基于群体熵度量的无人机集群目标合围控制

陈琳¹, 郭炳晖^{2,3}, 段海滨^{1,3*}, 吕卫锋⁴

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083;

2. 北京航空航天大学数学科学学院, 北京 100083;

3. 鹏城实验室, 深圳 518055;

4. 北京航空航天大学计算机学院, 北京 100083

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

收稿日期: 2021-07-11; 接受日期: 2021-09-15; 网络版发表日期: 2022-07-28

科技创新2030-“新一代人工智能”重大项目(编号: 2018AAA0102303)和国家自然科学基金项目(批准号: 91948204, U20B2071, U1913602, U19B2033)资助

摘要 针对受限环境中无人机集群的目标合围控制问题, 提出了一种基于局部度量距离交互的分布式集群目标合围控制方法. 首先, 基于局部度量距离交互机制确定了每架无人机的时变邻域无人机集合, 采用光滑成对交互势函数设计了集群内部无人机间的交互势函数、无人机与飞行环境中障碍间的交互势函数以及无人机与目标无人机间的交互势函数. 在此基础上, 基于自组织原则提出了分布式的无人机集群目标合围控制律, 使无人机集群能够以指定环绕半径形成以目标无人机为中心的稳定 α -晶格合围构型, 对目标无人机进行合围和跟踪, 同时使无人机避开飞行环境中的障碍, 保障自身飞行安全. 然后借助Lyapunov稳定性理论证明了集群系统的稳定性, 并给出了集群系统内部无人机发生碰撞的条件以及合围构型参数的取值依据. 此外, 基于群体熵的概念尝试对无人机集群目标合围过程中的自组织水平进行度量. 最后通过仿真来验证所提出算法的有效性.

关键词 无人机集群, 目标合围, 度量距离交互, 晶格合围构型, 群体熵, 自组织

1 引言

近年来, 无人机在军民领域受到了空前的关注并得到了迅速发展. 随着无人机智能化水平的不断提高, 其任务区域逐渐从侦察、监视的安全空域转向打击、对抗等复杂空域, 无人机的应用样式已逐步从单平台向多平台“集群”协同方向发展^[1,2]. 其中, 目标合围是无人机集群协同控制的重要研究方向之一, 它要求一群无人机以预定的半径和相等的角间距离来跟踪和包围

静止或运动的合作目标或非合作目标^[3,4]. 在目标合围任务中, 无人机集群协同控制问题在于设计一种控制方案使无人机集群形成以目标为中心的合围构型. 其中, 目标状态的动态变化、飞行环境的不确定等因素交织在一起, 给无人机集群合围控制带来了巨大的挑战^[5].

目前, 关于集群合围控制问题的研究得到了广泛的关注. 文献^[6]将集群合围控制问题看作是合围点的协同自部署问题, 即单位圆上的覆盖问题, 然后基于一

引用格式: 陈琳, 郭炳晖, 段海滨, 等. 基于群体熵度量的无人机集群目标合围控制. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 177–186

Chen L, Guo B H, Duan H B, et al. Target enclosing control of multiple unmanned aerial vehicles based on crowd entropy (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 177–186, doi: [10.1360/SST-2021-0284](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0284)

致性理论提出了有限时间分布式合围控制协议, 实现了在单位圆上均匀分布的合围控制. 文献[7]针对具有输入干扰的多移动机器人协同目标包围控制问题, 提出了一种动态控制律, 使所有移动机器人能够均匀分布在以目标为中心的圆上, 实现对目标的包围. 文献[8]基于反演控制技术设计了一种基于无向链式通信网络的机器人集群系统的合围控制协议, 实现了对移动目标的合围. 在很多实际应用中, 合围目标的具体信息是无法提前知道的, 且有时候采用全局信息来实现目标合围控制的代价十分昂贵. 因此, 文献[9]考虑目标信息对于某些智能体是未知的, 提出了一种基于有向通信拓扑的动态合围控制协议, 成功实现了对非完整移动小车的动态合围. 文献[10]考虑了合围目标运动速度信息未知的情况, 提出了一种基于事件触发动态面控制的目标合围控制方法. 文献[11]考虑了部分个体不具备感知能力的情况, 基于反演设计方法设计了一种集群势函数实现了四旋翼无人机的目标合围控制. 文献[12]针对有向通信拓扑下具有多个领导者的高阶多智能体系统的包围控制问题, 提出了一种仅基于邻域智能体相对输出测量的分布式包围控制协议, 消除了一些现有方法中普遍使用的多智能体系统中跟随者的观测器必须与其邻居个体共享信息的假设. 文献[13]提出了一个使用多四旋翼无人机实现三维运动目标包围的分布式控制框架, 基于该框架, 每架无人机仅根据获取的局部信息就可以实现对三维运动目标的包围.

在一些研究中, 目标合围问题被看作是编队-包围问题的一个特例, 即将编队的领导者看作一个移动目标. 文献[14,15]致力于通过李雅普诺夫理论和代数黎卡提方程设计在固定通信拓扑或切换通信拓扑作用下的时变编队-包围控制律, 并在实验验证中实现了三个从动四旋翼无人机利用期望的时变编队来包围目标无人机. 在文献[16]中, 通过代数图论和时域稳定性理论研究了固定拓扑和切换拓扑下多无人机系统的编队-包围控制. 在文献[17]中, 基于具有离散邻域信息的脉冲控制, 研究了具有不同维数和动力学的异质线性集群系统的包围问题. 其中, 离散时间通信的方式可以有效减少网络消耗. 文献[18]考虑了存在多个领导者以及外界干扰的情况, 提出了无人机集群自适应事件触发编队-包围控制律. 其中, 自适应事件触发机制的引入可以减轻无人机集群通信网络负担.

总之, 目前集群合围控制问题已得到广泛研究, 但任务环境的不确定性、未知或部分可知的合围目标信息、合围过程中可能出现的通信中断以及个体的增加和减少等对集群合围控制方法提出了更高的要求^[19-21]. 然而, 上述研究工作大部分基于一个预先定义好的或全局透明的通信网络, 在这个通信网络中, 个体能够与固定的邻居进行交互, 而不考虑它们间的距离. 而实际应用中无人机的通信能力是有限的, 只能与一定距离范围内的无人机进行交互. 此外, 在这些方法中, 参与合围任务的无人机集群的合围构型和集群规模均是预先定义好的, 导致这些方法的可扩展性和自适应能力较差.

基于上述情况, 本文对局部交互机制作用下的无人机集群目标合围控制问题进行研究. 考虑集群系统中的每架无人机仅能与有限通信范围内的其他无人机进行交互, 其邻域无人机集合取决于自身的通信能力. 设计基于局部度量距离交互的分布式集群目标合围控制律, 使无人机集群能够以指定环绕半径形成以目标无人机为中心的稳定合围构型, 并在合围过程中能够避开飞行环境中的障碍. 然后对集群系统的稳定性进行分析. 此外, 为进一步分析在所提出的控制律作用下无人机集群的目标合围过程, 将文献[22]提出的群体熵概念进行实例化, 试图根据集群系统组织的时间演化来度量目标合围控制效果.

2 问题描述

考虑在三维欧氏空间中飞行的由 N 架无人机组成无人机集群系统, 用 $\mathbf{N}=\{1, 2, 3, \dots, N\}$ 表示该集群系统的顶点集. 假设该系统中的每架无人机均配有一阶马赫数保持自动驾驶仪、一阶航向保持自动驾驶仪以及二阶高度保持自动驾驶仪, 则每架无人机的动力学模型可表示为^[23]

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= V_i \cos \psi_i, \\ \dot{y}_i &= V_i \sin \psi_i, \\ \dot{z}_i &= h_i, \\ \dot{V}_i &= \tau_{V_i}^{-1}(V_i^C - V_i), \\ \dot{\psi}_i &= \tau_{\psi_i}^{-1}(\psi_i^C - \psi_i), \\ \dot{h}_i &= \tau_{z_i}^{-1}(z_i^C - z_i) - \tau_{h_i}^{-1}h_i,\end{aligned}\tag{1}$$

其中, 下标 $i \in \mathbf{N}$ 用于区分不同的无人机, $\mathbf{p}_i=[x_i, y_i, z_i]^T$

表示无人机 i 的位置向量, $\mathbf{v}_i = [\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i]^T$ 为无人机 i 在惯性坐标系三个坐标轴上的速度分量, V_i , ψ_i 和 h_i 分别为无人机 i 的速度、航向和高度变化率. τ_{V_i} , τ_{ψ_i} , τ_{z_i} 和 τ_{h_i} 分别是无人机 i 的马赫数保持、航向保持和高度保持自动驾驶仪的时间常数, V_i^C , ψ_i^C 和 z_i^C 分别为这三个自动驾驶仪的控制输入指令.

考虑实际无人机受到飞行速度限制、航向角速度限制、爬升速度限制和爬升加速度限制等本体约束, 该集群系统中无人机的飞行状态需满足如下约束:

$$\begin{aligned} V_{\min} &\leq V_i \leq V_{\max}, \\ |\dot{\psi}_i| &\leq V_i^{-1} n_{\max} g_a, \\ h_{\min} &\leq h_i \leq h_{\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $g_a = 10 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度, $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 分别为无人机的最小和最大飞行速度, $n_{\max}$ 为无人机最大横向载荷, $h_{\min}$ 和 $h_{\max}$ 分别为最小和最大高度变化率.

定义 d_c 为无人机的交互半径, 则对于任意无人机 $i \in \mathbf{N}$, 通过判断集群系统中的其他无人机是否处于其交互范围内, 可以确定无人机 i 的邻域无人机集合 $\mathbf{N}_i^a$ 为

$$\mathbf{N}_i^a = \{j : \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| < d_c, j \in \mathbf{N} \setminus \{i\}\}. \quad (3)$$

同样地, 定义 d_s 为无人机 i 的障碍感知半径, 通过判断障碍是否处于其障碍感知区域内, 可以确定无人机 i 的邻域障碍集合 $\mathbf{N}_i^o$ 为

$$\mathbf{N}_i^o = \{k : \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^k\| < d_s, k \in \{1, 2, \dots, n_o\}\}, \quad (4)$$

其中, n_o 表示集群系统飞行环境中存在的障碍的数量, $\mathbf{p}_i^k$ 表示无人机 i 在障碍 O_k 边界上投影的位置向量^[24], 即

$$\mathbf{p}_i^k = \underset{\mathbf{p}_{O_k} \in O_k}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{p}_{O_k} - \mathbf{p}_i\|, \quad (5)$$

其中, $\mathbf{p}_{O_k}$ 表示障碍 O_k 边界上的任意一点.

定义1. 定义 $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N]^T$ 为无人机集群系统的位置向量, 则 α -晶格集群构型 $\mathbf{p}$ 是满足如下条件的构型:

$$\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| = r_a, \quad \forall i \in \mathbf{N} \text{ 和 } j \in \mathbf{N}_i^a, \quad (6)$$

其中, r_a 为无人机集群系统内无人机间的期望相对空

间距离.

假设1 假设无人机集群系统飞行环境中的障碍均是具有无限可微流形边界的连通凸区域.

对于一群由式(1)和(2)描述的无人机, 存在一架目标无人机 g , 其运动仍由式(1)和(2)进行描述, 飞行状态用下标 g 和无人机集群系统进行区分. 为形成对目标无人机 g 的有效合围, 需设计一种分布式的集群合围控制策略使得以下结论成立:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_g) &= \mathbf{0}, \quad \forall i \in \mathbf{N}, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_g\| &= r_g, \quad \forall i \in \mathbf{N}, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| &= r_a, \quad \forall i \in \mathbf{N} \text{ 和 } j \in \mathbf{N}_i^a, \\ \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^k\| &\geq r_o, \quad \forall t > 0, i \in \mathbf{N} \text{ 和 } k \in \mathbf{N}_i^o, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, r_g 为无人机 i 与目标无人机 g 之间的期望相对空间距离, r_o 为自定义的无人机需与飞行环境中的障碍保持的最小安全距离.

3 无人机集群合围控制律设计

3.1 势函数

基于局部度量距离交互机制, 根据式(3)获得无人机 i 的邻域无人机集合 $\mathbf{N}_i^a$, 然后采用文献[25]提出的成对势函数, 可得无人机 i 与其交互范围内的无人机间的光滑势函数 Γ_i^o 为

$$\Gamma_i^o = \frac{1}{2} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \Psi_a(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma), \quad (8)$$

其中, $\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma = \frac{1}{v} \left(\sqrt{1 + v \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|^2} - 1 \right)$, $v \in \mathbb{R}^+$ 为位置向量差 $\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i$ 的 σ -范数, $\Psi_a(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma) =$

$\int_{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma}^{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma} \Phi(c) dc$, 且

$$\begin{cases} \Phi(c) = \rho_\varepsilon \left(\frac{c}{\|d_c\|_\sigma} \right) \left[\eta_a \sigma_1(c - \|r_a\|_\sigma) \right], \\ \sigma_1(c - \|r_a\|_\sigma) = (c - \|r_a\|_\sigma) \left(\sqrt{1 + (c - \|r_a\|_\sigma)^2} \right)^{-1}, \end{cases} \quad (9)$$

其中, η_a 为正常数, $\rho_\varepsilon(\cdot)$ 为具有有界微分的光滑激活函数:

$$\rho_\varepsilon(c) = \begin{cases} 1, & c \in [0, \varepsilon), \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{c-\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \right], & c \in [\varepsilon, 1], \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (10)$$

其中, $0 < \varepsilon < 1$.

3.2 控制律设计

对于无人机集群系统, 为实现集群目标包围控制, 根据无人机实时飞行状态信息和环境感知信息, 设计如下分布式集群包围控制协议:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i = & -\zeta_{a_p} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \nabla_{\mathbf{p}_i} \Psi_a(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma) + \zeta_{a_v} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} a_{ij}(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \\ & -\zeta_{o_p} \sum_{k \in \mathbf{N}_i^o} \nabla_{\mathbf{p}_i} \Psi_o(\|\mathbf{p}_i^k - \mathbf{p}_i\|_\sigma) + \zeta_{o_v} \sum_{k \in \mathbf{N}_i^o} b_{ik}(\mathbf{v}_i^k - \mathbf{v}_i) \\ & -\zeta_{g_p} \nabla_{\mathbf{p}_i} \Psi_g(\|\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_i\|_\sigma) + \zeta_{g_v}(\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_i) + \mathbf{u}_g, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 控制律增益 $\zeta_{a_p}, \zeta_{a_v}, \zeta_{o_p}, \zeta_{o_v}, \zeta_{g_p}$ 和 ζ_{g_v} 均为正常数, $\mathbf{v}_i^k = \dot{\mathbf{p}}_i^k$, $b_{ik} = \rho_\varepsilon(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma \|r_o\|_\sigma^{-1})$, $\mathbf{u}_g$ 为目标无人机的驱动力, a_{ij} 为根据如式(10)所示激活函数形成的基于位置和度量距离交互机制的集群系统时变交互拓扑关联矩阵的元素, 即:

$$a_{ij} = \begin{cases} \rho_\varepsilon \left(\frac{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma}{\|d_c\|_\sigma} \right), & \forall j \neq i, \\ 0, & \forall j = i. \end{cases} \quad (12)$$

$\nabla_{\mathbf{c}} \Psi_l(\mathbf{c})$, $l \in \{a, o, g\}$ 为势函数 $\Psi_l(\mathbf{c})$ 关于向量场 $\mathbf{c}$ 的梯度, 控制律式(11)中的各势函数分别被设计为

$$\begin{cases} \Psi_o(\|\mathbf{p}_i^k - \mathbf{p}_i\|_\sigma) = \int_{\|\mathbf{p}_i^k - \mathbf{p}_i\|_\sigma}^{\|\mathbf{p}_i^k - \mathbf{p}_i\|_\sigma} \Phi_o(c) dc, & i \in \mathbf{N} \cup \{g\}, \\ \Phi_o(c) = \rho_\varepsilon \left(\frac{c}{\|r_o\|_\sigma} \right) [\sigma_1(c - \|r_o\|_\sigma) - 1], \end{cases} \quad (13)$$

$$\Psi_g(\|\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_i\|_\sigma) = \int_{\|\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_i\|_\sigma}^{\|\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_i\|_\sigma} \Phi_g(c) dc, \quad i \in \mathbf{N}. \quad (14)$$

将由式(11)计算得到的控制律代入如下控制指令转换律可得无人机 $i \in \mathbf{N} \cup \{g\}$ 的自动驾驶仪控制指令为

$$\begin{aligned} V_i^C &= \tau_{V_i}(\mathbf{u}_{i,1} \cos \psi_i + \mathbf{u}_{i,2} \sin \psi_i) + V_i, \\ \psi_i^C &= \frac{\tau_{\psi_i}}{V_i}(\mathbf{u}_{i,2} \cos \psi_i - \mathbf{u}_{i,1} \sin \psi_i) + \psi_i, \\ z_i^C &= \frac{\tau_{z_i}}{\tau_{h_i}} h_i + \tau_{z_i} \mathbf{u}_{i,3} + z_i. \end{aligned} \quad (15)$$

定理1 给定一架目标无人机, 若无人机集群系统的初始哈密顿算子有界, 每架无人机在控制律式(11)和控制指令转换律式(15)的作用下, 下列结论成立:

(1) 该无人机集群系统渐近收敛于以目标无人机为中心的 α -晶格包围构型;

(2) 若该集群系统的初始哈密顿算子小于 $(\kappa + 1)\Psi_a(0)$, $\kappa \in \mathbb{Z}^+$, 则至多存在 κ 架发生碰撞的无人机.

证明 (1) 对于 $i \in \mathbf{N}$, 定义 $\tilde{\mathbf{p}}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_g$, $\tilde{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_g$, $\tilde{\mathbf{u}}_i = \mathbf{u}_i - \mathbf{u}_g$, 考虑以下集群哈密顿算子:

$$\begin{aligned} H &= \zeta_{a_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \Psi_a(\|\tilde{\mathbf{p}}_j - \tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) \\ &+ 2\zeta_{o_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{k \in \mathbf{N}_i^o} \Psi_o(\|\mathbf{p}_i^k - \mathbf{p}_i\|_\sigma) \\ &+ 2\zeta_{g_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \Psi_g(\|\tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) + \sum_{i \in \mathbf{N}} \tilde{\mathbf{v}}_i^T \tilde{\mathbf{v}}_i. \end{aligned} \quad (16)$$

在没有障碍的情况下, 对 H 进行求导可得

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \zeta_{a_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \left[\dot{\mathbf{p}}_i^T \nabla_{\tilde{\mathbf{p}}_i} \Psi_a(\|\tilde{\mathbf{p}}_j - \tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) + \dot{\mathbf{p}}_j^T \nabla_{\tilde{\mathbf{p}}_j} \Psi_a(\|\tilde{\mathbf{p}}_j - \tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) \right] \\ &+ 2\zeta_{o_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \left[\dot{\mathbf{p}}_i^T \nabla_{\tilde{\mathbf{p}}_i} \Psi_o(\|\tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) \right] + 2 \sum_{i \in \mathbf{N}} \tilde{\mathbf{v}}_i^T \dot{\tilde{\mathbf{v}}}_i. \end{aligned} \quad (17)$$

由于集群系统内无人机间的交互均为双向交互, 因此其空间邻接拓扑为无向图. 将控制律式(11)代入式(17)可得

$$\begin{aligned} \dot{H} &= 2\zeta_{a_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \dot{\mathbf{p}}_i^T \nabla_{\tilde{\mathbf{p}}_i} \Psi_a(\|\tilde{\mathbf{p}}_j - \tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) \\ &+ 2\zeta_{o_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \left[\dot{\mathbf{p}}_i^T \nabla_{\tilde{\mathbf{p}}_i} \Psi_o(\|\tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) \right] + 2 \sum_{i \in \mathbf{N}} \tilde{\mathbf{v}}_i^T \dot{\tilde{\mathbf{v}}}_i \\ &= 2 \sum_{i \in \mathbf{N}} \tilde{\mathbf{v}}_i^T \left[\zeta_{a_p} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \nabla_{\tilde{\mathbf{p}}_i} \Psi_a(\|\tilde{\mathbf{p}}_j - \tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) + \zeta_{g_p} \nabla_{\tilde{\mathbf{p}}_i} \Psi_g(\|\tilde{\mathbf{p}}_i\|_\sigma) + \dot{\tilde{\mathbf{v}}}_i \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \sum_{i \in \mathbf{N}} \tilde{\mathbf{v}}_i^T \left[\zeta_{\alpha_v} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} a_{ij} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) - \zeta_{g_v} \tilde{\mathbf{v}}_i \right] \\
&= 2 \sum_{i \in \mathbf{N}} \tilde{\mathbf{v}}_i^T \left[-\zeta_{\alpha_v} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} a_{ij} (\tilde{\mathbf{v}}_i - \tilde{\mathbf{v}}_j) - \zeta_{g_v} \tilde{\mathbf{v}}_i \right] \\
&= -2\zeta_{\alpha_v} \tilde{\mathbf{v}}_i^T (\mathbf{L}_\alpha \otimes \mathbf{I}_3) \tilde{\mathbf{v}}_i - 2\zeta_{g_v} \sum_{i \in \mathbf{N}} \tilde{\mathbf{v}}_i^T \tilde{\mathbf{v}}_i, \quad (18)
\end{aligned}$$

其中, $\mathbf{L}_\alpha$ 为无人机集群系统的时变拉普拉斯矩阵, 当 $i=j$ 时, 其元素 $L_{ij} = \sum_{k \in \mathbf{N} \setminus \{i\}} a_{ik}$, 否则, $L_{ij} = -a_{ij}$. $\otimes$ 为 Kronecker 乘积, $\mathbf{I}_3$ 为元素均为 1 的 3 维列向量.

从式(18)可以看出 $\dot{H} \leq 0$, 即 H 是单调递减的, 因此 $H(t) \leq H(0)$, $\forall t \geq 0$. 根据 LaSalle 不变集定理可得从 $\Omega = \{[\tilde{\mathbf{p}}^T, \tilde{\mathbf{v}}^T]^T | H(t) \leq H(0)\}$ 出发的所有无人机的轨迹将收敛到 $E = \{[\tilde{\mathbf{p}}^T, \tilde{\mathbf{v}}^T]^T | \dot{H} = 0\}$, 其中 $\tilde{\mathbf{p}} = [\tilde{\mathbf{p}}_1, \tilde{\mathbf{p}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{p}}_N]$, $\tilde{\mathbf{v}} = [\tilde{\mathbf{v}}_1, \tilde{\mathbf{v}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{v}}_N]$. $\dot{H} = 0$ 表示 $\tilde{\mathbf{v}}_i = 0$, $\forall i \in \mathbf{N}$, 因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_g = 0$. 由于所定义的势函数具有旋转和平移不变性, 因此不存在孤立的局部极小值, 系统的几乎所有解都收敛到一个平衡点, 即势函数的局部极小值, 因此, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_g\| = r_g$, $\forall i \in \mathbf{N}$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| = r_\alpha$, $\forall i \in \mathbf{N}$ 和 $j \in \mathbf{N}_i^a$. 即无人机集群系统能够渐近收敛到以目标无人机为中心的稳态 α -晶格合围构型.

(2) 假设存在某一时刻 $t_1 > 0$, 在该时刻至少存在 $\kappa+1$ 架发生碰撞的无人机. 不失一般性, 假设前 $\kappa+1$ 架无人机发生碰撞, 则

$$\begin{aligned}
&\zeta_{\alpha_p} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \Psi_\alpha(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|_\sigma) \\
&= \sum_{i=1}^{\kappa+1} \Psi_\alpha(0) + \zeta_{\alpha_p} \sum_{i=\kappa+1}^N \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \Psi_\alpha(\|\mathbf{p}_j(t_1) - \mathbf{p}_i(t_1)\|_\sigma) \\
&\geq (\kappa+1) \Psi_\alpha(0). \quad (19)
\end{aligned}$$

然而, 根据集群哈密顿算子的递减性质可得

$$\begin{aligned}
H(0) &\geq \zeta_{\alpha_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \Psi_\alpha(\|\mathbf{p}_j(0) - \mathbf{p}_i(0)\|_\sigma) \\
&\geq \zeta_{\alpha_p} \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{j \in \mathbf{N}_i^a} \Psi_\alpha(\|\mathbf{p}_j(t_1) - \mathbf{p}_i(t_1)\|_\sigma) \\
&\geq (\kappa+1) \Psi_\alpha(0). \quad (20)
\end{aligned}$$

这与 $H(0) < (\kappa+1) \Psi_\alpha(0)$ 的假设相矛盾. 因此, 若无人机集群系统的初始哈密顿算子满足 $H(0) < (\kappa+1) \Psi_\alpha(0)$, $\kappa \in \mathbb{Z}^+$ 的条件, 则对于任何时刻, 则至多存在 κ 架发生碰撞的无人机, $\kappa=0$ 意味着无人机之间没有发生任何碰撞.

定理2 假设由 $N \gg 4$ 架无人机组成的无人机集群系统可以形成以目标无人机 $\mathbf{g}$ 为中心, 半径为 r_g 的由简单多面体组成的 α -晶格合围构型, 那么合围构型参数 r_α 满足

$$r_g \sqrt{\frac{2}{N-2}} < r_\alpha < 2r_g \sqrt{\frac{6}{N+4}}. \quad (21)$$

证明 假设该合围构型由 $f \in \mathbb{Z}^+$ 个面, $e \in \mathbb{Z}^+$ 条边组成, 其中每个面包含 $n \in \mathbb{R}^+$ 个顶点(无人机), 每个顶点平均关联 $m \in \mathbb{R}^+$ 条边, 则 $nf = 2e = mN$, 且 $n \geq 3$, $m \geq 3$. 因此, 当 $m=3$ 时, 合围构型中面的数量达到局部最小, 当 $n=3$ 时, 合围构型中面的数量达到局部最大. 根据欧拉定理可得合围构型中面的数量的最小值和最大值分别为 $f_{\min} = N/2 + 2$, $f_{\max} = 2(N-2)$. 同时 n 和 m 满足

$$\frac{1}{n} + \frac{1}{m} = \frac{1}{2} + \frac{1}{e} > \frac{1}{2}. \quad (22)$$

为了确定合围构型参数 r_α 的上界, 考虑包含局部最少面的合围构型, 即 $m=3$. 就式(22)而言, 由于 $m=3$, 因此 $3 \leq n \leq 6$. 根据图1可得, 由于等边三角形是具有相同外接圆的多边形中具有最大边长的多边形, 基于 α -晶格可形成若干个等边三角形, 因此球 $\mathbf{O}$ 被划分为 $f_{\min}$ 个全等球锥 $\mathbf{OABCO}_2$, $\mathbf{ABC}$ 为球面三角形, 其外切圆为 $\mathbf{O}_2$. 由于球锥 $\mathbf{OABCO}_2$ 的体积小于外切圆锥 $\mathbf{OA}_1\mathbf{B}_1\mathbf{C}_1$ 的体积, 因此,

$$\frac{4}{3} \pi r_g^3 / f_{\min} < \frac{1}{3} \pi r_2^2 r_g, \quad (23)$$

其中, $r_2 = d_2 / \sqrt{3}$ 是外切圆 $\mathbf{O}_2$ 的半径. 当式(23)成立时, 合围构型参数 r_α 取最大值, 即 $r_\alpha < d_2 = 2r_g \sqrt{6/(N+4)}$.

同样地, 考虑面的数量达到局部最大的合围构型, 即 $n=3$. 由于 $n=3$, 每个 α -晶格都是全等等边三角形. 由于球锥 $\mathbf{OABCO}_2$ 的体积大于内接圆锥 $\mathbf{OABC}$ 的体积, 因此,

$$\frac{4}{3} \pi r_g^3 / f_{\max} > \frac{1}{3} \pi r_1^2 \sqrt{r_g^2 - r_1^2}, \quad (24)$$

其中, $r_1 = d_1 / \sqrt{3}$ 是内切圆 $\mathbf{O}_1$ 的半径. 由于 $N \gg 4$, 因此

图 1 α -晶格合围构型上的球锥. 顶点A, B和C分别代表三架不同的无人机, 中心O为目标无人机. A_1 , B_1 和 C_1 分别是外切圆 O_2 上由顶点A, B和C向外延伸得到的顶点

Figure 1 Illustration of the spherical cone induced by the α -lattice enclosing configuration. The vertices A, B, and C stand for the positions of three distinct unmanned aerial vehicles (UAVs) and the center O is the target. A_1 , B_1 , and C_1 are the extended vertices induced by A, B, and C on the externally tangent circle of the spherical cone.

$r_g \gg r_1$, $r_g^2 - r_1^2 \approx r_g^2$. 所以当式(24)成立时, 合围构型参数 r_a 取最小值, 即 $r_a > d_1 \approx r_g \sqrt{2/(N-2)}$.

4 基于群体熵的集群目标合围过程分析

熵作为一个概念, 是1865年由Clausius^[26]在研究热力学第二定律时提出的, 其热力学意义是对无序混乱的分子运动的微观形态在宏观表现的描述. 随后, Boltzmann对熵的物理意义做出了微观解释, 并将其用于系统状态混乱性或无序程度的度量^[27]. 然后Shannon和Weave^[28]把信息熵与统计力学熵概念相联系, 提出了信息熵的概念, 从而使熵通过信息熵扩展到生物、社会、经济等非物理学领域. 熵作为热力学中描述系统组成个体有序程度的度量单位, 也可以描述群体系统中大量个体在统计学意义上秩序水平. 特别是对于随机动态演化群体系统而言, 熵值的变化对应了系统中交互个体由无序到有序、由有序到优序的演化过程. 例如, 文献[29]采用局部传递熵对隐鸢群迁徙过程中在空间和时间上的局部动态信息传递过程进行了量化. 文献[30]基于Boltzmann熵提出了一个有序程度度量指标, 并将其用来衡量一群功能极为简单的机器人的同步有序水平. 文献[31]提出了层级社会熵的概念, 用于对群体多样性进行连续度量, 并在多机器人足球赛和多机器人觅食实验中验证了该度量指标的有效

性. 此外, 文献[22]提出了群体智能系统的群体熵度量理论, 将群体熵定义为系统结构熵与个体相互作用信息熵的复合函数:

$$E = F \circ G(\ln[\Xi]), \quad (25)$$

其中, G 为反映个体构型瞬态熵的演化函数, F 为反映系统整体协同关联水平过程熵的演化函数, $F \circ G$ 为函数 G 与 F 的复合运算, $\ln[\Xi]$ 为某时刻群体行为中个体的统计学意义熵. 群体熵本质上是对微观个体通过激发交互实现宏观群体协作汇聚过程的系统动力学行为统计度量, 为无人机集群系统复杂群体行为的研究提供了新方法, 也为无人机集群系统群体智能的度量提供了新视角.

无人机集群目标合围过程中, 在环境和集群系统参量变化的情况下, 随着时间的变化, 无人机集群系统在局部度量距离交互机制的作用下会演化出丰富的群体行为模式. 为进一步度量无人机集群的目标合围控制效果, 本节将对如式(25)所示的群体熵度量函数进行实例化, 从而对无人机集群系统在分布式集群合围控制律作用下的自组织水平进行度量.

通过改变最大距离 r 判断无人机集群中可能存在的子群, 进而计算无人机集群系统的群体熵. 如果 $\mathbf{p}_i$ 与 $\mathbf{p}_j$ 满足 $\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| \leq r$, 则无人机 i 与无人机 j 同属于一个子群. 假设根据最大距离 r , 可以将 t 时刻的无人机集群划分为 M 个互不相交子群, 形成的子群集合可表示为

$\mathbf{C} = \{\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_M\}$, 且 $\mathbf{C}_k \cap \mathbf{C}_l = \emptyset$, $w, l \in \{1, 2, \dots, M\}$, 且 $w \neq l$. 将在 t 时刻由最大距离 r 确定的第 l 个无人机子群包含的无人机数量 $|\mathbf{C}_l|$ 占无人机集群总数 $\sum_{w=1}^M |\mathbf{C}_w| = N$ 的比例定义为 p_l , 即

$$p_l = \frac{|\mathbf{C}_l|}{\sum_{w=1}^M |\mathbf{C}_w|}. \quad (26)$$

则该时刻由最大距离 r 确定的 M 个子群对应的信息熵 $E(r)$ 为

$$E(r) = -\sum_{l=1}^M p_l \log_2(p_l). \quad (27)$$

通过将式(29)获得的信息熵 $E(r)$ 在 $r: 0 \rightarrow \infty$ 进行积分可得 t 时刻无人机集群的群体熵为

$$E_t(t) = \int_0^\infty E(r) dr. \quad (28)$$

由式(27)和(28)可以看出, $E(r)$ 的取值依赖于最大距离 r 的取值.

5 仿真验证

考虑由 $N=30$ 架无人机组成的无人机集群系统包围和跟踪一架目标无人机, 在放置了若干个形状或大小不一致的障碍的三维空间中随机生成这些无人机的初始飞行状态, 包括空间位置 $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]$ 、空速 V_i 、航向角 ψ_i 和高度变化率 h_i , 其中下标 i 用于区分不同的无人机. 无人机自动驾驶仪的时间常数分别设置为 $\tau_{V_i}=2$ s, $\tau_{\psi_i}=2$ s, $\tau_{z_i}=3$ s 和 $\tau_{h_i}=2$ s. 无人机飞行速度、最大横向载荷和高度变化率限制分别设置为 $V_{\min}=10$ m/s, $V_{\max}=90$ m/s, $n_{\max}=6$ m/s², $h_{\min}=-5$ m/s 和 $h_{\max}=5$ m/s. 此外, 无人机间的期望相对距离为 $r_a=8$ m, 无人机间的交互半径为 $d_c=1.2r_a$, 无人机的障碍感知半径为 $d_s=0.6d_c$, 无人机与障碍的最小安全距离为 $r_o=0.6r_a$, 无人机与目标无人机的期望空间距离为 $r_g=10$ m, r_a 与 r_g 满足如式(24)所示的约束条件. 集群控制器相关增益分别设为 $\xi_{a_p}=\xi_{a_v}=1$, $\xi_{o_p}=\xi_{o_v}=6$, $\xi_{g_p}=\xi_{g_v}=1.5$, 势函数相关的参数设置为 $\eta_a=4$, $\varepsilon=0.2$, $v=0.1$. 最大仿真时间和采样时间间隔分别设置为 $T_{\max}=14$ s 和 $T_s=0.01$ s.

无人机集群系统在受限环境中对目标无人机的包围结果如图2~4所示. 图2给出了由30架无人机组成的

图2 受限环境中30架无人机的目标包围结果. (a) 俯视图; (b) 三维图; (c) $t=14$ s时无人机集群系统形成的包围构型(五角星为目标无人机)

Figure 2 Enclosing in confined space for 30 UAVs. (a) Top view of target enclosing; (b) three-dimensional diagram of target enclosing; (c) enclosing configuration formed by the multi-UAV system at $t=14$ s (the pentagram represents the target UAV).

集群在具有障碍的受限环境中从初始位置出发到形成以目标无人机为中心的稳定合围构型的合围过程。由图可见, 所提出的分布式集群合围控制律能够保证所有无人机形成稳定的合围构型, 同时无人机集群系统能快速适应受限环境和快速变化的任务, 所有无人机均能够快速避开障碍, 当障碍逐渐从无人机的障碍感知区域内消失时, 无人机可以快速恢复执行目标合围跟踪任务。

图3给出了目标合围过程中所有无人机的飞行速度、航向角和飞行高度等飞行状态的变化曲线。图中带有五角星标记的灰色实线为目标无人机的飞行状态变化曲线, 无标记的灰色实线为30架无人机的飞行状态变化曲线, 从图中可以看出, 无人机集群系统的飞行速度和航向等飞行状态最终都收敛到目标无人机的飞行状态上, 表明在所提出的控制律的作用下, 无人机集群系统能渐近收敛于以目标无人机为中心的稳定合围构型。

图4为无人机集群系统的群体熵变化曲线, 从图中可以看出在无人机集群的目标合围过程中, 在分布式集群合围控制律的作用下, 每架无人机从初始位置出发, 按照一定的规律运动, 调整自身飞行状态, 使集群逐渐有序地组织起来完成合围任务, 此时控制律驱动集群系统向由更少的微观状态组成的宏观状态发展, 对应着图4中群体熵值下降的阶段。当集群中的无人机因飞行环境中的障碍改变其飞行状态时, 集群内部的各无人机间的相互作用发生变化, 集群的有序性减弱、无序性增强, 此时对应图4中群体熵值重新上升的阶段。经过自组织与自适应, 无人机集群系统历经复杂的变化, 从无序向优化的秩序演进。

6 结论

本文针对受限环境中无人机集群的目标包围问题, 考虑无人机有限的通信能力, 设计了基于局部度量距离交互的无人机集群分布式目标合围控制律, 并尝试将群体熵的概念用于度量无人机集群目标合围过程中的自组织水平。根据理论证明和仿真结果得出如下结论。

(1) 通过所提出的分布式目标合围控制方法, 无人机集群系统在自组织原则的基础上形成了对目标无人机的合围和跟踪能力以及对飞行环境中障碍的规避

图3 30架无人机和目标无人机的飞行状态。(a) 飞行速度变化曲线; (b) 航向角变化曲线; (c) 飞行高度变化曲线

Figure 3 Flight status of the 30 UAVs and the target UAV. (a) Trajectories of flight speed; (b) trajectories of heading angle; (c) trajectories of flight altitude.

图4 无人机集群系统的群体熵变化曲线

Figure 4 Trajectory of the crowd entropy of the multi-UAV system.

能力。

(2) 群体熵度量理论的提出为无人机集群目标合围控制的度量提供了新视角, 有效描述了无人机集群执行合围任务过程中整个系统在时间和空间上的动态演化过程。

参考文献

- 1 Office of the Secretary of Defence. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030. Office of the Secretary of Defence, 2005
- 2 Smalley D. LOCUST: Autonomous swarming UAVs fly into the future. Office of Naval Research, 2015
- 3 Jain A, Ghose D. Collective circular motion in synchronized and balanced formations with second-order rotational dynamics. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 2018, 54: 156–173
- 4 Ramana M V, Kothari M. Pursuit-evasion games of high speed evader. *J Intell Robot Syst*, 2017, 85: 293–306
- 5 Wang X K, Liu Z H, Cong Y R. Miniature fixed-wing UAV swarms: Review and outlook (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2020, 41: 023732 [王祥科, 刘志宏, 丛一睿. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展. *航空学报*, 2020, 41: 023732]
- 6 Yan P P, Fan Y H, Chen Y L, et al. Distributed encirclement points deployment of autonomous mobile multi-agents based on finite-time consensus (in Chinese). *J Northwestern Polytech Univ*, 2020, 38: 1139–1145 [闫朋朋, 凡永华, 陈园林, 等. 基于有限时间一致性的自主移动多智能体分布式包围点部署. *西北工业大学学报*, 2020, 38: 1139–1145]
- 7 Yu X, Ma J, Ding N, et al. Cooperative target enclosing control of multiple mobile robots subject to input disturbances. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2021, 51: 3440–3449
- 8 Miao Z, Wang Y, Fierro R. Cooperative circumnavigation of a moving target with multiple nonholonomic robots using backstepping design. *Syst Control Lett*, 2017, 103: 58–65
- 9 Yu X, Ding N, Zhang A, et al. Cooperative moving-target enclosing of networked vehicles with constant linear velocities. *IEEE Trans Cybern*, 2020, 50: 798–809
- 10 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
- 11 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
- 12 Wen G, Zhao Y, Duan Z, et al. Containment of higher-order multi-leader multi-agent systems: A dynamic output approach. *IEEE Trans Automat Contr*, 2016, 61: 1135–1140
- 13 Franchi A, Stegagno P, Oriolo G. Decentralized multi-robot encirclement of a 3D target with guaranteed collision avoidance. *Auton Robot*, 2016, 40: 245–265
- 14 Dong X, Zhou Y, Ren Z, et al. Time-varying formation tracking for second-order multi-agent systems subjected to switching topologies with application to quadrotor formation flying. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 5014–5024
- 15 Zou Y, Zhou Z, Dong X, et al. Distributed formation control for multiple vertical takeoff and landing UAVs with switching topologies. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2018, 23: 1750–1761
- 16 Han T, Chi M, Guan Z H, et al. Distributed three-dimensional formation containment control of multiple unmanned aerial vehicle systems. *Asian J Control*, 2017, 19: 1103–1113
- 17 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
- 18 Wei L, Chen M, Li T. Disturbance-observer-based formation-containment control for UAVs via distributed adaptive event-triggered mechanisms. *J Franklin Inst*, 2021, 358: 5305–5333
- 19 Zhang H Q, Wu L H, Zhou Y, et al. Self-organizing cooperative multi-target hunting by swarm robots in complex environments (in Chinese). *Control Theory Appl*, 2020, 37: 1054–1062 [张红强, 吴亮红, 周游, 等. 复杂环境下群机器人自组织协同多目标围捕. *控制理论与应用*, 2020, 37: 1054–1062]
- 20 Dutta R, Sun L, Pack D. A decentralized formation and network connectivity tracking controller for multiple unmanned systems. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2018, 26: 2206–2213
- 21 Huo M, Duan H, Fan Y. Pigeon-inspired circular formation control for multi-UAV system with limited target information. *Guid Navigat Control*, 2021, 01: 2150004
- 22 Luo J, Jiang X, Guo B H, et al. Dynamic model and crowd entropy measurement of crowd intelligence system (in Chinese). *Sci Sin Inform*, 2022, 52: 99–110 [罗杰, 姜鑫, 郭炳晖, 等. 群体智能系统的动力学模型与群体熵度量. *中国科学: 信息科学*, 2022, 52: 99–110]
- 23 Beard R W, McIn T W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton: Princeton University Press, 2012

- 24 Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. Technical Report. Pasadena: California Institute of Technology, Control and Dynamical Systems, 2004. Tech. Rep. 2004-005
- 25 Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Trans Automat Contr*, 2006, 51: 401–420
- 26 Clausius R. Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. *Ann Phys Chem*, 1865, 125: 353–400
- 27 Jaynes E T. Gibbs vs Boltzmann entropies. *Am J Phys*, 1965, 33: 391–398
- 28 Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Illinois: University of Illinois Press, 1949
- 29 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鹈信息传递过程研究. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 380–388]
- 30 Baldassarre G. Self-organization as phase transition in decentralized groups of robots: A study based on Boltzmann entropy. In: Prokopenko M, ed. *Advances in Applied Self-organizing Systems. Advanced Information and Knowledge Processing*. London: Springer, 2008
- 31 Baldassarre G, Parisi D, Nolfi S. Measuring coordination as entropy decrease in groups of linked simulated robots. In: Bar-Yam Y, ed. *Proceedings of the 5th International Conference on Complex Systems*. 2007

Target enclosing control of multiple unmanned aerial vehicles based on crowd entropy

CHEN Lin¹, GUO BingHui^{2,3}, DUAN HaiBin^{1,3} & LÜ WeiFeng⁴

¹ School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

² School of Mathematics and Systems Science, Beihang University, Beijing 100083, China;

³ Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China;

⁴ School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

In this study, the target enclosing problem of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) is investigated, and a distributed swarm target enclosing control protocol based on the local metric-distance communication is presented. First, the neighborhood of UAVs for each UAV is determined on the basis of metric-distance communications, and the inner interaction potential function of UAVs within a swarm, the interaction potential function between UAVs and obstacles in a flight environment, and the interaction potential function between UAVs and the target UAV are designed on the basis of a smooth pairwise potential function. Then, the distributed swarm target enclosing control protocol based on a self-organizing principle is developed, which makes the UAVs form a stable α -lattice enclosure configuration centered on the target UAV with a specified radius. Meanwhile, all UAVs can avoid obstacles in a flight environment, guaranteeing their flight safety. After that, the stability of the swarm system is validated by the Lyapunov stability theorem, and the condition of collision and the range of the enclosing configuration parameters are given. In addition, the concept of crowd entropy is used to measure the self-organization level of the swarm. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulation.

swarm of unmanned aerial vehicle, target enclosing, metric-distance communications, lattice enclosing configuration, crowd entropy, self-organization

doi: [10.1360/SST-2021-0284](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0284)