

# 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队

邱华鑫<sup>1</sup>, 段海滨<sup>1†</sup>, 范彦铭<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 飞行器控制一体化技术重点实验室 仿生自主飞行系统研究组, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

**摘要:** 受启发于无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)编队飞行与生物群体社会性行为的相似性, 本文提出了一种基于鸽群行为机制的多无人机自主编队控制方法. 首先通过模仿鸽群特有的层级行为, 建立了鸽群行为机制模型. 该模型在已有群集模型基础上, 采用有向图和人工势场理论对鸽群中的拓扑结构和领导机制进行建模. 在深入分析无人机自主编队飞行仿生机理的基础上, 设计了一种基于鸽群行为机制的无人机自主编队控制器. 该控制器以鸽群行为机制模型为核心, 还包含两个辅助环节, 即控制指令解算器和状态转换器. 最后, 通过系列仿真实验验证了无人机群可在本文所设计的无人机自主编队控制器作用下形成预期的编队队形, 并可在复杂长机运动条件下保持队形.

**关键词:** 无人机; 编队控制; 鸽群层级行为; 有向图; 人工势场

**中图分类号:** V249 **文献标识码:** A

## Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks

QIU Hua-xin<sup>1</sup>, DUAN Hai-bin<sup>1†</sup>, FAN Yan-ming<sup>2</sup>

(1. Bio-inspired Autonomous Flight Systems Research Group, Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang Liaoning 110035, China)

**Abstract:** Inspired by the similarity between the unmanned aerial vehicle (UAV) formation flight and the social behavior of biological populations, we propose in this paper a method of autonomous formation control for multiple UAVs based on the mechanism in the pigeon flock. Firstly, the model of the pigeon behavior mechanism is built by mimicking the specific context-dependent hierarchies in pigeon flocks. It is based on the existing flock model, and the topological structure and leadership in pigeon flocks are modeled by using digraph and potential field theory, respectively. Then, the bionic mechanism of multiple UAV autonomous formation is analyzed further, and a formation keeping controller based on the pigeon flock behavior mechanism is designed. The controller, with the model of the pigeon behavior mechanism as the core, includes two assistant parts: the control instruction solver and the state transformer. Finally, a series of simulation results are given to show that the UAVs can form an expected flight formation with the designed controller, and keep the formation under serious conditions of complex leader motion.

**Key words:** unmanned aerial vehicles; formation control; hierarchies in pigeons; digraph; potential field

## 1 引言(Introduction)

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)是一种近年来备受研究者关注的无人驾驶飞行器, 其在执行搜索救援、监督执法、空中测绘和航空摄影等方面的潜在价值逐渐被挖掘利用<sup>[1]</sup>. 多无人机协同自主编队飞行是近年来的一个前沿领域, 可充分利用有限单机资

源, 共同执行复杂任务<sup>[2]</sup>. 正因如此, 针对多无人机自主编队控制开展深入研究具有十分重要意义.

Xie等人提出了两种非线性鲁棒控制算法来解决相应的编队控制器设计问题<sup>[3]</sup>. 胡云安、左斌和李静利用退火递归神经网络极值搜索算法解决了紧密编队中僚机所需动力最小化的问题<sup>[4]</sup>. Duan和Liu利用

收稿日期: 2015-04-18; 录用日期: 2015-06-07.

†通信作者. E-mail: hbduan@buaa.edu.cn; Tel: +86 10-82317318.

国家杰出青年科学基金项目(61425008), 国家自然科学基金重点项目(61333004), 国家自然科学基金面上项目(61273054), 中组部青年拔尖人才支持计划项目(2013), 航空科学基金项目(2015ZA51013)资助.

Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (61425008), National Natural Science Foundation of China—State Key Program (61333004), National Natural Science Foundation of China—General Program (61273054), Top-Notch Young Talents Program of China (2013) and Aeronautical Science Foundation of China (2015ZA51013).

非线性双模滚动时域控制器来解决复杂环境下的编队问题<sup>[5]</sup>. Peng和Liu通过组合卡尔曼滤波器和PID控制器设计了一种新的无人机编队控制器<sup>[6]</sup>. 魏瑞轩、茹常剑和祁晓明提出了一种基于纳什谈判的分布式预测控制新方法<sup>[7]</sup>.

无人机编队飞行与生物群体社会性行为存在相似性. 通过分析生物系统行为规律并从中获取灵感, 将是解决无人机编队飞行关键技术的一种有效方法. 而将生物群集运动理论应用于多机器人系统控制的研究已逐步趋于成熟<sup>[8-12]</sup>, 本文尝试在此基础上, 将特定鸟类群体—鸽群的行为机制引入到无人机编队飞行控制中.

鸽子因其具有惊人的导航能力、奇妙的群体飞行机制和独特的眼睛布局, 又因其易于饲养便于观察, 而备受研究者青睐. 在导航能力方面, Guilford<sup>[13]</sup>发现鸽子会在寻的旅程不同阶段使用不同导航工具, 前期依赖磁场, 后期依赖地标<sup>[14]</sup>. Whiten<sup>[15]</sup>发现太阳高度也会影响鸽子导航. Duan和Qiao<sup>[16]</sup>受此启发, 提出了一种新型仿生智能计算方法——鸽群优化(pigeon-inspired optimization, PIO), 该算法在许多优化问题中求解性能全局性良好<sup>[17-18]</sup>. 在群体机制方面, Máté Nagy 和 Zsuzsa Akos等人<sup>[19-20]</sup>通过微型全球定位系统(global positioning system, GPS)观测鸽群飞行, 发现其内部等级森严, 这不仅存在于飞行中的跟随行为, 也体现在进食过程中的先后顺序.

本文在已有群集模型——Vicsek模型<sup>[21]</sup>和A/R模型<sup>[22]</sup>的基础上, 针对鸽群飞行机制中特有的层级行为进行建模: 一方面, 利用有向图描述鸽群拓扑结构, 建立鸽群层次结构模型; 另一方面选用人工势场法<sup>[23]</sup>描述鸽群有向图中的边集, 即对上级鸽子对下级的领导作用线建模.

本文组织结构为: 第2部分, 基于有向图和人工势场法对鸽群行为机制中的层级结构和领导作用进行了建模; 第3部分, 在给出无人机模型的基础上, 设计了一种基于鸽群行为机制的无人机自主编队控制器; 第4部分, 通过仿真实验验证了本文所设计的自主编队控制器的有效性与稳定性.

## 2 鸽群行为机制建模 (Model of the pigeon behavior mechanism)

### 2.1 鸽群行为机制 (Pigeon behavior mechanism)

鸽群行为机制中, 不同个体间存在严格等级关系. Máté Nagy和Zsuzsa Akos<sup>[19-20]</sup>借助GPS设备获取受试鸽子在不同时刻的位置和速度. 鸽子间速度关联性可用归一化速度内积表示, 进而借助比较速度内积大小, 判断不同时刻每只跟随鸽所跟随的鸽子.

研究发现, 鸽群领导机制并不是实验前所预期的类似于狼群等其他陆地群体的模式. 鸽群中除头鸽外,

其他跟随鸽也存在层次等级: 头鸽处于绝对领导地位, 其余跟随鸽下层服从上层, 但无法影响上层. 即: 下层鸽子行为不仅受头鸽影响, 也受其他上层鸽子的影响, 而往往来自于临近上级影响更为直接迅速. 基于上述复杂作用网络, 可建立鸽群个体间的紧密关系, 从而使鸽群飞行成为一场让人惊叹的特技表演.

本文针对上述鸽群行为机制, 从层次结构和领导作用两方面建立鸽群行为机制模型.

### 2.2 基于图论的鸽群层级建模 (Model of hierarchies in pigeons based on graph theory)

鸽群层级结构可用有向图 $\hat{D} = (\hat{V}, \hat{E})$ 描述, 其中: 顶点集 $\hat{V} = \{\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_n\}$ , 为 $n$ 只鸽子; 边集 $\hat{E} = \{\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_m\}$ , 为上级对下级的领导作用线. 令 $N_i$ 为对鸽子 $i$ 存在领导作用的上级鸽子集合,

$$N_i = \{j, k, \dots\} \subseteq \{1, 2, \dots, n\}. \quad (1)$$

这里, 可人为规定每只鸽子的层次等级, 及上级鸽子的领导范围. 仿照实际鸽群中的层级网络, 简化后的鸽群层级有向图如图1所示. 图1中, 圆圈表示鸽子, 即有向图中的顶点集, 箭头表示鸽子间的领导关系, 即边集. 规定跟随鸽除一、二级外, 其余等级均设两只, 并均受三只上级鸽子的领导. 头鸽不受任何鸽子领导, 一、二级跟随鸽均设为一只, 并且一级只受头鸽领导, 二级受头鸽和一级领导. 综上, 鸽群中的领导关系, 可用 $N_i$ 表示为

$$N_i = \begin{cases} \emptyset, & i = 1, \\ 1, & i = 2, \\ 1, 2, & i = 3, \\ 1, 2, 3, & i = 4, \\ i-4, i-2, i-1, i=2k, k=\{3, 4, \dots\}, \\ i-3, i-2, i-1, i=2k+1, k=\{2, 3, \dots\}. \end{cases} \quad (2)$$

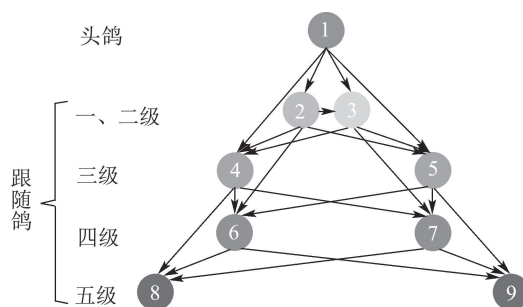


图 1 鸽群层级有向图

Fig. 1 Digraph of hierarchies in pigeons

从空间队形确定的角度, 可解释上述设定的意义. 假设期望鸽群以“人”字形编队飞行, 且鸽子间的领导关系, 可起到聚集、防撞和在规定间距处稳定的作用. 则如图2所示头鸽对一级跟随鸽的领导作用, 可使其在以头鸽为中心, 规定间距为半径的圆周上找到稳

定点. 此时, 一级跟随鸽的稳定位置有无数种可能性, 而当一级跟随鸽稳定后, 二级跟随鸽, 受头鸽和一级跟随鸽领导, 其稳定位置有如图2所示两种可能性. 而当一、二级跟随鸽均确定位置后, 鸽群编队队形唯一确定. 即其他跟随鸽的稳定位置唯一确定, 不再具有多余自由度. 根据定理, 与空间内不共线三点的确定距离可唯一确定一点, 故其他等级的跟随鸽必受至少三只上级鸽子的领导.

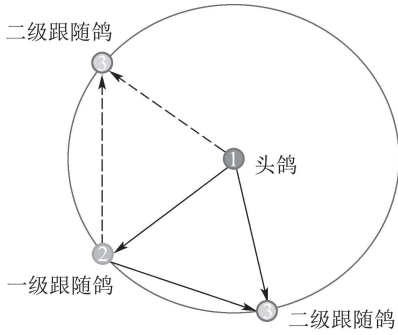


图2 鸽群编队的确定过程

Fig. 2 Determination procedure for pigeon formation

### 2.3 基于人工势场法的鸽群领导作用建模 (Model of leadership in pigeons based on potential field method)

鸽群中上级对下级的领导作用, 使下级在避免与上级发生碰撞(即防撞)的基础上, 尝试与其保持接近(即聚集), 同时试图与其速度匹配(即速度一致).

参照文献[24–25], 考虑均视作质点的 $n$ 只鸽子在3维的欧式空间内无障碍飞行, 则每只鸽子的动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{X}^i = v^i, \\ m^i \dot{v}^i = u^i - k^i v^i, \end{cases} \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

式中:  $X^i \in \mathbb{R}^3$ 为鸽子 $i$ 的位置矢量,  $v^i \in \mathbb{R}^3$ 为鸽子 $i$ 的速度矢量,  $m^i > 0$ 为鸽子 $i$ 的质量,  $u^i \in \mathbb{R}^3$ 为作用在鸽子上的控制输入,  $-k^i v^i$ 为速度阻尼项,  $k^i > 0$ 为速度衰减增益,  $X^{ij} = X^i - X^j$ 为鸽子 $i$ 与 $j$ 间的相对位置矢量.

鸽子 $i$ 的控制量 $u^i$ 可用下式表示:

$$u^i = \alpha^i + \beta^i + \gamma^i + k^i v^i, \quad (4)$$

式中:  $\alpha^i$ 为鸽群中人工势场控制分量, 用于保持鸽群间距, 其源于势函数 $P^i$ (表征鸽子 $i$ 与其受控上级间相对距离的函数),  $\beta^i$ 为鸽子 $i$ 与其受控上级速度趋同的控制分量,  $\gamma^i$ 为鸽子 $i$ 速度趋于期望速度的控制分量, 其依赖于头鸽的设定输入信号(即期望速度 $v^1$ ).

鸽子 $i$ 与其受控上级 $j$  ( $j \in N_i$ )间的势函数表示为

$$P^{ij}(\|X^{ij}\|) = \ln \|X^{ij}\|^2 + \frac{d_{ij}^2}{\|X^{ij}\|^2}, \quad (5)$$

式中 $d_{ij}$ 为鸽子 $i$ 与其受控上级 $j$ 间的期望距离.

跟随鸽 $i$ 的控制量 $u^i$ 为三维, 一、二维 $u_{1,2}^i$ 是水平控制量, 第三维 $u_3^i$ 是垂直控制量. 鸽子 $i$ 的水平控制量 $u_{1,2}^i$ 定义如下:

$$u_{1,2}^i = (-K_p \sum \nabla_{\|X_{1,2}^{ij}\|} P^{ij} - K_v \sum (v_{1,2}^i - v_{1,2}^j) - m^i(v_{1,2}^i - v_{1,2}^1)) \cdot w_1 + k^i v_{1,2}^i, \quad (6)$$

式中:  $K_v$ 为速度反馈增益因子,  $K_p$ 为人工势场增益因子, 二者均大于0,  $w_1$ 为水平控制量调节因子.

垂直控制量 $u_3^i$ 定义如下:

$$u_3^i = (-K_h(X_3^i - X_3^j) - K_v \sum (v_3^i - v_3^j) - m^i(v_3^i - v_3^1)) \cdot w_2 + k^i v_3^i, \quad (7)$$

式中:  $K_h$ 为高度反馈增益因子, 用于调节鸽群形成编队以及编队保持时高度反馈的力度,  $w_2$ 为垂直控制量调节因子.

### 3 基于鸽群行为机制的无人机编队控制 (UAV formation control based on the behavior mechanism in pigeon flocks)

鸽群层级行为对无人机自主编队控制有很大启发, 具体可体现在:

首先, 鸽群领导机制不同于一般陆地群体的单一首领机制. 因为飞行中, 由于通讯距离和视野限制, 每只鸽子很难实时发现头鸽, 并实时跟随. 因此, 必须参照通讯范围内或视野范围内的其他鸽子. 这一现象与无人机协同自主编队飞行有相通之处, 在无人机聚集过程中, 不能保证长机时刻处于每架僚机的通讯范围内, 因此必须建立僚机与其他僚机间的通讯联系.

其次, 鸽群个体间并不是两两均可构成联系, 而是存在严格等级, 且个体与群体的联系方式并不唯一. 该机制映射到无人机编队行为, 既可节省单机系统中通讯系统的占用空间, 又可保证无人机群系统的可靠性, 使单架无人机出现故障后仍可编队重构, 继续执行任务.

#### 3.1 无人机模型(UAV model)

这里, 假定无人机配有速度、航向角和高度3个回路的自动驾驶仪, 则无人机模型可简化为以速度、航向角和高度为控制指令的如下6态模型<sup>[26]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}^i = V^i \cos \psi^i, \\ \dot{y}^i = V^i \sin \psi^i, \\ \dot{h}^i = \lambda^i, \\ \dot{V}^i = \frac{1}{\tau_v}(V_c^i - V^i), \\ \dot{\psi}^i = \frac{1}{\tau_\psi}(\psi_c^i - \psi^i), \\ \dot{\lambda}^i = -\frac{1}{\tau_\lambda}\lambda^i + \frac{1}{\tau_h}(h_c^i - h^i), \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $(x^i, y^i, h^i)$ 为无人机 $i$ 的位置,  $V^i$ ,  $\psi^i$ 和 $\lambda^i$ 分别

为水平速度、航向角和高度变化率,  $V_c^i$ ,  $\psi_c^i$  和  $h_c^i$  分别为自动驾驶仪3个回路上的控制输入,  $\tau_v$ ,  $\tau_\psi$  和  $(\tau_\lambda, \tau_h)$  分别为3个回路的时间常数。

同时考虑无人机实用性约束:

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V^i \leq V_{\max}, \\ |\dot{\psi}^i| \leq \frac{n_{\max} g}{V^i}, \\ \lambda_{\min} \leq \lambda^i \leq \lambda_{\max}, \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$ ,  $n_{\max}$  和  $\lambda_{\max}$  均大于0, 分别为最大水平速度、最小水平速度、最大横向过载和最大高度变化率,  $\lambda_{\min}$  为最小高度变化率, 且小于0,  $g$  为重力加速度, 这里取  $10 \text{ m/s}^2$ 。

### 3.2 无人机自主编队控制(UAV autonomous formation control)

无人机自主编队控制大致可分为4个部分: 两个主体环节、鸽群编队模型和无人机模型, 以及两个辅助环节: 控制指令解算器和状态转换器。具体无人机自主编队控制框架如图3所示。

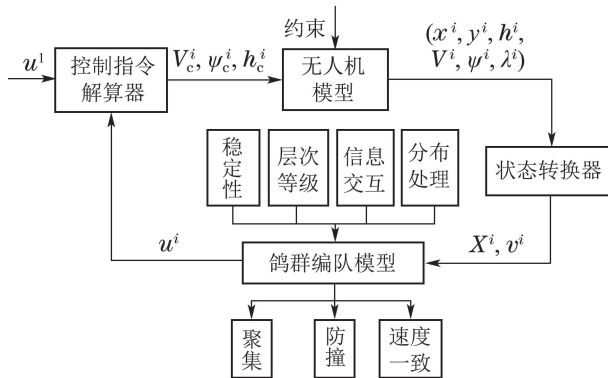


图3 无人机自主编队控制框图

Fig. 3 Block diagram of UAV autonomous formation control

图3中的控制指令解算器用于把鸽群编队模型的输出  $u^i$  转化为无人机模型中自动驾驶仪的3个控制输入  $V_c^i$ ,  $\psi_c^i$  和  $h_c^i$ 。具体解算公式如下:

$$\begin{cases} V_c^i = \tau_v(u_1^i \cos \psi^i + u_2^i \sin \psi^i) + V^i, \\ \psi_c^i = \frac{\tau_\psi}{V^i}(u_2^i \cos \psi^i - u_1^i \sin \psi^i) + \psi^i, \\ h_c^i = h^i + \frac{\tau_h}{\tau_\lambda} \lambda + \tau_h u_3^i. \end{cases} \quad (10)$$

状态转换器用于把无人机模型的状态输出  $(x^i, y^i, h^i, V^i, \psi^i, \lambda^i)$  转换为鸽群编队模型的输入  $(X^i, v^i)$ 。具体转换公式如下:

$$\begin{cases} X^i = (x^i, y^i, h^i), \\ v^i = (V^i \cos \psi^i, V^i \sin \psi^i, h^i). \end{cases} \quad (11)$$

综上, 无人机自主编队控制的具体实现过程如下:

**Step 1** 给定当前长机控制输入  $u^1$ , 由式(8)(10)和(11)得长机状态  $(X^1, v^1)$ 。

**Step 2** 类比鸽群层级拓扑结构, 由式(2)求得僚机  $i$  的受控上级集合  $N_i$ 。

**Step 3** 受控上级无人机  $N_i$  的下一时刻状态输出  $(X^{N^i}, v^{N^i})$ , 经鸽群层级机制, 由式(6)–(7)得下一时刻僚机的理想控制输入  $u^i$ 。

**Step 4** 由式(10)解算出僚机自动驾驶仪控制输入  $(V_c^i, \psi_c^i, h_c^i)$ 。

**Step 5** 由无人机模型式(8)得下一时刻僚机  $i$  的实际状态  $(x^i, y^i, h^i, V^i, \psi^i, \lambda^i)$ 。

**Step 6** 状态转换为  $(X^i, v^i)$ , 并作为鸽群行为机制模型的输入。

**Step 7** 返回Step 1, 直至达到仿真终止条件。

## 4 仿真结果(Simulation results)

假设5架无人机( $m_i = 1 \text{ kg}$ )在三维空间中飞行, 其参数设置如表1所示。

表1 无人机参数设置

Table 1 Parameter of the UAV

参数	描述	数值
$\tau_v$	速度时间常数	3 s
$\tau_\psi$	航向角时间常数	0.75 s
$(\tau_\lambda, \tau_h)$	高度时间常数	(0.3, 1) s
$(v_{\max}, v_{\min})$	速度限制	(5, 1) m/s
$n_{\max}$	最大横向过载	10 g
$(\lambda_{\max}, \lambda_{\min})$	高度变化率限制	(5, -5) m/s

无人机群的层级设置如表2所示, 包含1架长机和4架僚机。其中, 1号为长机, 4架僚机分为3个等级, 即: 2号为一级僚机, 跟随长机飞行, 3号为二级僚机, 跟随长机和一级僚机飞行, 4号和5号均为三级僚机, 跟随长机和一、二级僚机飞行。

表2 无人机群层级参数

Table 2 Parameters of hierarchies in UAVs

类别	所属等级	无人机编号	受控上级无人机编号
长机	—	1	—
僚机	一级	2	1
	二级	3	1, 2
	三级	4	1, 2, 3
		5	1, 2, 3

仿真共进行120 s, 采样时间为0.05 s。5架无人机的初始状态如表3所示。设定长机飞行分为4个阶段: 第1阶段, 从仿真开始到84 s, 长机控制输入指令为  $u^1 = [0, 0, 0]$ , 即长机处于匀速直线平飞状态; 第2阶段, 从84.05 s到96 s,  $u^1 = [0, 0, -2]$ , 长机在垂直方向上做加速俯冲运动; 第3阶段, 从96.05 s到108 s,  $u^1 = [0, 0, 6]$ , 长机在垂直方向上做加速爬升运动; 第4阶



段,从108.5 s到仿真结束,长机控制输入指令恢复至  $u^1 = [0, 0, 0]$ .

表3 无人机的初始状态  
Table 3 Initial states of UAVs

变量	1	2	3	4	5
$x/\text{m}$	0	-10	-15	-25	-20
$y/\text{m}$	0	20	-15	-35	40
$h/\text{m}$	0	10	-10	20	-20
$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3	1.9572	1.4854	1.8003	1.1419
$\psi/(^{\circ})$	0	0	0	0	0
$\xi/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0	0	0	0	0

其余4架僚机在长机领导下完成预定编队任务,即无人机群在空间中聚集实现“人”字形编队,并进行队形保持. 无人机的具体期望位置如图4所示,其中:  $R = 10\text{m}$ ,  $\theta = 60^{\circ}$ . 僚机均使用本文所提出的自主编队控制器进行飞行控制,其中鸽群机制模型的参数设置如下:

$$K_v = 1, K_p = 170, K_h = 5, w_1 = 0.1, w_2 = 1.$$

人工势场参数设置如表4所示.

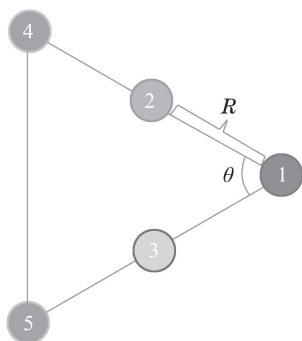


图4 无人机编队队形

Fig. 4 UAVs formation

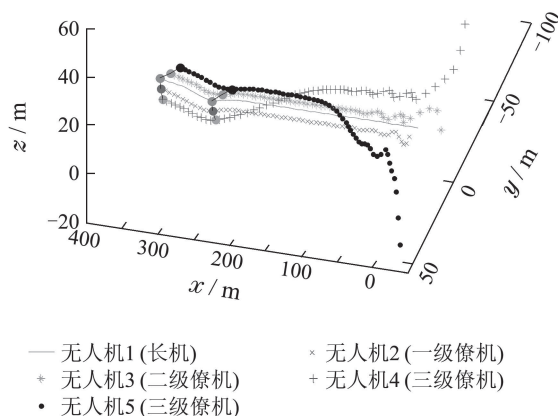
表4 期望间距  $d_{ij}(m)$   
Table 4 Desired distance  $d_{ij}(m)$

机群	1	2	3
2	10	—	—
3	10	10	—
4	20	10	17.3205
5	20	17.3205	10

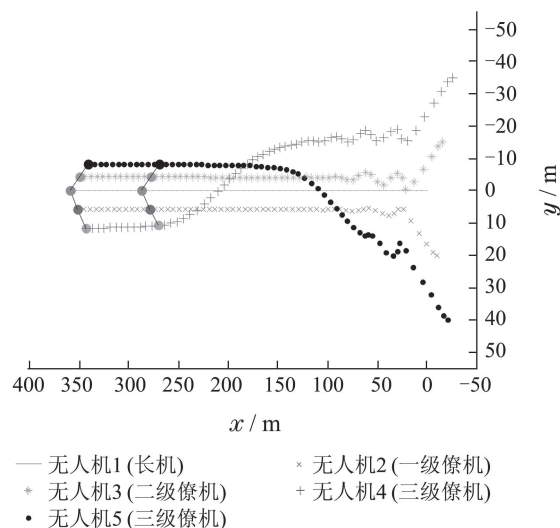
仿真全程大致分为两个阶段: 第1阶段,从仿真开始到84 s,此时长机处于匀速平飞状态,主要考察无人机群是否可形成编队;第2阶段,从84.05 s到仿真结束,此时长机先是加速俯冲而后加速爬升继而保持,主要考察无人机群是否可在复杂长机运动状态下依然时刻保持队形.

由图5(a)和5(b)可见,在仿真第1阶段,机群在大约96 s时形成期望的“人”字形编队并保持,即使在

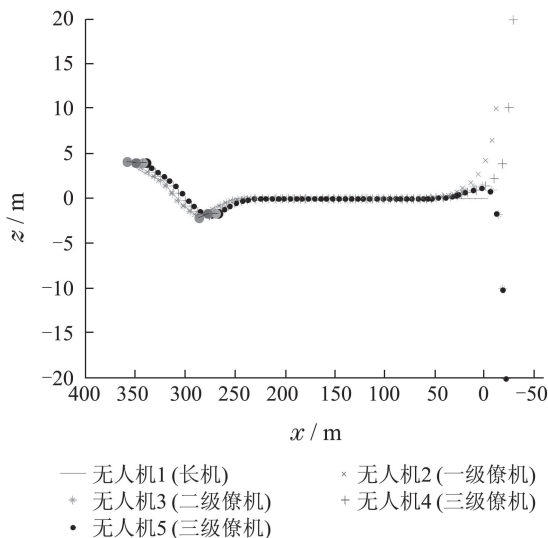
第2阶段复杂的长机运动条件下,依然保持队形. 图5(d)和5(e)也充分说明在形成编队后,机群的速度和航向角始终与长机趋于一致. 图5(c)表明在垂直方向上无人机群一致性依然良好,且基本可实时跟随长机的动态变化. 由图5(f)可见,当长机状态变化时,其他僚机的垂直速度与长机拟合良好,误差在允许范围内.



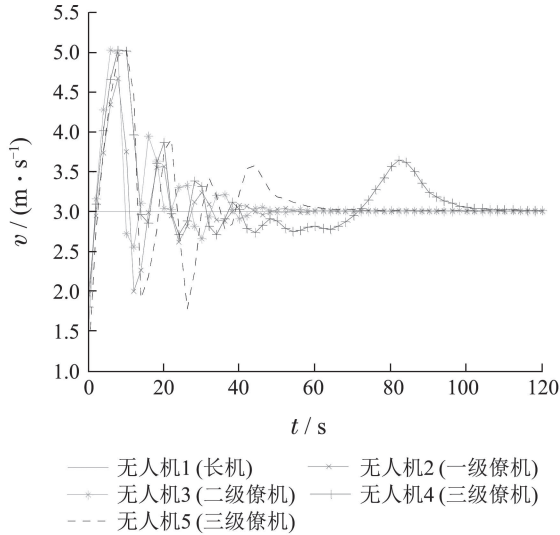
(a) 机群三维飞行轨迹



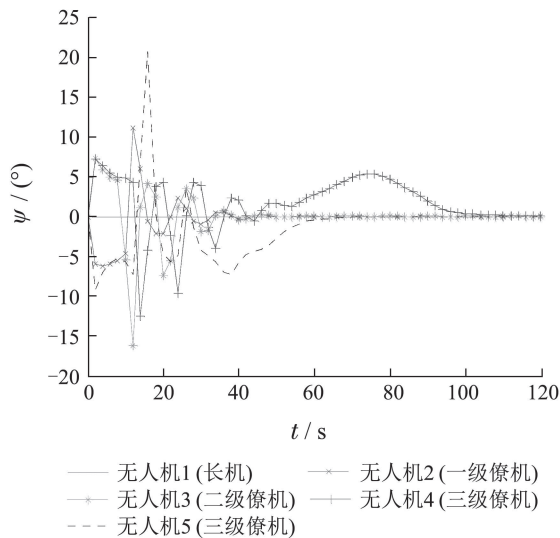
(b) 机群飞行轨迹俯视图



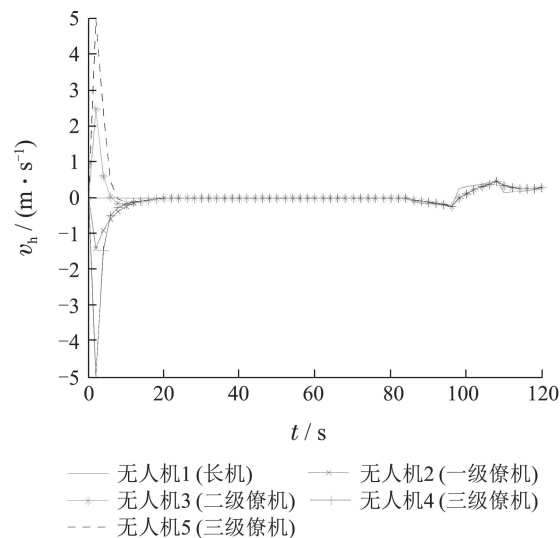
(c) 机群飞行轨迹侧视图



(d) 水平速度变化曲线



(e) 航向角变化曲线



(f) 垂直速度变化曲线

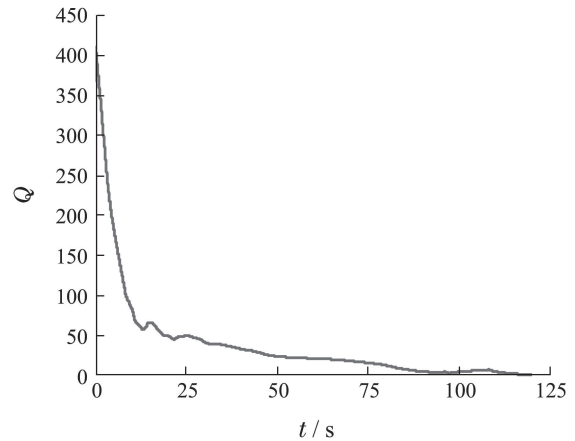
图 5 多无人机自主编队仿真结果图  
Fig. 5 Simulation results of multiple UAV  
autonomous formation

为更清晰描述编队的准确度, 引入函数  $Q$  来衡量每一采样时刻实际编队队形与期望间的差异, 以及每架无人机的速度状态与其受控上级无人机间的差异:

$$Q = \sum_{i=2}^n \sum_{j \in N_i} (\|X_{1,2}^{ij}\| - d_{ij} + \|X_3^{ij}\| + \|v_{ij}\|). \quad (12)$$

如图6所示,  $Q$  值在仿真全程总体呈下降趋势. 尽管在仿真后半段, 即长机状态发生变化时略有波动, 但波动幅度较小, 基本贴近横轴, 进一步说明了即使在复杂长机运动条件下, 机群依然可保持较高的编队精度.

综上, 当无人机群中存在鸽群的层级拓扑结构, 并使用本文所设计的自主编队控制器进行飞行控制时, 无人机群可实现自主编队, 即使在复杂的长机运动条件下依然能保持队形.

图 6  $Q$  值变化曲线Fig. 6 Change curve of  $Q$ 

## 5 结论(Conclusions)

多无人机自主编队飞行是实现和增强无人机作战能力的关键技术之一, 具有单机无法比拟的优势.

本文主要针对多无人机自主编队控制问题, 从自然生物群体——鸽群行为机制展开研究. 针对鸽群飞行机制中特有的层级行为, 分析了无人机编队飞行中与其相仿的仿生理, 并从两个方面进行了建模: 一方面, 利用有向图描述鸽群中存在的拓扑结构, 对鸽群层级结构进行建模; 另一方面, 在已有群集模型 (Vicsek模型和A/R模型) 的基础上, 对每只鸽子与其受控上级鸽子之间的领导作用进行建模. 并在此基础上, 设计了基于鸽群行为机制的多无人机自主编队控制器. 且通过系列仿真验证了无人机群在该控制器的作用下不仅可形成编队, 也可在复杂长机运动条件下保持队形, 进一步说明了基于鸽群行为机制的无人机自主编队控制器具有有效性和稳定性.

## 参考文献(References):

- [1] DERAFA L, BENALLEGUE A, FRIDMAN L. Super twisting control algorithm for the attitude tracking of a four rotors UAV [J]. Jour-

- nal of the Franklin Institute*, 2012, 349(2): 685 – 699.
- [2] KARIMODDINI A, LIN H, CHEN B M. Hybrid three-dimensional formation control for unmanned helicopters [J]. *Automatica*, 2013, 49(2): 424 – 433.
  - [3] XIE F, ZHANG X, FIERRO R. Autopilot-based nonlinear UAV formation controller with extremum-seeking [C] // *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. Sevilla: IEEE, 2005, 4933 – 4938.
  - [4] 胡云安, 左斌, 李静. 退火递归神经网络极值搜索算法及其在无人机紧密编队飞行控制中的应用 [J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(5): 879 – 882.  
(HU Yunan, ZUO Bin, LI Jing. An annealing recurrent neural network for extremum seeking algorithm and its application to unmanned aerial vehicle tight formation flight [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(5): 879 – 882.)
  - [5] DUAN H B, LIU S Q. Non-linear dual-mode receding horizon control for multiple unmanned air vehicles formation flight based on chaotic particle swarm optimization [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(11): 2565 – 2578.
  - [6] PENG Z, LIU J. On new UAV flight control system based on Kalman & PID [C] // *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing*. Harbin: IEEE, 2011, 819 – 823.
  - [7] 魏瑞轩, 茹常剑, 祁晓明. 通信延迟条件下无人机编队重构的自主安全控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(9): 1009 – 1108.  
(WEI Ruixuan, RU Changjian, QI Xiaoming. Autonomous safety control of unmanned aerial vehicle formation reconfiguration under communication delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(9): 1009 – 1108.)
  - [8] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile agents, Part I: fixed topology [C] // *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*. Maui Hawaii: IEEE, 2003: 201 – 2015.
  - [9] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile agents, Part II: dynamic topology [C] // *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*. Maui Hawaii: IEEE, 2003: 2016 – 2021.
  - [10] 俞辉, 王永骥, 程磊. 基于有向网络的智能群体群集运动控制 [J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(1): 79 – 83.  
(YU Hui, WANG Yongji, CHEN Lei. Flocking motion control of flock in directed networks [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 79 – 83.)
  - [11] 程磊, 俞辉, 吴怀宇, 等. 一类有序化多移动机器人集群运动控制系统 [J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(6): 1117 – 1120.  
(CHEN Lei, YU Hui, WU Huaiyu, et al. A sequential flocking control system for multiple mobile robots [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(6): 1117 – 1120.)
  - [12] 毛昱天, 陈杰, 方浩, 等. 连通性保持下的多机器人系统分布式群集控制 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(10): 1393 – 1403.  
(MAO Yutian, CHEN Jie, FANG Hao, et al. Decentralized flocking of multi-robot systems with connectivity maintenance [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(10): 1393 – 1403.)
  - [13] GUILFORD T, ROBERTS S, BIRO D, et al. Positional entropy during pigeon homing II: navigational interpretation of Bayesian latent state models [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2004, 227(1): 25 – 38.
  - [14] MORA C V, DAVISON M, WILD J M, et al. Magneto reception and its trigeminal mediation in the homing pigeon [J]. *Nature*, 2004, 432(7016): 508 – 511.
  - [15] WHITEN A. Operant study of sun altitude and pigeon navigation [J]. *Nature*, 1972, 237(5355): 405 – 406.
  - [16] DUAN H B, QIAO P X. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning [J]. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2014, 7 (1): 24 – 37.
  - [17] ZHANG S J, DUAN H B. Gaussian pigeon-inspired optimization approach to orbital spacecraft formation reconfiguration [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1): 200 – 205.
  - [18] LI C, DUAN H B. Target detection approach for UAVs via improved pigeon-inspired optimization and edge potential function [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, 39: 352 – 360.
  - [19] NAGY M, AKOS Z, BIRO D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks [J]. *Nature*, 2010, 464(7290): 890 – 893.
  - [20] NAGY M, VASARHELYI G, PETTIT B, et al. Context-dependent hierarchies in pigeons [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(32): 13049 – 13054.
  - [21] VICSEK T, CZIROK A, BEN-JACON E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(6): 1226 – 1229.
  - [22] GAZI V, PASSINO K M. Stability analysis of swarms [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(4): 692 – 697.
  - [23] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90 – 98.
  - [24] 杨宇. 多机器人编队群集运动控制的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.  
(YANG Yu. *Research on formation and flocking control of multiple robots* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.)
  - [25] WANG L, SHI H, CHU T. Flocking control of groups of mobile autonomous agents via local feedback [C] // *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Mediterranean Conference on Control and Automation*. Limassol: IEEE, 2005: 441 – 446.
  - [26] REN W. On constrained nonlinear tracking control of a small fixed-wing UAV [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, 48(4): 525 – 537.

#### 作者简介:

邱华鑫 (1992–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为多飞行器协同自主控制与智能决策, E-mail: qhxmemory2013@gmail.com;

段海滨 (1976–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为多飞行器自主协同控制、计算机仿生视觉和仿生智能计算, E-mail: hbduan@buaa.edu.cn;

范彦铭 (1964–), 男, 博士, 研究员, 副总设计师, 目前研究方向为先进飞行器控制律设计与实现、无人机自主飞行控制, E-mail: michael.fan@yeah.net.