F / 1.2 = 33 \text{ m}, \\
\rho_i^F &= d_{ij}^F / \left(2 \sin \frac{\pi}{N_F} \right) = 53 \text{ m}, \\
d_{ij}^\beta &= 20 \text{ m}, r_\beta = 1.2 d_{ij}^\beta = 24 \text{ m}, \\
\rho_i^L &= \rho_i^F - d_{ij}^\beta = 33 \text{ m}, \\
d_{ij}^L &= 2 \rho_i^L \sin \frac{\pi}{N_L} = 20 \text{ m}, r_L = 1.2 d_{ij}^L = 24 \text{ m},
\end{aligned} \quad (28)$$

同理, 可得10架集群的编队参数设置. 交互势场强度参数设置为 $\beta_1=2, \beta_2=1, K_{\alpha_1}=K_{\alpha_2}=K_{\alpha_3}=10$, 图7则给出了关于 ψ_α^L 的空间概率分布, 其与有效节点的合围编队布局相一致($\rho_i^L=33 \text{ m}$). 高度控制参数选取 $K_1=K_2=2$, 层次目标观测器参数设为 $\beta=\eta=5$, 对势函数参数设置同文献[26].

给定各机与目标起始位置如图8所示, 对本文所提方法进行仿真测试. 这里额外选取两种相关算法进行对比: 算法A1采用文献[25]中的狼群狩猎行为模型; 算法A2采用文献[17]中的一种连通保持控制器, 该方法考虑了部分无人机无环境感知能力的情况. 为保证两种算法能够适用于仿真场景, 这里规定A1中每架无人机具有覆盖全域的通信距离, 有效无人机具有理想的探测距离, 各机采用式(14)观测目标状态; A2中的有效节点均具有无限探测范围, 且将合围半径和通信半径扩大为100 m. 采用机间最小距离、相对目标距离协方差与机间最小距离协方差对算法的控制效能进行评估, 其中相对目标距离协方差由式(29)给出, 表征各机是否形成稳定的目标合围; 而机间最小距离协方差由式(30)给出, 表征各机在合围圆周上的分布特性.

$$\sigma_\rho = \frac{1}{N_L} \sum_{i \in \Omega_L} (\rho_i - \rho_i^L)^2 + \frac{1}{N_F} \sum_{i \in \Omega_F} (\rho_i - \rho_i^F)^2, \quad (29)$$

$$\sigma_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_{\min,i} - \bar{d}_{\min})^2, \quad (30)$$

$$\text{s.t. } d_{\min,i} = \min_{j \in N_i} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|, \bar{d}_{\min} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{\min,i},$$

式中, $d_{\min,i}$ 表示无人机 i 与相邻无人机的最小间距; $\bar{d}_{\min}$ 表示集群平均最小间距. 对上述算法在相同起始条件下测试得到以下仿真结果(见图9~11).

仿真结果表明, 狼群机制控制律完全形成了对目标的有效合围, 且所需的感知环境条件最为苛刻. 算法A1尽管成功跟踪了逃逸目标, 但机间关系的不确定

图7 (网络版彩图)有效无人机相对目标位置的空间概率分布

Figure 7 (Color online) Spatial probability distributions relative to the target position of the effective UAVs.

图8 (网络版彩图)无人机集群与目标起始位置分布

Figure 8 (Color online) Initial positions of the UAV swarm and the target.

性是其主要缺陷. 即使在理想感知条件下, 算法A1合围精度仍然不如狼群机制. 由图10(a)可知, A1仅考虑了狼群个体相对目标的交互关系, 而对相邻无人机之间的位置关系约束较小, 导致集群在追击过程中难以散开, 只有在精确参数设计下才能形成有效合围. 算法A2则考虑了无人机集群的异构差异, 从图9(c)中可见, 该方法在较为理想的感知条件下能够确保有效无人机对目标的成功合围, 但失效无人机容易出现中途发散或脱队现象, 表明算法的控制鲁棒性相对较弱. 尽管起始时刻每组集群内部的拓扑处于连通状态, 但因为失效节点的存在, 当其与逃逸目标的交互作用逐渐降低时, 即容易出现连通破坏和脱离等失效问题.

图 9 (网络版彩图)三种包围控制算法的无人机集群飞行轨迹对比. (a) 仿狼群机制无人机集群飞行轨迹; (b) 算法A1无人机集群飞行轨迹; (c) 算法A2无人机集群飞行轨迹

Figure 9 (Color online) Comparison of three enclosing control laws on the flight trajectories of UAV swarms. (a) UAV swarm trajectory of the algorithm inspired by wolf pack mechanism; (b) UAV swarm trajectory of the algorithm A1; (c) UAV swarm trajectory of the algorithm A2.

图 10 (网络版彩图) 三种合围控制算法的控制性能对比。(a) 机间最小间距对比曲线; (b) 相对目标距离协方差对比曲线; (c) 机间最小距离协方差对比曲线

Figure 10 (Color online) Comparison of three enclosing control laws on the control performances. (a) Comparison of minimum spacing between UAVs; (b) comparison of relative target distance covariance; (c) comparison of minimum distance covariance between UAVs.

图 11 (网络版彩图) 仿狼群机制控制律集群拓扑连通度变化
Figure 11 (Color online) Connectivity variation of the swarm topologies using the wolf-pack mechanism inspired control law.

而狼群机制控制律通过分层编队构型缩短异构子群之间的交互距离, 并利用空间概率分布对子群之间的交互作用进行有效调节, 增强了失效节点与有效节点的信息关联, 在层次目标观测器作用下确保失效节点对逃逸目标的即时跟踪, 进而提升了合围控制鲁棒性. 图11则给出了三组集群实时拓扑的连通度变化情况, 这里采用即时拓扑Laplace矩阵的次小特征值 λ_2 近似表示^[13,14]. 结果表明, 尽管起始阶段B, C两组20架规模集群的拓扑连通度较弱, 但在狼群机制作用下, 各组利用交互势场和空间分布调节能够迅速形成稳定合围, 进而维持了拓扑连通性. 对于B, C两组集群, 由于 $\lambda_2 < 1$, 稳定后的连通拓扑较为稀疏, 表明狼群机制作用近似形成了一种链式拓扑结构, 这使得合围控制律在感知受限情况下既保持了拓扑连通性, 也对目标形成了有效合围, 因而可适用于较为恶劣的任务环境.

最后, 为进一步分析三种算法在相应环境设置下的任务执行效能, 这里分别在20和50架两种集群规模下各自进行了10次独立测试, 并对合围成功率及任务执行时间进行了统计分析. 合围成功率统计每次测试成功抵达期望合围圆周的无人机数量, 若无人机相对目标的距离误差在10 m以内, 则视为成功抵达. 任务执行时间则统计每次测试中成功抵达合围圆周的无人机平均到达时间. 图12给出了相应测试结果, 显然狼群机制控制律在合围任务成功率上明显优于算法A1和A2, 且执行时间稳定在10~20 s. 算法A1作为早期提出

图 12 (网络版彩图)三种包围控制算法的任务效能对比。(a) 20架集群包围成功率对比; (b) 50架集群包围成功率对比; (c) 20架集群任务执行时间对比; (d) 50架集群任务执行时间对比

Figure 12 (Color online) Comparison of three enclosing control laws on the task efficiencies. (a) Comparison of enclosing success rate using 20 UAVs; (b) comparison of enclosing success rate using 50 UAVs; (c) comparison of task execution time using 20 UAVs; (d) comparison of task execution time using 50 UAVs.

的仿狼群算法,其稳定性和时效性不如所提方法,限制了其在复杂环境和异构集群中的扩展应用;而算法A2尽管时间效率与所提方法相近,但任务成功率明显不足,进一步说明该算法在感知受限条件下只能确保部分有效无人机的成功包围,而失效无人机仍会存在脱队隐患。

6 结论

针对感知受限及部分节点探测故障条件下的无人机集群包围控制问题,借鉴狼群狩猎空间交互机制,提

出了一种无人机集群异构包围控制律。首先,结合实证数据分析,建立了一种狼群交互动力学模型,通过分层包围及空间概率分布增强和协调不同个体之间的交互作用。其次,提出了一种层次目标观测器用于集群对包围目标的稳定追踪。再次,建立了狼群机制与无人机集群包围控制的映射关系,利用狼群交互动力学模型构建无人机集群异构包围控制律,强化异构节点的交互作用,确保失效节点对目标的即时跟踪,以提升系统控制鲁棒性。仿真结果表明,在有限感知环境下所提方法较好地维持了异构集群的稳定性,且对机载感知能力的要求更低,因而适用于较为恶劣的任务环境。

参考文献

- 1 Ren W. On constrained nonlinear tracking control of a small fixed-wing UAV. *J Intell Robot Syst*, 2007, 48: 525–537
- 2 Qiu H, Duan H. A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to UAV distributed flocking among obstacles. *Inf Sci*, 2020, 509: 515–529

- 3 Niu Y F, Liu J Y, Xiong J, et al. Research on guidance method of cooperative tracking ground multi-target using UAV group (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 403–422 [牛轶峰, 刘俊艺, 熊进, 等. 无人机群协同跟踪地面多目标导引方法研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 403–422]
- 4 Duan H B, Shen Y K, Zhao Y J, et al. Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2019 (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2020, 38: 170–187 [段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2019年无人机热点回眸. 科技导报, 2020, 38: 170–187]
- 5 Cheng X. Research into the winning mechanism of mosaic warfare in AI era (in Chinese). *Shipboard Electron Countermeasure*, 2020, 43: 12–15, 25 [程翔. 人工智能时代马赛克战致胜机理研究. 舰船电子对抗, 2020, 43: 12–15, 25]
- 6 Guo J, Yan G, Lin Z. Local control strategy for moving-target-enclosing under dynamically changing network topology. *Syst Control Lett*, 2010, 59: 654–661
- 7 Wang Y W, Liu X K, Xiao J W, et al. Output formation-containment of interacted heterogeneous linear systems by distributed hybrid active control. *Automatica*, 2018, 93: 26–32
- 8 Li D, Zhang W, He W, et al. Two-layer distributed formation-containment control of multiple Euler–Lagrange systems by output feedback. *IEEE Trans Cybern*, 2019, 49: 675–687
- 9 Su H S, Zhang J X, Zeng Z G. Formation-containment control of multi-robot systems under a stochastic sampling mechanism. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 1025–1034
- 10 Zhang Y, Wen Y, Chen G, et al. Distributed adaptive observer-based output formation-containment control for heterogeneous multi-agent systems with unknown inputs. *IET Control Theor Appl*, 2020, 14: 2205–2212
- 11 Peng Z, Jiang Y, Wang J. Event-triggered dynamic surface control of an underactuated autonomous surface vehicle for target enclosing. *IEEE Trans Ind Electron*, 2021, 68: 3402–3412
- 12 Duan H, Zhang D. A binary tree based coordination scheme for target enclosing with micro aerial vehicles. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2021, 26: 458–468
- 13 Fang H, Wei Y, Chen J, et al. Flocking of second-order multiagent systems with connectivity preservation based on algebraic connectivity estimation. *IEEE Trans Cybern*, 2017, 47: 1067–1077
- 14 Choi J, Song Y, Lim S, et al. Decentralized multi-subgroup formation control with connectivity preservation and collision avoidance. *IEEE Access*, 2020, 8: 71525–71534
- 15 Kan Z, Doucette E A, Dixon W E. Distributed connectivity preserving target tracking with random sensing. *IEEE Trans Automat Contr*, 2019, 64: 2166–2173
- 16 Sun C, Hu G, Xie L, et al. Robust finite-time connectivity preserving coordination of second-order multi-agent systems. *Automatica*, 2018, 89: 21–27
- 17 Cong Y, Du H, Jin Q, et al. Formation control for multiquadrotor aircraft: Connectivity preserving and collision avoidance. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2020, 30: 2352–2366
- 18 Duan H B, Qiu H X. Unmanned Aerial Vehicle Swarm Autonomous Control Based on Swarm Intelligence (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制. 北京: 科学出版社, 2018]
- 19 Chen L, Duan H B, Fan Y M. Anatomy of information transfer for Ibis using transfer entropy and active information storage (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 380–388 [陈琳, 段海滨, 范彦铭. 基于传递熵和有效信息存储的隐鹮信息传递过程研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 380–388]
- 20 MacNulty D R, Tallian A, Stahler D R, et al. Influence of group size on the success of wolves hunting bison. *PLoS ONE*, 2014, 9: e112884
- 21 Gable T D, Windels S K, Bruggink J G, et al. Where and how wolves (*Canis lupus*) kill beavers (*Castor canadensis*). *PLoS ONE*, 2016, 11: e0165537
- 22 Dickie M, Serrouya R, McNay R S, et al. Faster and farther: Wolf movement on linear features and implications for hunting behaviour. *J Appl Ecol*, 2017, 54: 253–263
- 23 Cozzi G, Börger L, Hutter P, et al. Effects of trophy hunting leftovers on the ranging behaviour of large carnivores: A case study on spotted hyenas. *PLoS ONE*, 2015, 10: e0121471
- 24 Schlägel U E, Merrill E H, Lewis M A. Territory surveillance and prey management: Wolves keep track of space and time. *Ecol Evol*, 2017, 7: 8388–8405
- 25 Escobedo R, Muro C, Spector L, et al. Group size, individual role differentiation and effectiveness of cooperation in a homogeneous group of hunters. *J R Soc Interface*, 2014, 11: 20140204

- 26 Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Trans Automat Contr*, 2006, 51: 401–420
- 27 Li X M, Chen X J. Flocking control of multiple quadrotor aerial vehicles with bounded input constraints (in Chinese). *Electron Opt Control*, 2020, 27: 105–110 [李晓梅, 陈学军. 有界输入约束下的多四旋翼飞行器群控制. *电光与控制*, 2020, 27: 105–110]
- 28 Muro C, Escobedo R, Spector L, et al. Wolf-pack (*Canis lupus*) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. *Behavioural Processes*, 2011, 88: 192–197

UAV swarm containment control inspired by spatial interaction mechanism of wolf-pack foraging

ZHANG DaiFeng¹, DUAN HaiBin^{1,2} & FAN YanMing³

¹ *Bio-inspired Autonomous Flight Systems Research Group, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;*

² *Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China;*

³ *Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China*

The containment control of unmanned aerial vehicle (UAV) swarms with limited perception ranges is different from the traditional swarm control problem since the communication topology cannot ensure global connectivity all the time due to limited sensing. Although algorithms based on artificial potentials provide possible solutions by introducing attractions and repulsion to maintain the swarm consensus, the regular requirement of perfect target-sensing for all UAV nodes is not feasible in most cases. Specifically, in some mission environments, signal interferences may cause the loss of node detection, and the losers may need the help of adjacent nodes to maintain formation stability, thus leading to spontaneous heterogeneous clusters specified by the functionalities of UAVs. Wolves are typical opportunistic predators that hunt prey by group coordination, whereas the spatial layout and interactive behavioral patterns are specific characteristics in the wolf-pack hunting processes. First, based on the analysis of empirical data, we propose a hierarchical wolf-pack interactive dynamics model, which employs the spatial probability distribution to modulate the strengths of the interactive potentials. Furthermore, we propose a heterogeneous enclosing control law for UAV swarms, which combines interactive dynamics with a hierarchical target observer. Through the hierarchical layout and adaption of interaction strengths, the interaction effects between weak and reliable nodes can be enhanced, which, in turn, improves system robustness under restricted perception abilities. Simulation results show the advantages of the proposed method on the control stability and relaxed demand for airborne sensing with perception limitations and fitness to harsh mission environments.

UAV swarm, containment control, wolf-pack intelligence, interactive potential, limited perception

doi: [10.1360/SST-2021-0042](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0042)