

# UAV 集群自组织飞行建模与控制策略研究

孙 强<sup>1</sup>, 梁晓龙<sup>2</sup>, 尹忠海<sup>1</sup>, 任谨慎<sup>1</sup>, 王亚利<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学空管领航学院, 陕西 西安 710051)

**摘 要:** 针对多无人航空器协同控制难题, 聚焦无人航空器集群(unmanned aircraft vehicles swarm, UAVS)自组织飞行建模与控制展开研究。基于集群智能理论建立了 UAVS 系统概念模型, 在考虑个体排斥作用、一致作用、吸引作用和个体行动意愿作用 4 种因素的情况下建立了集群运动的变系数(repulsion-matching-attracting-desire, RMAD)控制器模型, 以此为基础, 研究了所有个体掌握航迹信息和部分个体掌握航迹信息两种情况下 UAVS 自组织飞行控制问题, 提出 UAVS 自组织飞行控制策略, 实现了 UAVS 可控性自组织飞行。仿真实验结果表明构造的 UAVS 运动的 RMAD 模型及控制方法是可行的, 为 UAVS 的工程应用奠定理论和实验基础。

**关键词:** 无人航空器; 集群; 自组织飞行; 控制

中图分类号: TP 911

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.26

## UAV swarm self-organized flight modeling and control strategy

SUN Qiang<sup>1</sup>, LIANG Xiao-long<sup>2</sup>, YIN Zhong-hai<sup>1</sup>, REN Jin-shen<sup>1</sup>, WANG Ya-li<sup>1</sup>

(1. College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. College of Air Traffic Control & Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aiming at the conundrum of multi-unmanned aircraft vehicle (UAV) cooperative control, the key problems of UAV swarm(UAVS)self-organized flight modeling and control are focused to study. Firstly, based on the swarm intelligence theory, the UAVS system concept model is built, in the condition of considering four factors of repulsion, matching, attracting and agent's desire action, the swarm control's alterable coefficient repulsion-matching-attracting-desire (RMAD) model is presented. Based on these models, the UAVS self-organized flight control problems are studied on the following two conditions. One is all of the agents in swarm learned the information of the flight path and the other one is that part agents learned the information. The UAVS self-organized flight control strategy is presented which achieves UAVS's controllable self-organized flight. Simulation results show that the RMAD model and the proposed methods are feasible, which lay an academic and experimental foundation for UAVS's engineering application.

**Keywords:** unmanned aircraft vehicle (UAV); swarm; self-organized flight; control

## 0 引言

当前,随着无人航空器(unmanned aircraft vehicle, UAV)技术的迅猛发展,无人航空器集群(UAV swarm, UAVS)在军事领域和民用领域正得到越来越广泛的应用。UAVS 应用中的重要问题是集群系统协同控制问题,其中,UAVS 自组织飞行建模与控制是该问题的重要研究内容。

## 1 多航空器传统协同控制方法

UAVS 飞行控制属于多航空器协同控制问题。多航空器协同飞行控制的传统方法是进行固定编队飞行,编队中飞行器是有人飞行器,采用有地面指控人员和飞行器驾驶

员参与的“人在回路”的控制方法<sup>[1]</sup>。由于无人航空器没有驾驶员,并且通常群中个体数量大,“人在回路”的固定编队指控方法显然无法适用于大规模 UAVS 的飞行控制。目前,对于单个 UAV 或者小规模 UAV 编队的飞行控制多采用遥控控制或预编程方式/监控方式下的自主控制等方法<sup>[2-6]</sup>。遥控控制方法是由地面操控人员通过通信设备遥控操作实现 UAV 或 UAV 编队的飞行控制,但由于通信信道容量、通信距离、通信时延等条件限制以及系统操控复杂性的限制,遥控控制方法也不能满足大规模 UAVS 的飞行控制需求。预编程方式下/监控方式下的自主控制方法能最大限度减少甚至摆脱对地面操控人员的依赖,并能减少通信依赖,避免通信局限,是解决大规模 UAVS 飞行控制的有效方

收稿日期:2015-07-31; 修回日期:2015-10-26; 网络优先出版日期:2016-02-15。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20160215.1710.018.html>

基金项目:国家自然科学基金(61472443);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM6071)资助课题

法,但该方法需以良好的集群飞行控制模型与控制策略为重要基础。本文围绕 UAVS 建模与控制问题展开研究。

## 2 基于集群智能的 UAVS 系统建模

自然界中,经常能见到由成百上千只鸟组成的鸟群在空中协调一致地自由飞行,飞行过程中,鸟群中没有中心指挥者,个体之间不存在显式控制与被控制的关系,整个鸟群的飞行过程完全是自组织的。人们把自组织机制下群体呈现出特定宏观行为模式的现象称为集群智能涌现。鉴于 UAVS 飞行行为和鸟群飞行行为的相似性,本文拟将集群智能理论中的自组织机制引入 UAVS 的建模与飞行控制中,并辅以适度的他组织策略,使 UAVS 达到可控性自组织飞行的目的。

### 2.1 UAVS 概念模型

将无人航空器抽象为具有有限智能的 agent,将无人航空器群抽象为集群 Swarm<sup>[7-10]</sup>。考虑  $n$  维空间中有  $N(N > 1)$  个 agent 组成的 Swarm 集合,用  $S = \langle X, V, A, P \rangle$  表示,其中,矩阵

$$\begin{cases} X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) \\ V = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_N) \\ A = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_N) \end{cases}$$

分别描述 Swarm 位置、速度和加速度,  $x_i$ 、 $v_i$  和  $a_i$  为  $R^n$  中的向量,分别表第  $i$  个 agent 的位置、速度和加速度。 $P = \{C, B, D, A_{\max}, V_{\max}\}$  为 Swarm 的控制参数集,其中  $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$  为集群运动基础参数集,用以控制“避免碰撞、保持一致、保持聚集和随机探索/运动偏好”等集群自组织规则<sup>[5,7]</sup>作用强度; $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$  为 agent 运动意愿变化调节参数集,用以控制 agent 由于情境变化而产生的运动意愿改变; $D = \{d_r, d_m, d_a\}$  为 Reynolds 规则<sup>[11]</sup>作用临界距离参数集,用于确定各种作用域的范围; $A_{\max}$ 、 $V_{\max}$  为最大加速度值和最大速度值。

Swarm 系统中,各 agent 的运动的控制方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, i = 1, 2, \dots, N \\ \dot{v}_i = a_i \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\dot{x}_i$  为  $x_i$  的导数;  $\dot{v}_i$  为  $v_i$  的导数;  $a_i$  为系统控制变量,各种情况下的 UAV 集群运动可以从  $a_i$  的设计入手,本文称  $a_i$  为集群运动控制器。

显然,agent 的运动速度和加速度应该在一个合理的范围内取值,因而每个 agent 的加速度值及速度值受到的条件约束为

$$a_i = \begin{cases} a_i, \|a_i\| \leq A_{\max} \\ A_{\max} \frac{a_i}{\|a_i\|}, \|a_i\| > A_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$v_i = \begin{cases} v_i, \|v_i\| \leq V_{\max} \\ V_{\max} \frac{v_i}{\|v_i\|}, \|v_i\| > V_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\|x\|$  表示向量的模。

### 2.2 集群运动控制器的变系数 RMAD 模型

关于集群运动控制器  $a_i$  的设计,已有不少学者从不同的角度提出不同版本的模型<sup>[6-7,12-15]</sup>,其中,R-A 模型是讨论和应用较多的模型<sup>[8]</sup>。在 R-A 模型的基础上,提出适用于 UAV 集群自组织飞行问题的变系数 RMAD (repulsion-matching-attracting-desire model) 模型。

一般地,集群中个体之间存在 3 种相互作用,即排斥作用(repulsion action)、一致作用(也称速度匹配作用, matching action)、吸引作用(attracting action)。当然,集群运动过程中个体自身也可能存在特定的运动意愿,称之为个体意愿作用(desire action)。在个体没有明确运动目标的情况下,个体意愿作用具有随机性,一旦有明确的运动目标后,个体意愿作用方向即确定为向该目标运动的方向。因而本文提出集群自组织运动控制器可以在考虑上述 4 种作用的基础上进行建模,称为 RMAD 模型,模型建立过程如下。

设个体  $i$  的位置向量为  $x_i (x_i \in R^n)$ ,  $d_r$ 、 $d_m$ 、 $d_a$  为正实数,表示个体间相互作用区域的半径,且满足  $d_r < d_m < d_a$ 。

定义 1  $R^n$  空间中的点集

$$Rr_i = \{x \mid \|x - x_i\| < d_r, x \in R^n\}$$

称为个体  $i$  的排斥域。落入该区域的个体  $j$  将对个体  $i$  产生排斥作用,运动时个体  $i$  需要远离  $j$ ,以避免彼此碰撞冲突。

定义 2  $R^n$  空间中的点集

$$Rm_i = \{x \mid d_r \leq \|x - x_i\| < d_m, x \in R^n\}$$

称为个体  $i$  的一致域。个体  $i$  将和落入该区域的个体  $j$  进行速度匹配,以促使群体朝着共同的方向运动。

定义 3  $R^n$  空间中的点集

$$Ra_i = \{x \mid d_m \leq \|x - x_i\| < d_a, x \in R^n\}$$

称为个体  $i$  的吸引域。个体  $i$  将受到落入该区域的个体  $j$  的吸引作用而向其靠近,这样可以促使各个成员保持聚集。

设个体  $i$  与个体  $j$  的欧氏距离为  $r_{ij} = \|x_i - x_j\|$ 。集群中,个体  $i$  与个体  $j$  间的相互作用由双方面的距离  $r_{ij}$  是否落入上述所定义的 3 个作用域来确定。在考虑排斥作用、一致作用、吸引作用及个体意愿作用的基础上,可将个体  $i$  的运动加速度控制器设计为

$$a_i = c_1 V_r^i + c_2 V_m^i + c_3 V_a^i + c_4 V_d^i \quad (4)$$

式中,  $V_r^i$  为个体  $i$  受到排斥域内其他个体的排斥作用向量;  $V_m^i$  为个体  $i$  与一致域中其他个体的速度匹配向量;  $V_a^i$  为个体  $i$  受到吸引域中其他个体的吸引作用向量;  $V_d^i$  为个体  $i$  的个体意愿作用向量。非负数  $c_i (i = 1, 2, 3, 4)$  为各种作用的权重系数。式(4)称为集群运动控制器的 RMAD 模型。

在集群运动过程中,不同条件下个体调节自身运动的考虑因素权重会发生变化,比如,个体有了明确/偏好的运动目标后,运动中一致性作用因素、吸引性作用因素权重降低,个体意愿作用因素权重增加;再比如在 UAV 集群解散降落阶段,个体间的一致性作用和吸引作用权重应该调整

为0,且应当增强排斥作用的权重以避免碰撞。为方便表述不同情况下个体运动因素权重变化,在此引入权重调节系数 $b_i(b_i \geq 0)$ ,通过在不同情境下为 $b_i$ 取不同的值来调节权重系数(本文也称系数 $b_i$ 为情境关联系数),为此将模型式(4)修改为

$$\mathbf{a}_i = b_1 c_1 \mathbf{V}_r^i + b_2 c_2 \mathbf{V}_m^i + b_3 c_3 \mathbf{V}_a^i + b_4 c_4 \mathbf{V}_d^i \quad (5)$$

式(5)称为集群运动控制器的变系数 RMAD 模型。以下讨论式(5)中排斥作用向量 $\mathbf{V}_r^i$ 、速度匹配向量 $\mathbf{V}_m^i$ 和吸引作用向量 $\mathbf{V}_a^i$ 的设计方案。

当 $0 \leq r_{ij} < d_r$ 时,个体 $j$ 位于个体 $i$ 的排斥域中, $j$ 对 $i$ 的排斥作用应该与向量 $\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ 同向,并且排斥强度是两者间距离 $r_{ij}$ 的减函数,且应该满足 $r_{ij} = d_r$ 时,排斥作用强度为0,当 $r_{ij} = 0$ 时,排斥强度为无穷大。按上述分析,将个体 $j$ 对个体 $i$ 的排斥作用向量表示为 $(\frac{1}{r_{ij}} - \frac{1}{d_r})(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)$ ,于是个体 $i$ 受到排斥域内所有个体的总排斥作用可表示为

$$\mathbf{V}_r^i = \sum_{\substack{j \in R_{r_i} \\ j \neq i}} (\frac{1}{r_{ij}} - \frac{1}{d_r})(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \quad (6)$$

当 $d_r \leq r_{ij} < d_m$ 时,个体 $j$ 位于 $i$ 的一致域, $i$ 则根据 $j$ 的速度修正自身速度以保持速度匹配,一致域中所有个体为 $i$ 带来的速度修正总量可表示为

$$\mathbf{V}_m^i = \mathbf{v}_i + \sum_{j \in R_{m_i}} \mathbf{v}_j \quad (7)$$

当 $d_m \leq r_{ij} \leq d_a$ 时,个体 $j$ 位于个体 $i$ 的吸引域,则 $i$ 被 $j$ 吸引,吸引作用的方向为 $\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$ ,吸引作用强度应为双方距离 $r_{ij}$ 的增函数,且当 $r_{ij} = d_m$ 时吸引作用为0,当 $r_{ij} = d_a$ 时吸引作用很大,为此,设计吸引域中所有个体对 $i$ 的吸引作用向量为

$$\mathbf{V}_a^i = \sum_{j \in R_{a_i}} (\frac{1}{d_a - r_{ij}} - \frac{1}{d_a - d_m})(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \quad (8)$$

### 3 UAVS 自组织飞行控制策略及仿真

在集群内部的排斥作用、一致作用、吸引作用和个体意愿作用下,集群能够涌现出规律性的运动行为,但这种涌现往往带有随机性,这对有明确行动目标的集群系统来说是无意义的。对于 UAV 集群的飞行而言,人们希望使系统实现可控的自组织飞行,一方面使系统能够完成既定任务,另一方面又能有效避免集中式指控方式难以胜任大规模 UAV 集群系统指控的难题。不失可行性,在变系数 RMAD 模型的基础上,这里针对下述两种情形研究 UAV 集群自组织飞行控制策略:一是所有个体均拥有航迹信息,二是部分个体掌握航迹信息。

#### 3.1 所有个体均拥有航迹信息

由于在集群智能的自组织机制下,UAVS 中所有个体既能团结一致地飞行,又能有效避免碰撞冲突,所以,不必为每一架无人机规划具体的航迹,只需将集群作为整体考虑,为集群整体规划出航迹即可,这样可大大减少航迹规划的困难。在此,假定集群整体的航迹已经给出,所有个体都拥有集群航迹信息,个体间不进行直接的导航通信。这种

情况下,UAVS 飞行过程中,显然不能要求所有个体都精确地沿着集群航迹飞行,只要求集群整体沿着既定航迹飞行即可。

对 UAVS 飞行行为而言,根据集群运动控制变系数 RMAD 模型(见式(5)),各个体飞行中避免碰撞冲突由 $\mathbf{V}_r^i$ 项保证,飞行一致性由 $\mathbf{V}_m^i$ 项保证,集群聚集性由 $\mathbf{V}_a^i$ 项保证。每架 UAV 个体都拥有航迹信息,假定航迹由 $\mathbf{R}^n$ 中的一些确定点的序列 $Track = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 描述,为使 UAVS 能够沿着给定航迹飞行,可将每架飞机的飞行意愿设定为沿着给定航迹飞行。为此,设 UAV 个体 $i$ 在位置为 $\mathbf{x}_i$ 时的目标航迹点位置为 $P_k$ ,则将式(4)中的 $\mathbf{V}_d^i$ 项设计为

$$\mathbf{V}_d^i = P_k - \mathbf{x}_i \quad (9)$$

式(9)刻画了 UAV 个体 $i$ 由其当前位置向目标航迹点飞行的愿望。

根据 UAVS 系统模型(包括式(1)、式(2)及式(5)~式(9))进行仿真实验。仿真过程中,以某小型无人机飞行参数为基础,设定集群中个体数量 $N=30$ ,集群中 UAV 个体压航迹精度为 1.5 km,即集群沿航迹飞行时,UAV 个体距离航迹点小于等于 1.5 km 时即认为其到达航迹点。作用域半径参数及最大速度、最大加速度参数由实际机型性能参数设定,自组织飞行模型参数 $c_1 \sim c_4$ 由仿真实验观察确定(见表1),情境关联系数取值为 $b_i=1(i=1,2,3,4)$ 。

表1 全部个体已知航迹信息时 UAVS 自组织飞行模型仿真参数取值  
Table 1 The parameters' value in UAVS self-organized flight simulation of all of the agents learned flight path information

参数	取值	参数	取值
$d_r$	0.5	$c_1$	6.5
$d_m$	1	$c_2$	6
$d_a$	1.5	$c_3$	3
$A_{\max}$	0.8	$c_4$	4
$V_{\max}$	0.4		

在仿真实验中发现,UAVS 在沿着给定航迹飞行的过程中,靠近航迹线的 UAV 个体能够精确到达预定的各航迹点。而位于集群两翼靠外侧的部分 UAV 个体由于受到群内其他个体的排斥作用而不能精确到达航迹点,对于这部分个体,如果不施加有针对性的控制规则,往往会出现这样的现象:它们先受到集群的“推挤与牵引”随着群体前进一段时间后,会脱离集群返回那些已经“错过”的航点(也就是身后未能精确到达的航点),这是我们不希望的。事实上这部分个体只要跟着群中其他成员一致飞行,即使它们没能精确到达集群的目标航迹点,也不影响集群沿航迹飞行。所以,对于这部分不能靠近航迹点的个体,制定如下控制规则:在跟随集群飞行过程中计算个体实时位置到当前目标航迹点和下个航迹点的两个距离值,若到下个航迹点的距离更近,则跳过当前目标航迹点而将距离更近的下一航迹点设为新的目标航迹点。这样便解决了集群飞行过程不应出现的“回头”压航迹点问题。仿真实验截图如图1所示。

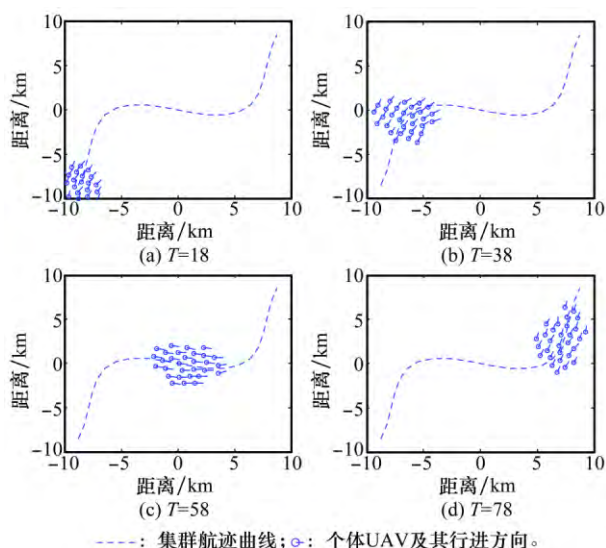


图 1 所有个体已知航迹信息时 UAVS 自组织飞行仿真

Fig. 1 The simulation of UAVS self-organized flight of all agents learned flight path information

### 3.2 部分个体拥有航迹信息

通常, UAV 集群可能由异构平台构成, 执行任务的过程中, 集群中一些 UAV 平台由于可以得到体系外部体系信息支持而掌握航迹信息, 另一些个体则不掌握航迹信息, 这种情况下, 若任务环境又不允许进行集群全局范围的导航通信, 这样就会造成集群中只有部分个体拥有航迹信息而另一部分未知航迹信息。

假设集群中共有  $N$  个 UAV 个体, 其中有  $M$  个拥有航迹信息, 其余  $N-M$  个不掌握航迹信息, 是普通个体。集群所处环境不允许个体之间进行直接导航通信。

这种情况下, 可以考虑将带有领导者的生物集群自组织机制引入 UAVS 自组织飞行控制中。基本原理是将掌握航迹信息的个体视为领导者, 不掌握航迹信息的个体视为跟随者; 根据集群内部的速度匹配作用和吸引作用, 所有个体集结为集群进行飞行, 掌握航迹信息的个体(领导者)尽力沿着航迹飞行, 吸引无航迹信息的个体跟随集群飞行, 最终达到间接导航的目的。为此, 在集群运动控制变系数 RMAD 模型(见式(5))中, 将领导者 UAV 飞行意愿项  $V_d^i$  设计为向目标航迹点飞行, 即按式(9)控制。为使不掌握航迹信息的普通 UAV 个体能更好地跟随集群沿着航迹飞行, 将这些个体的飞行意愿项设计为  $V_d^i = 0$ 。

考虑到集群内部所有个体都受排斥作用、速度匹配作用和吸引作用, 已知航迹的领导者个体还要兼顾其沿航迹飞行的意愿, 因而, 在 RMAD 模型中, 式(5)的系数需要适当调整。调整的策略是将领导者个体的沿航迹飞行意愿作用项的情境关联系数  $b_1$  增大, 并适当增大排斥作用项的情境关联系数  $b_1$ , 以加强消解由周围众多跟随者盲目跟进而增多的潜在冲突。为使未知航迹点信息的其他个体(跟随者)能保持紧密跟随集群飞行, 需要将一致作用项的情境关联系数  $b_2$  和吸引作用项的情境关联系数  $b_3$  增大, 并且将其

个体随机意愿作用项的情境关联系数  $b_4$  减小为 0。各参数取值如表 2 所示。

表 2 部分个体已知航迹信息时 UAVS 自组织飞行模型仿真参数取值  
Table 2 The parameters' value in UAVS self-organized flight simulation of part of the agents learned flight path information

参数	取值	参数	领导者取值	跟随者取值
$d_r$	0.5	$b_1$	1.3	1
$d_m$	1	$b_2$	1	1.3
$d_a$	1.5	$b_3$	1	1.6
$A_{\max}$	0.45	$b_4$	2.2	0
$V_{\max}$	0.3			
$c_1$	6.5			
$c_2$	6			
$c_3$	3			
$c_4$	4			

根据模型和控制策略, 经仿真实验过程发现, 集群中掌握航迹信息的领导者个体的比例对集群沿航迹自组织飞行行为涌现有着明显影响。当领导者个体比例较小时(领导者占比小于  $1/3$  时), 容易出现跟随者个体因跟不上领导者而脱离集群的现象。经过仿真实验验证, 提出解决该问题的两个策略: 一是增加领导者的比例; 二是令领导者开启导航局部导航通信功能, 领导者向周围有限范围内的普通个体发布当前位置处的目标航迹点信息, 接收到导航信息的普通个体则将其飞行意愿项调整为指向航迹点方向, 同时将飞行意愿项的情境关联系数  $b_1$  调大, 其他未接收到导航信息的个体仍然保持原有的跟随集群飞行策略。仿真实验截图如图 2 所示。

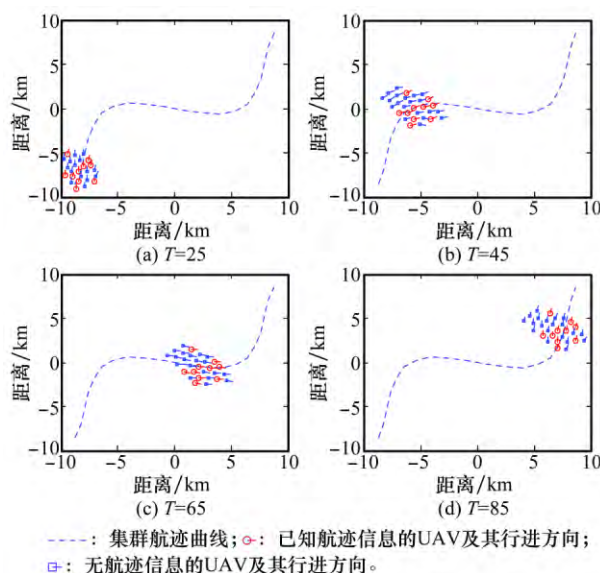


图 2 部分个体拥有航迹信息时 UAVS 的自组织飞行仿真

Fig. 2 The simulation of UAVS self-organized flight of part agents learned flight path information

## 4 结 论

本文针对 UAVS 为分布式系统的特点, 采用了“自下

而上”建模机制,以单个 agent 为对象建模,因而模型不受集群规模影响。本文提出的 UAVS 自组织飞行控制方法中,只需为集群整体规划一条航迹路线,不需要为每架 UAV 分别规划航迹路线,大大减小了航迹规划的困难度,并且,由于集群内部的固有自组织作用,使得 UAVS 飞行过程无需依赖地面指控人员的具体指挥控制,有效解决了大量 UAV 协同飞行的控制难题,而且能有效避免碰撞冲突。

本文建立的 UAVS 系统模型属于二阶动力学模型,相比直接设计位移控制量的一阶模型具有更好的物理意义,它不仅要求系统达到位置一致性,还要求系统达到速度一致性,因而对系统的刻画与控制更优。对于自由队形的 UAVS 自组织飞行问题而言,上述两方面的一致性要求已经能够满足要求了。若要进一步解决 UAVS 固定队形编队构型保持问题,则很可能需要建立三阶动力学模型,进行邻居意图推断来考虑加速度一致性,这是值得进一步研究的后继问题。

## 参考文献:

- [1] Zhang A, Liu Y F, Tang Z L, et al. Research on command and decision system architecture of cooperative formation air-to-ground attack[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(29):232-235. (张安,刘跃峰,汤志磊,等. 编队协同对地攻击指挥决策系统体系结构研究[J]. 计算机工程与应用,2010, 46(29):232-235.)
- [2] Wang J Y, Wei R X, Dong Z X, et al. Research on formation flight control of cooperative UAV[J]. *Fire Control & Command Control*, 2010, 35(3): 34-38. (王晋云,魏瑞轩,董志兴,等. 无人机组编队飞行控制仿真研究[J]. 火力与指挥控制,2010, 35(3): 34-38.)
- [3] Fan Q J, Yang Z, Fang T, et al. Research status of coordinated formation flight control for multi-UAVs[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2009, 30(4): 683-691. (樊琼剑,杨忠,方挺,等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009,30(4):683-691.)
- [4] Zhang G Z, Shen L C, Zhu H Y. The current situation and enlightenment of supervisory control technology for multiple UAVs[J]. *National Defense Science & Technology*, 2009,30(4):5-9. (张国忠,沈林成,朱华勇. 多无人机监督控制技术的发展现状及启示[J]. 国防科技,2009,30(4):5-9.)
- [5] Li Y, Zhang W Y. Command and control technology for unmanned combat vehicles[J]. *Command Information System and Technology*, 2011,2(6): 6-9. (李瑜,张文玉. 无人作战平台指挥控制技术[J]. 指挥信息系统与技术,2011,2(6): 6-9.)
- [6] Yuan S, Li F, Wang L, et al. An optimal coordination trajectory planning method of multiple unmanned air vehicles based on hierarchy strategy[J]. *Journal of Air Force Engineering University* (Natural Science Edition), 2015, 16(2): 33-37. (苑帅,李飞,王龙,等. 基于分层策略的多无人机最优协同航路规划[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2015, 16(2): 33-37.)
- [7] Li S B, Yang Z, Chen Z, et al. Flocking control based on neighborhood perception[J]. *Applied Science and Technology*, 2011, 38(7):21-25. (李少斌,杨忠,陈喆. 一种基于邻域感知的集群控制算法[J]. 应用科技,38(7),2011: 21-25.)
- [8] Iain D C, Jens K, Richard J, et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups[J]. *Journal of Theory Biology*, 2002, 218(1): 1-11.
- [9] Couzin I D, Krause J, Nigel R, et al. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move[J]. *Nature*, 2005, 433(7025): 513-516.
- [10] Liu M Y, Lei X K, Yang P P, et al. Progress of theoretical modeling and empirical studies on collective motion[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(25): 2464-2483. (刘明雍,雷小康,杨盼盼,等. 群集运动的理论建模与实证分析[J]. 科学通报, 59(25),2014:2464-2483.)
- [11] Reynolds C. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[J]. *Computer Graphics*, 1987, 1(1): 25-34.
- [12] Tanner H G, Jadbabaie A, Pappas G J. Stable flocking of mobile agents, part I: fixed topology[C] // *Proc. of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2003: 2010-2015.
- [13] Tanner H G, Jadbabaie A, Pappas G J. Stable flocking of mobile agents, part II: dynamic topology[C] // *Proc. of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2003: 2016-2021.
- [14] Gao Y P, Wang L, Jia Y M. Consensus of multiple second-order without velocity measurements[C] // *Proc. of the American Control Conference*, 2009:4464-4469.
- [15] Wen G H, Duan Z S, Yu W W, et al. Consensus in multi-agent systems with communication constraints[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2012,22(2):170-182.

## 作者简介:

孙 强(1970-),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为集群智能、智能计算。

E-mail:s126email@126.com

梁晓龙(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为集群智能、航空管制。

E-mail:xiaolong.liang@haotmail.com

尹忠海(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为集群通信、网络通信。

E-mail:yinzhonghai2005@163.com

任谨慎(1972-)男,副教授,主要研究方向为复杂系统建模与仿真。

E-mail:492523924@qq.com

王亚利(1979-)女,讲师,博士研究生,主要研究方向为最优化理论与智能计算。

E-mail:yayahope@163.com