

文章编号:1006-2467(2020)09-0973-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.146

基于鸽群层级交互的有人/无人机集群一致性控制

赵建霞¹, 段海滨¹, 赵彦杰², 范彦铭³, 魏晨¹

(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. 中国电子科技集团公司
电子科学研究院, 北京 100041; 3. 中国航空工业集团公司 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘要: 有人/无人机共融集群中的有人机可弥补无人机在复杂环境中能力的不足. 利用鸽群层级交互机制能够高效传递信息的特点, 提出一种有人/无人机集群一致性控制方法. 根据动力学约束与人类行为特点, 建立无人机动力学模型和多通道的有人机操作员模型. 在此基础上, 通过鸽群层级交互机制构建集群系统的层级交互网络: 有人机对等级较高的无人机发送指令, 并通过层级网络影响整个无人机群体. 设计可节约资源的自适应率控制策略, 实现有人/无人机集群运动状态的一致性. 此外, 对系统稳定性进行简要分析. 仿真结果验证了方法的有效性.

关键词: 有人/无人机集群; 鸽群智能; 协同运动; 层级交互机制; 一致性控制

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

Consensus Control of Manned-Unmanned Aerial Vehicle Swarm Based on Hierarchy Interaction of Pigeons

ZHAO Jianxia¹, DUAN Haibin¹, ZHAO Yanjie², FAN Yanming³, WEI Chen¹

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. CETC, China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China; 3. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China)

Abstract: The manned aerial vehicle (MAV) in manned-unmanned aerial vehicle swarm (MUMS) can compensate for the inabilities of unmanned aerial vehicles (UAVs) in complex conditions. Taking the advantage of the information-efficient transmission of hierarchical interaction mechanism of pigeons, a novel method for consensus control of MUMS was proposed. According to the constraints and the human behavior characteristics, a dynamic model of UAVs and a multi-channel operator model were established, based on which, a hierarchical interaction network was constructed. In this network, the flight decisions of MAV affect the individuals with higher ranks. Then these UAVs affect the remaining UAVs through the leadership hierarchical network. Therefore, an adaptive containment control strategy was proposed to reduce the costs, and achieve motion consistency of MUMS. In addition, the stability of the system was analyzed. Moreover, the effectiveness of the proposed method was verified by simulations.

Key words: manned-unmanned aerial vehicle swarm (MUMS); pigeon intelligence; cooperative motion; hierarchical interaction mechanism; consensus control

收稿日期: 2020-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(91948204, U19B2033), 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2018AAA0102403)

作者简介: 赵建霞(1995-), 女, 云南省大理市人, 硕士生, 主要从事无人机自主控制的研究.

通信作者: 段海滨, 男, 教授, 博士生导师; E-mail: hbduan@buaa.edu.cn.

由于可靠性和智能化程度有限,无人机(UAV)对环境的感知和决策等智能系统还不能完全取代人的思维和判断,难以满足复杂战场环境中的高层次自主和智能要求,短时期内无法实现完全无人的作战模式^[1]. 所以有必要开展对有人机(MAV)和无人机集群协同作战的研究,充分利用无人机机动能力强、成本低、隐身性能好的优势,消除有人机在恶劣条件下执行任务的风险^[2]. 同时,充分利用有人机中人的综合判断能力,实现共融集群的综合决策和任务管理. 有人/无人机共融可以充分发挥各自的优势,从而增强整体的智能决策水平^[1].

针对有人/无人机集群(MUMS)的协作问题,Chen等^[3]针对决策结构特点,基于模糊认知图实现了有人机和无人机在行为决策方面的协作,但该方法没有深入研究有人机操作员的个体行为. Zhong等^[4]在任务层上按照任务类型将有人/无人机系统划分为3个层次级别,并针对不同层次构建相应的任务联盟. 但该方法没有对执行相应任务的飞行控制进行分析. 因此,对操作员行为特性的分析和集群一致性控制是研究的重点. 但是,集群控制中的协同交互大多采用平等交互模式,其信息传递效率和适应能力一般.

近年来,鸽群飞行中的层次结构引起了研究者们对集群运动和工程应用的广泛关注. 鸽群个体的智能水平虽然不高,但可以实现不同群集规模之间的群体同步. Nagy等^[5-6]发现了鸽群内部存在隐式分层网络. 在这种层级结构中存在与鸽群个体相对应的等级体系,总领导者处于绝对领导地位,在其影响下,其他个体按等级由高到低依次跟随. 此外,在鸽群层级交互网络中,低等级个体只能从高等级个体接受信息,即信息流是单向的. Zafeiris等^[7]证明了层级交互模式的信息传递速度比平等交互模式更快,效率更高. Flack等^[8]发现这种具有特定社会结构的层级交互模式可以补偿个体导航误差,提高群体导航精度. Luo等^[9]提出一种用于多无人机飞行的分布式控制的基于鸽群层级交互机制的框架,实现了无人机的集群控制. 虽然鸽群层级交互机制具有独特的优越性,并在无人机集群方面有所应用,但该机制没有扩展到有人/无人机集群系统中.

针对有人/无人机集群系统,提出一种基于鸽群层级交互机制的一致性控制方法. 首先,考虑无人机动力学和人的视觉与动作响应特性,建立有人/无人机模型. 其次,基于鸽群层级交互机制,构建有人/无人机集群系统层级网络结构. 相比于信息双向流通的平等交互模式,信息流单向的层级交互模式具有

高效的信息传递和良好的适应性能. 此外,提出一种自适应牵制控制策略,该策略可以有选择地对网络中的小部分节点施加控制,并自动调节控制参数,从而极大地节约了资源. 最后,进行仿真试验,对有人机操作员模型的可行性和有人/无人机一致性控制的有效性以及层级交互模式的优越性进行分析.

1 有人/无人机建模

有人/无人机共融集群系统整体结构主要由有人机(含操作员)、有人机和无人机之间的交互接口以及多架无人机^[10]共三部分组成. 有人/无人机的一致性控制问题是研究重点.

1.1 固定翼无人机的动力学模型

假设每架无人机都配备了空速、航向和高度自动驾驶仪,那么无人机全状态模型可简化为点质量模型^[9]:

$$\dot{X}_i = v_i \cos \gamma_i \cos \chi_i \quad (1)$$

$$\dot{Y}_i = v_i \cos \gamma_i \sin \chi_i \quad (2)$$

$$\dot{H}_i = v_i \sin \gamma_i \quad (3)$$

$$\dot{v}_i = \frac{T_i - D_i}{m_i} - g \sin \gamma_i \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_i = \frac{L_i \cos \phi_i - m_i g \cos \gamma_i}{m_i v_i} \quad (5)$$

$$\dot{\chi}_i = \frac{L_i \sin \phi_i}{m_i v_i \cos \gamma_i} \quad (6)$$

式中: X_i 是地面惯性坐标系 $O-x_g y_g z_g$ 中沿 x_g 轴的位移; Y_i 是沿 y_g 轴的位移; H_i 是高度; v_i 是速度,假设 v_i 等于空速且无任何干扰; γ_i 、 χ_i 和 ϕ_i 分别是飞行航迹角、倾斜角和航向角; T_i 、 D_i 和 L_i 分别是推力、阻力和升力; m_i 是质量; g 是重力加速度.

使用反馈线性化对非线性的模型进行预线性化:

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{u}_i \quad (7)$$

式中: \mathbf{x}_i 是无人机 i 的三维位置向量; \mathbf{u}_i 是虚拟加速度输入. 此外, v_i 和 \dot{H}_i 应满足固定翼无人机的实际动力约束,即

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max} \quad (8)$$

$$\dot{h}_{\min} \leq \dot{H}_i \leq \dot{h}_{\max} \quad (9)$$

式中: v_{\min} 、 v_{\max} 、 \dot{h}_{\min} 和 \dot{h}_{\max} 分别是最小速度、最大速度、最大俯冲速度和最大爬升速度.

1.2 多通道的有人机操作员模型

有人机操作员是一个具有非线性特性的生物系统,如果经过适当培训,在恒定条件下进行操作时,可以用准线性时不变模型描述^[11]. 图1为多通道的

有人机操作员模型,操作员通过受控设备 CD(如操纵杆等)控制整个系统(CE),同时遵循期望值并补偿力干扰(F_d).控制回路中存在两个频率响应函数 H_V 和 H_A ,这两种响应并行运行,表示对不同感知输入的响应.内、外部控制环分别表示操作员的动作和视觉响应.动作响应由手臂导纳 ADM 的倒数表示^[12].残余信号(n')被添加到操作员的输出中,以解决操作员的非线性行为^[13].

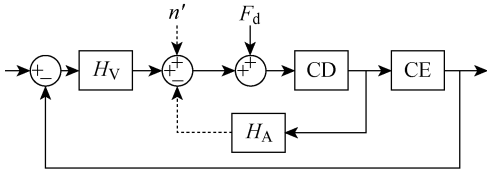


图1 多通道有人机操作员模型示意图

Fig. 1 Diagram of a multi-channel operator model

由于图1中虚线箭头所表示的信号无法测量,所以无法直接获得 H_V 和 H_A . Olivari 等^[13]提出了几种多通道感知和控制行为的建模方法.其中,谱密度估计法可以明确考虑控制任务的多环性质,不需要视觉误差功率的无干扰假设条件.因此基于谱密度法,估计目标位置输入到受控元件的闭环频率响应函数:

$$\hat{H}_{x_{e^{x_{CD}}}}(f) = \frac{\hat{S}_{x_{e^{x_{CD}}}}(f)}{\hat{S}_{x_{e^{x_e}}}}(f), \quad f \in \{f_e\} \quad (10)$$

式中: f 是频率; $\{f_e\}$ 是频率集; $\hat{S}_{x_{e^{x_{CD}}}}(f)$ 、 $\hat{S}_{x_{e^{x_e}}}(f)$ 分别表示期望位置和受控设备位置之间估计的互功率谱密度和期望位置的自功率谱密度.通过 F_d 和受控设备位置之间估计的互功率谱密度 $\hat{S}_{F_d^{x_{CD}}}(f)$ 和 F_d 的自功率谱密度 $\hat{S}_{F_d^{F_d}}(f)$, 可以估计干扰输入到受控元件的闭环频率响应函数:

$$\hat{H}_{F_d^{x_{CD}}}(f) = \frac{\hat{S}_{F_d^{x_{CD}}}(f)}{\hat{S}_{F_d^{F_d}}}(f), \quad f \in \{f_d\} \quad (11)$$

式中: $\{f_d\}$ 是力干扰输入的频率集.通过 $\hat{H}_{x_{e^{x_{CD}}}}(f)$ 和 $\hat{H}_{F_d^{x_{CD}}}(f)$ 可以估计有人机上操作员视觉和动作的频率响应函数:

$$\hat{H}_V(f) = \frac{\hat{H}_{x_{e^{x_{CD}}}}(f)}{\hat{H}_{F_d^{x_{CD}}}(f)} \quad (12)$$

$$\hat{H}_A(f) = \hat{H}_{F_d^{x_{CD}}}(f) H_{CD}(f) (H_{CD}(f) - H_{CD}(f) \hat{H}_{x_{e^{x_{CD}}}}(f) H_{CE}(f) - \hat{H}_{F_d^{x_{CD}}}(f))^{-1} \quad (13)$$

式中: H_{CD} 和 H_{CE} 分别是受控设备和整个系统的频率响应函数.

基于上述模型,设计如图2所示的有人/无人机共融集群系统控制结构.

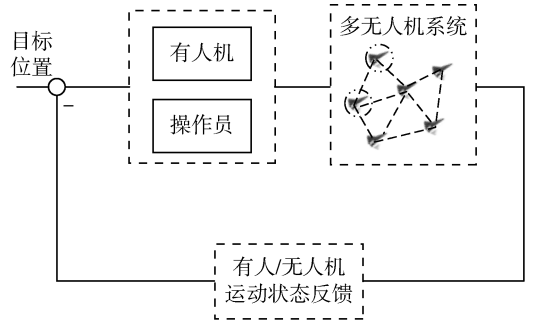


图2 有人/无人机共融集群系统控制结构图

Fig. 2 Control structure of MUMS system

2 基于鸽群层级交互机制的一致性控制

2.1 鸽群层级交互机制

在鸽群层级交互网络中,每只鸽子都跟随着具有较高等级的个体^[5].层级领导网络仅包含定向的传递性领导者与跟随者之间的关系^[14].在决定鸽群的运动方面,等级越高的鸽子越具影响力.考虑有向图 $G = (V, E, A)$, 其中 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ 和 $E \subseteq \{(V_i, V_j) \mid V_i, V_j \in V\}$ 是节点的集合, $A = (a_{ij}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 是 G 的非负邻接矩阵. G 的有向边 e_{ij} 由 (V_i, V_j) 表示,说明节点 V_i 可以从节点 V_j 接收信息.当且仅当 G 中存在有向边 (V_i, V_j) 时, A 中的对应元素 $a_{ij} > 0$.将拉普拉斯矩阵 $L = (l_{ij}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 定义为

$$l_{ij} = -a_{ij} \quad (i \neq j)$$

$$l_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}$$

若鸽子 i 和 j 之间的通信范围 R_c 和距离 R_{ij} 满足 $R_{ij} \leq R_c$, 则个体 i 和 j 之间存在通信连接 $e_{ij} = (V_i, V_j)$, 说明 e_{ij} 中存在领导-跟随关系^[15]. 鸽群层级分布如图3所示, 箭头表示鸽子间的领导-跟随关系. 规定跟随鸽在每一个等级中均为两只, 头鸽不受任何鸽子的领导^[16]. 基于该机制, 构建有人/无人机集群的层级交互拓扑结构, 等级较高的几架无人机将与有人机进行交互, 获得来自有人机的控制指令. 在有人机的飞行决策对等级较高的无人机产生影响后, 通过层级网络中的信息交互, 实现有人/无人机共融集群的一致性运动. 每个个体 i 的邻居集合:

$$\text{Neigh}_i = \{j \mid \|d_{ij}\| \leq R_c, j \neq i\} \quad (14)$$

规定无人机 N_L 为总领导者, 则所有无人机的等级可表示为

$\text{Rank}_i =$

$$\begin{cases} 0, & (i = N_L) \\ N_L - i, & (i = N_L - 1, N_L - 2, \dots, 1) \\ i - N_L, & (i = N_L + 1, N_L + 2, \dots, N) \end{cases} \quad (15)$$

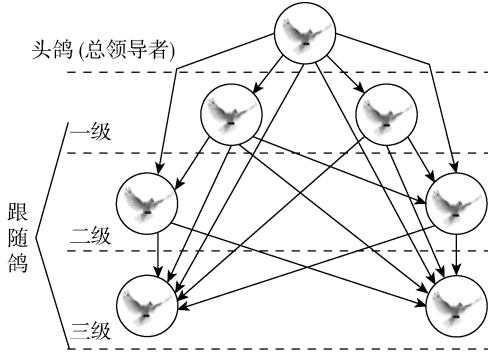


图3 鸽群层级示意图

Fig. 3 Hierarchical leadership network of pigeons

2.2 有人/无人机协同运动的牵制控制策略

定义可以与有人机进行交互的无人机集合为 N_h ，即 N_h 中的无人机会直接接收到有人机的输入，有人机也仅能在属于 N_h 的无人机中获得信息。考虑如下预期控制目标：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\Delta \mathbf{x}_i(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_e(t)\| = 0 \quad (16)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\Delta \mathbf{v}_i(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_e(t)\| = 0 \quad (17)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, N+1$ ； $\Delta \mathbf{x}_i(t)$ 和 $\Delta \mathbf{v}_i(t)$ 分别是无人机 i 的位置和速度的误差向量； $\mathbf{x}_e(t)$ 是期望位置； $\mathbf{v}_e(t)$ 是期望速度； $\mathbf{v}_i(t)$ 是无人机 i 的速度向量；且

$$\mathbf{v}_i(t) = [\mathbf{v}_i^X(t) \quad \mathbf{v}_i^Y(t) \quad \mathbf{v}_i^H(t)]$$

所有无人机或有人机都渐进趋近 $\mathbf{x}_e(t)$ 和 $\mathbf{v}_e(t)$ ，从而实现运动同步。

基于自适应牵制控制策略^[17]，设计如下控制输入：

$$\mathbf{u}_i(t) = d_i \mathbf{u}_i^h(t) - \lambda(t) [d_i (\Delta \mathbf{x}_i(t) + \Delta \mathbf{v}_i(t)) + \sum_{k=1}^{\text{Neigh}_i} l_{ik} (\Delta \mathbf{x}_k(t) + \Delta \mathbf{v}_k(t))] \quad (18)$$

式中： $\mathbf{u}_i^h(t)$ 是来自有人机的控制输入； d_i 是交互控制增益，若无人机 i 可与有人机交互，则 $d_i > 0$ ，否则 $d_i = 0$ ； $\lambda(t)$ 是自适应控制增益，且

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{1}{2} e^{\mu t} \xi(t)^T \mathbf{K} \xi(t)$$

其中：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 & \mathbf{K}_0 \\ \mathbf{K}_0 & \mathbf{K}_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_0 = (\mathbf{L} + \mathbf{D}) \otimes \mathbf{I}_n$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$$

\mathbf{I}_n 为 n 阶单位矩阵； μ 为一个大于 0 的常数； $\xi(t)$ 为

所有个体当前运动状态与期望值之差的列向量。此外， \mathbf{I}_{N_n} 和 $\mathbf{0}_{N_n}$ 分别表示 $N \times n$ 维的单位矩阵和元素均为 0 的矩阵； $\mathbf{0}_{(N_n) \times 1}$ 表示元素有 $N \times n$ 个 0 的列向量。

部分无人机将自身的信息发送给有人机，操作人员可以通过视觉反馈^[18] 获得可交互的无人机的平均位置 $\mathbf{x}_{\text{ave}}(t)$ ，从而确定 $\mathbf{u}_i^h(t)$ ，且 $\mathbf{u}_i^h(t)$ 是有界的。设

$$\mathbf{U}^h = [d_1 \mathbf{u}_1^h(t) \quad d_2 \mathbf{u}_2^h(t) \quad \dots \quad d_N \mathbf{u}_N^h(t)]^T$$

$$d_{\max} = \max(d_i), \quad i \in N_h$$

则存在常数 $\alpha > 0$ ，令

$$\begin{aligned} \|\mathbf{U}^h(t)\| &= \sqrt{\sum_{i \in N_h} \|d_i \mathbf{u}_i^h(t)\|^2} \leq \\ & d_{\max} \sqrt{|N^h|} \|\mathbf{x}_{\text{ave}}(t) - \mathbf{x}_e(t)\| = \\ & \frac{d_{\max}}{\sqrt{|N^h|}} \left\| \sum_{k \in N_h} (\mathbf{x}_k(t) - \mathbf{x}_e(t)) \right\| \leq \\ & \alpha \Delta \mathbf{x}(t)^T \Delta \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

式中： $|N^h|$ 为集合 N^h 中的数量； $\Delta \mathbf{x}(t)$ 为位置误差向量，且

$$\Delta \mathbf{x}(t) = [\Delta \mathbf{x}_1(t) \quad \Delta \mathbf{x}_2(t) \quad \dots \quad \Delta \mathbf{x}_{N+1}(t)]^T$$

由式(7)和(18)，对个体 i 的位置和速度误差进行求导：

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \Delta \mathbf{v}_i(t) \\ \Delta \dot{\mathbf{v}}_i(t) &= d_i \mathbf{u}_i^h(t) - \lambda(t) [d_i (\Delta \mathbf{x}_i(t) + \Delta \mathbf{v}_i(t)) + \sum_{k=1}^{\text{Neigh}_i} l_{ik} (\Delta \mathbf{x}_k(t) + \Delta \mathbf{v}_k(t))] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

假设存在常数 $\alpha > 0$ 、 $\lambda^* > 0$ ，满足 $\mathbf{L} + \mathbf{D}$ 的最小特征值 $\lambda_{\min} > 1$ 且 $\mathbf{\Gamma}$ 为负定矩阵时，系统在控制律的作用下可达到期望的位置和速度。其中：

$\mathbf{\Gamma} =$

$$\begin{bmatrix} (1 + 2\alpha) \mathbf{I}_{N_n} + (\mu - \lambda^*) \mathbf{K}_0 & \mu \mathbf{I}_{N_n} + (1 - \lambda^*) \mathbf{K}_0 \\ \mu \mathbf{I}_{N_n} + (1 - \lambda^*) \mathbf{K}_0 & (3 + \mu) \mathbf{I}_{N_n} - \lambda^* \mathbf{K}_0 \end{bmatrix}$$

考虑李雅普诺夫函数：

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{1}{2} \xi^T(t) \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 & \mathbf{I}_{N_n} \\ \mathbf{I}_{N_n} & \mathbf{I}_{N_n} \end{bmatrix} \xi(t) + \\ & \frac{1}{2} e^{-\mu t} (\lambda(t) - \lambda^*)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

由上述条件可知，该函数是正定的，对其求导：

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \xi^T(t) \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 & \mathbf{I}_{N_n} \\ \mathbf{I}_{N_n} & \mathbf{I}_{N_n} \end{bmatrix} \dot{\xi}(t) - \\ & \frac{1}{2} \mu e^{-\mu t} (\lambda(t) - \lambda^*)^2 + \\ & e^{-\mu t} (\lambda(t) - \lambda^*) \dot{\lambda}(t) = \\ & \xi^T(t) \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 & \mathbf{I}_{N_n} \\ \mathbf{I}_{N_n} & \mathbf{I}_{N_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(N_n) \times 1} \\ \mathbf{U}^h \end{bmatrix} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \xi^T(t) \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N_n} & \mathbf{K}_0 \\ \mathbf{K}_0 & 2\mathbf{I}_{N_n} \end{bmatrix} \xi(t) - \\ & \frac{1}{2} \mu e^{-\mu t} (\lambda(t) - \lambda^*)^2 - \\ & \frac{1}{2} \lambda^* \xi^T(t) \mathbf{K} \xi(t) \end{aligned} \quad (22)$$

根据矩阵不等式 $2\mathbf{x}^T \mathbf{y} \leq \mathbf{x}^T \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{y}^T \mathbf{G}^{-1} \mathbf{y}$, 由式(22)的第一项推导可得:

$$\begin{aligned} & \xi^T(t) \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 & \mathbf{I}_{N_n} \\ \mathbf{I}_{N_n} & \mathbf{I}_{N_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(N_n) \times 1} \\ \mathbf{U}^h \end{bmatrix} \leq \\ & \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T(t) \Delta \mathbf{x}(t) + \|\mathbf{U}^h\| + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{v}^T(t) \Delta \mathbf{v}(t) \leq \\ & \frac{1}{2} \xi^T(t) \begin{bmatrix} (1+2\alpha)\mathbf{I}_{N_n} & \mathbf{0}_{N_n} \\ \mathbf{0}_{N_n} & \mathbf{I}_{N_n} \end{bmatrix} \xi(t) \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $\Delta \mathbf{v}(t)$ 为速度误差向量, 且

$$\Delta \mathbf{v}(t) = [\Delta \mathbf{v}_1(t) \quad \Delta \mathbf{v}_2(t) \quad \cdots \quad \Delta \mathbf{v}_{N+1}(t)]^T$$

由于 \mathbf{I} 为负定矩阵且 $V(t)$ 是正定的, 所以推导可得:

$$\begin{aligned} & \dot{V}(t) \leq \frac{1}{2} \xi^T(t) \mathbf{I} \xi(t) - \\ & \frac{1}{2} \mu \xi^T(t) \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 & \mathbf{I}_{N_n} \\ \mathbf{I}_{N_n} & \mathbf{I}_{N_n} \end{bmatrix} \xi(t) - \\ & \frac{1}{2} \mu e^{-\mu t} (\lambda(t) - \lambda^*)^2 \leq -\mu V(t) < 0 \end{aligned} \quad (24)$$

因此, 根据李雅普诺夫稳定性理论, 系统在控制律作用下可以实现对位置和速度的一致性控制。

3 仿真实验验证

通过仿真实验验证多通道有人机操作员模型的可行性和自适应牵制控制策略的有效性, 同时与平等交互模式下的有人/无人机共融集群的运动结果对比, 验证采用鸽群层级交互机制的优越性。

基于文献[13]参数值, 可得到在复频域(s 域)上的多通道操作员模型。通过三阶低通滤波器 $H_n(s)$ 滤波后的高斯白噪声获得模型中的残余噪声:

$$H_n(s) = \frac{12.7^3 K_n}{(s + 12.7)(s^2 + 6.604s + 12.7^2)} \quad (25)$$

式中: K_n 为增益, 且 $K_n = 2.12$ 。视觉响应环节通过增益、超前滞后滤波器和时间延迟建模:

$$H_v(s) = \frac{K_v(1 + sT_1)}{(1 + sT_2)} e^{-\tau s} \quad (26)$$

式中: $K_v = 20 \text{ N/rad}$; $T_1 = 0.3 \text{ s}$; $T_2 = 0.04 \text{ s}$; $\tau = 0.2701 \text{ s}$ 。动作响应环节的传递函数为

$$H_A(s) = \frac{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4}{s^3 + b_1 s^2 + b_2 s + b_3} \quad (27)$$

式中: $a_1 = 4.566 \times 10^{-6}$; $a_2 = 0.0046$; $a_3 = 1.33$;

$$a_4 = 97.52; b_1 = 82; b_2 = 721.2; b_3 = 1.167 \times 10^{-4}.$$

人为因素限制了控制回路中的动力含量, 因此带宽要求不应太高^[13]。有人机操作员模型的闭环频率响应函数的波特图如图 4 所示。其中, ω 为频率, G' 为响应增益, θ 为相位。当 G' 下降至 -3 dB 时, ω 约为 2.44 rad/s , 满足文献[13]中的带宽条件。

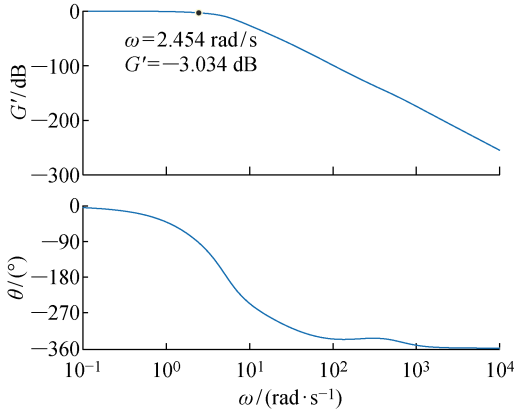


图 4 闭环频率响应

Fig. 4 Closed-loop frequency response

设有 1 架有人机和 10 架无人机, 初始速度在 $0 \sim 25 \text{ m/s}$ 内随机生成, 初始位置在点 $(35, 35, 15) \text{ m}$ 附近随机生成。目标位置向量为 $(200, 200, 15) \text{ m}$, 目标速度为 10 m/s 。当抵达目标点附近时, 仿真停止。有人机操作员在生理和心理等方面存在限制, 因此可交互的无人机数量有限。假设有人机可与 3 架无人机交互, 则在平等交互模式下, 有人机将选择与其距离最近的 3 架无人机。而在层级交互模式下, 有人机将选择等级最高的 3 架无人机。与有人机交互的无人机 i 对应的交互控制增益 $d_i = 30$ 。在层级交互模式下, 集群的三维运动轨迹如图 5 所示。由图可知, 无人机群体在高层级无人机个体和有人机的引领下抵达目标点。

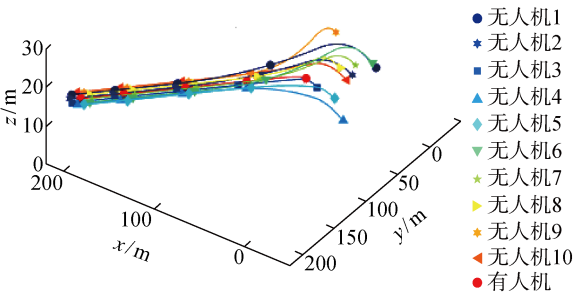


图 5 三维运动轨迹

Fig. 5 Three dimensional trajectory

图 6 为个体在层级交互模式下速度和位置的均方根误差(RMSE_v 和 RMSE_p), 所有个体的 RMSE_v

和 $RMSE_p$ 均趋于 0. 此外,可以采用平均归一化速度的绝对值作为序参量^[19]来衡量同步程度:初始时刻的运动较为混乱无序,序参量接近 0;由计算可知,仿真开始后,层级交互模式的序参量迅速上升至

0.942 8,而平等交互模式的序参量小于 0.8,说明层级交互模式下集群的同步程度较高.

图 7 为集群在其数量 $N'=11$ 时,不同交互时延(t')下位置和速度的均方根误差平均值($RMSE_p$

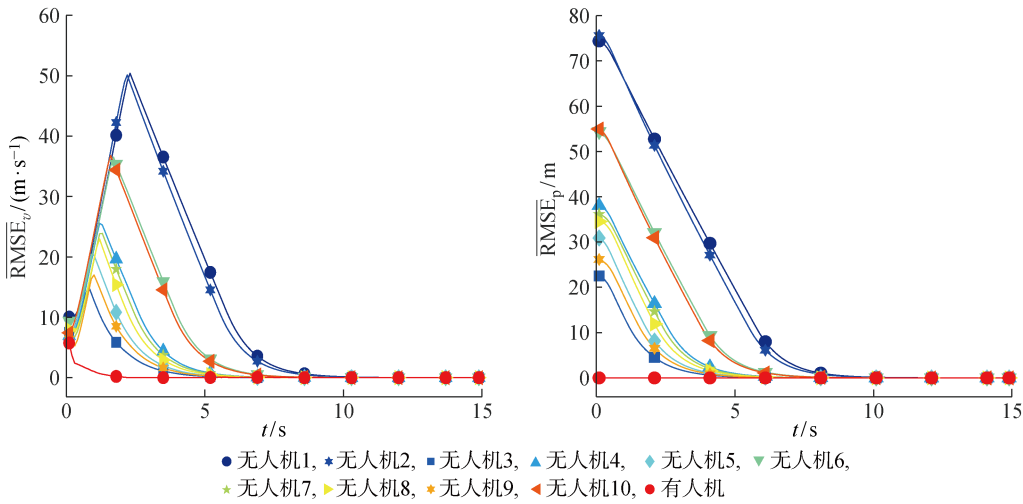


图 6 有人机与无人机的均方根误差
Fig. 6 RMSE of MAV and UAVs

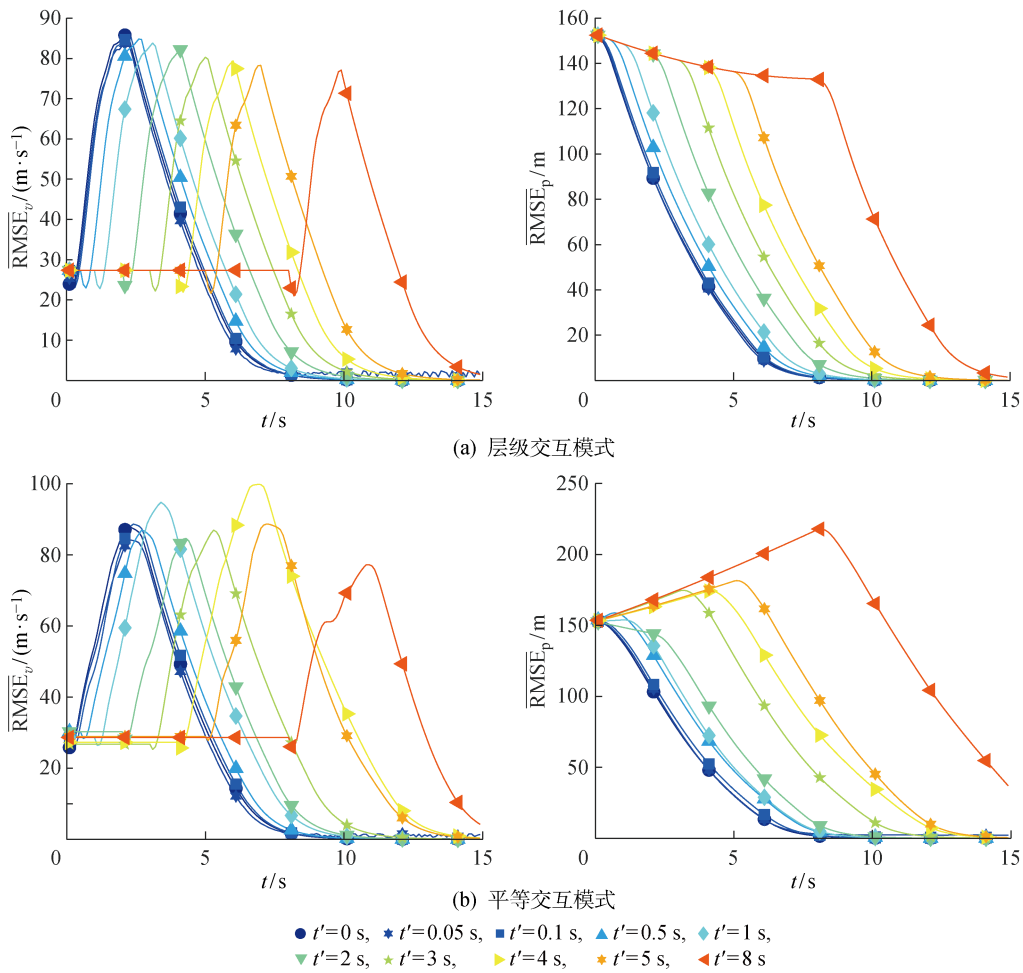


图 7 不同模式下的交互时延影响
Fig. 7 Effect of interaction delays in different modes

和 $\overline{\text{RMSE}}_v$). 由于交互时延的影响,在初始阶段,无法获得其他个体的状态信息,所以 $\overline{\text{RMSE}}_v$ 基本保持不变,但 $\overline{\text{RMSE}}_p$ 较大,且不断增加. 在层级交互模式中, $\overline{\text{RMSE}}_p$ 和 $\overline{\text{RMSE}}_v$ 均在限定时间内收敛至 0;而在平等交互模式中,相同时延下 $\overline{\text{RMSE}}_p$ 和 $\overline{\text{RMSE}}_v$ 的收敛性能较差,因此层级交互模式更加高效协调.

在 $t'=1\text{ s}$ 的情况下,对不同集群数量的情况进行仿真,如图 8 所示. 在平等交互模式中,随着集群数量的增加,同一时刻的 $\overline{\text{RMSE}}_p$ 和 $\overline{\text{RMSE}}_v$ 均有所增加;而在层级交互模式中,集群数量的增加并未对 $\overline{\text{RMSE}}_p$ 和 $\overline{\text{RMSE}}_v$ 产生明显影响. 结果表明:层级交互模式对集群数量变化的适应性比平等交互模式强.

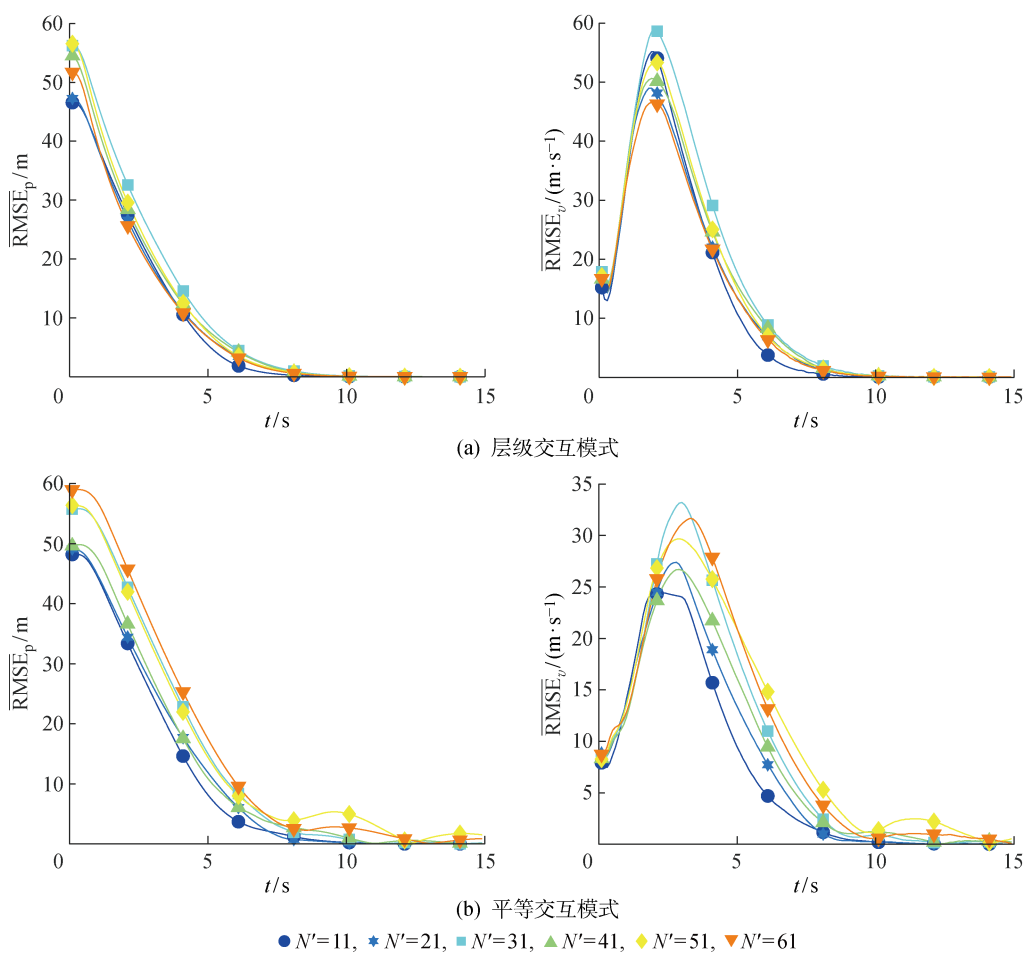


图 8 不同模式下的集群数量影响
Fig. 8 Effect of swarm numbers in different modes

4 结语

针对有人机和多无人机系统的一致性控制问题,在建立的多无人机系统动力学模型和多通道有人机操作员模型的基础上,通过鸽群层级交互机制构建集群系统层级交互网络,设计了一种可节约资源的自适应牵制控制策略,实现有人/无人机集群运动的同步,并对系统稳定性进行了简要分析. 通过仿真试验,证明了该有人机操作员模型的合理性. 通过对比两种不同交互模式下的仿真结果,验证了鸽群层级交互机制的有效性和适用性.

参考文献:

[1] 牛轶峰, 沈林成, 李杰, 等. 无人-有人机协同控制关键问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 538-554.
NIU Yifeng, SHEN Lincheng, LI Jie, *et al.* Key scientific problems in cooperation control of unmanned aircraft systems[J]. **Scientia Sinica (Informationis)**, 2019, 49(5): 538-554.
[2] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
DUAN Haibin, QIU Huaxin. Unmanned aerial vehi-

- cle swarm autonomous control based on swarm intelligence[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [3] CHEN J, XU J, DING L, *et al.* Limited intervention collaborative decision-making of MAV/UAV team based on FCM[C]//**2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [4] ZHONG Y, YAO P Y, ZHANG J Y, *et al.* Formation and adjustment of manned/unmanned combat aerial vehicle cooperative engagement system[J]. **Journal of Systems Engineering and Electronics**, 2018, 29(4): 756-767.
- [5] NAGY M, AKOS Z, BIRO D, *et al.* Hierarchical group dynamics in pigeon flocks[J]. **Nature**, 2010, 464(7290): 890-893.
- [6] NAGY M, VASARHELYI G, PETTIT B, *et al.* Context-dependent hierarchies in pigeons[J]. **PNAS**, 2013, 110(32): 13049-13054.
- [7] ZAFEIRIS A, VICSEK T. Advantages of hierarchical organization: From pigeon flocks to optimal network structures[M]//**Research in the Decision Sciences for Global Business: Best Papers from the 2013 Annual Conference**. London: Pearson FT Press, 2015: 21-34.
- [8] FLACK A, BIRO D, GUILFORD T, *et al.* Modeling group navigation: Transitive social structures improve navigational performance[J]. **Journal of the Royal Society, Interface**, 2015, 12(108): 20150213.
- [9] 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.
- [10] QU Z H. An impact equivalence principle of separating control designs for networked heterogeneous affine systems[J]. **IFAC Proceedings Volumes**, 2012, 45(26): 210-215.
- [11] NIEUWENHUIZEN F M, ZAAL P M T, MULDER M, *et al.* Modeling human multichannel perception and control using linear time-invariant models[J]. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, 2008, 31(4): 999-1013.
- [12] ABBINK D A, MULDER M, VAN DER HELM F C T, *et al.* Measuring neuromuscular control dynamics during car following with continuous haptic feedback[J]. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Cybernetics: A Publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society**, 2011, 41(5): 1239-1249.
- [13] OLIVARI M, NIEUWENHUIZEN F M, VENROO-IJ J, *et al.* Methods for multiloop identification of visual and neuromuscular pilot responses[J]. **IEEE Transactions on Cybernetics**, 2015, 45(12): 2780-2791.
- [14] PETTIT B, PERNA A, BIRO D, *et al.* Interaction rules underlying group decisions in homing pigeons[J]. **Journal of the Royal Society, Interface**, 2013, 10(89): 20130529.
- [15] QIU H X, DUAN H B. Multiple UAV distributed close formation control based on in-flight leadership hierarchies of pigeon flocks[J]. **Aerospace Science and Technology**, 2017, 70: 471-486.
- [16] 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.
QIU Huaxin, DUAN Haibin, FAN Yanming. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks[J]. **Control Theory & Applications**, 2015, 32(10): 1298-1304.
- [17] ZHOU B L, YANG Y Q, XU X Y. The group-delay consensus for second-order multi-agent systems by piecewise adaptive pinning control in part of time interval[J]. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 2019, 513: 694-708.
- [18] ATMAN M W S, HATANAKA T, QU Z H, *et al.* Motion synchronization for semi-autonomous robotic swarm with a passivity-short human operator[J]. **International Journal of Intelligent Robotics and Applications**, 2018, 2(2): 235-251.
- [19] 邱华鑫, 段海滨, 范彦铭, 等. 鸽群交互模式切换模型及其同步性分析[J/OL]. (2020-12-05)[2020-06-16]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/23.1538.TP.20191205.1011.004.html>.
QIU Huaxin, DUAN Haibin, FAN Yanming, *et al.* Pigeon flock interaction pattern switching model and its synchronization analysis [J/OL]. (2020-12-05)[2020-06-16]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/23.1538.TP.20191205.1011.004.html>.

(本文编辑:孙伟)