

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0470

基于一致性理论的无人机编队控制与集结方法

苟进展¹, 梁天骄^{2,*}, 陶呈纲², 马波², 王海峰², 吴宇¹

(1. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 2. 歼击机综合仿真航空科技重点实验室, 成都 610091)

摘 要: 针对无人机运动学模型特点和远距离成形问题, 提出一种基于改进一致性算法的无人机集结-成形策略。建立能直观描述编队队形的坐标系, 根据纵向和横航向解耦的带自动驾驶仪的无人机三自由度运动学模型的特点, 考虑无人机机动性能约束, 对一致性算法进行改进, 实现对无人机速度、航向和飞行高度的控制, 提出编队队形控制算法。针对无人机初始间距大带来的调参问题, 增加集结过程, 并利用粒子群算法优化集结速度, 避免航迹冲突, 集结结束后再采用所提算法生成无人机航迹, 提升算法的适应性。仿真结果表明: 所提算法能使无人机在满足机动性约束的情况下, 形成稳定队形; 相比于直接成形法, 所提策略提高改进一致性算法的适应性和安全性。

关键词: 无人机; 编队飞行; 集结; 一致性理论; 粒子群优化

中图分类号: V221.3; TB273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)05-1646-09

无人机因其造价低、机动能力强、应用范围广等优点, 在很多领域都有良好的应用前景^[1-3]。传统意义上通常使用一架或零散的几架无人机去执行任务, 当遇到大型复杂任务时, 单机效率低、任务完成效果差等问题就会突显出来。为解决单机面临的问题, 同时拓宽无人机的应用场景, 无人机编队飞行成为了近来的研究热点^[4]。

编队控制是无人机编队飞行的基础, 在目前的研究中, 常用的编队控制方法包括基于 leader-follower 法、行为法和虚拟结构法。文献[5]利用基于 leader-follower 法的思想, 引入了分支、全球领导者、局部领导者和局部追随者的概念, 设计了紧密的编队控制算法, 严格控制了无人机的队形。文献[6]采用基于行为法的编队控制方式, 设计了鲁棒性良好的实时自主导航集群控制律。文献[7]将编队反馈和动力学反演相结合, 设计了基于虚拟结构法的编队控制方式, 并在非线性六自

由度无人机模型上进行仿真, 验证了所设计控制方式的有效性。正如文献[8]所述, 这3种研究比较成熟的编队控制算法各有优缺点, 例如基于 leader-follower 法的编队控制算法, 其控制简单, 计算量小, 无人机仅需与领航机进行信息交互, 便能形成队形。但是, 基于链式 leader-follower 法的系统中无位置误差的反馈, 位置误差会逐级累积扩大, 易造成跟随机掉队的情况, 而且领航机故障会导致整个编队瘫痪。

Ren^[9]认为传统的基于 leader-follower 法、行为法和虚拟结构法的编队控制算法都可以统一到一致性结构框架下, 并且使用一致性理论进行编队控制能克服这些传统算法的一些缺点。一致性理论的基本思想是各个智能体在一定通信网络下, 通过近邻间的信息交换, 分布式地产生一种算法, 使智能体在有关协作事件的若干问题上形成一致意见, 从而达到协同的目的。将一致性理论用于编队控

收稿日期: 2022-06-11; 录用日期: 2022-07-22; 网络出版时间: 2022-12-28 16:52

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221227.1521.003

基金项目: 国家自然科学基金(52102453); 航空科学基金(20180511001)

*通信作者. E-mail: liangtj@avic.com

引用格式: 苟进展, 梁天骄, 陶呈纲, 等. 基于一致性理论的无人机编队控制与集结方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(5): 1646-1654.
GOU J Z, LIANG T J, TAO C G, et al. Formation control and aggregation method of UAV based on consensus theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(5): 1646-1654 (in Chinese).

制的优点在于引入了邻居无人机的状态反馈,编队中的无人机能利用反馈信息及时调整自己的飞行状态,从而形成精确的队形^[10]。

基于一致性算法的无人机编队控制具有适应性好、鲁棒性高、可靠性强的优点,因此,越来越多的研究围绕其开展。文献[11]基于空间马尔可夫随机场建立信息一致性模型,引入虚拟基准的概念,提高了一致性算法的适应性。文献[12]利用线性二次调节器优化设计方法,采用有限时间控制和切换控制技术,得到了针对多架四旋翼无人机的基于非光滑一致性理论的编队控制算法。文献[13]研究了时延环境下的时变编队控制问题,设计了能应对较大通信时延的一致性控制算法。针对多无人机间的通信拓扑结构可能发生变化的情况,文献[14]研究了基于时变通信拓扑结构的一致性编队控制算法,降低了集群系统对通信拓扑结构的要求。文献[15]对一致性算法进行了改进,使其能在 Ox 、 Oy 与 Oz 方向上对编队队形进行控制,得到了具有良好的通用性的编队控制算法。无人机在飞行过程中必须满足路径安全性、可飞行的要求,大多数的研究提升了一致性算法用于编队时的适应性和稳定性,而对算法收敛过程中指令的约束处理还不够完善,例如文献[15]虽然针对指令的约束条件提出了相应的调整策略,但其处理过于繁琐,不利于工程实现。在防止无人机机间碰撞方面,文献[16]引入了人工势场,这种方法对于低速飞行的无人机能起到不错的效果。但是,对于高速飞行的紧密多无人机编队来说,人工势场法不一定能在极短的时间内使无人机错开高度,存在启动慢,可靠性低的问题。另外,现有的一致性算法大多对无人机的初始条件较为敏感,将其应用于不同的场景需进行频繁调参,且其收敛时间不能被有效控制,具有可控性和适应性不高的问题。

基于以上描述,本文根据纵向和横航向解耦的带自动驾驶仪的三自由度运动学模型的特点,提出了基于改进一致性算法的编队队形控制算法。然后,针对远距离成形和机间防撞问题,提出无人机集结-成形策略。本文的创新点如下。

1) 提出了基于改进一致性算法的编队控制算法,实现对无人机速度、航向角和高度的控制。

2) 提出无人机机动约束处理方法,分别对控制项所对应的速度和加速度指令信号进行约束,得到可行的飞行指令。

3) 为提高本文算法在不同初始条件下的适应性及在编队成形过程中的安全性,提出无人机集

结-成形策略。设计集结过程,将无人机初始成形间距控制在一定范围内,并利用粒子群算法优化无人机的集结速度,避免航迹冲突,结合集结高度差和三步成形法,避免无人机在成形过程中发生机间碰撞。

1 坐标系及无人机运动学模型

本节首先介绍了2种坐标系,用于描述无人机运动状态和队形;然后,给出了无人机的运动学模型和相应的机动约束条件。

1.1 坐标系及队形描述

本文将无人机看作质点,建立地面坐标系描述无人机在空间中的运动状态。地面坐标系为固定在地球表面的一种坐标系,其原点 O 可固定在地平面任意位置,一般选取在无人机初始位置附近, Ox^g 轴方向也可在地平面上任意选取, Oz^g 轴方向竖直向上垂直于水平面, Oy^g 轴方向通过右手法则确定。为直观地描述编队中各飞机间的相对状态信息,建立坐标系 $Ox^f y^f$, 该坐标系的原点与地面坐标系原点固联在一起,其 Oz^f 轴与地面坐标系 Oz^g 轴重合在一起,其 Ox^f 轴方向为编队理想飞行方向。2种坐标系的具体关系如图1所示,其之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x^f \\ y^f \\ z^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi^* & \sin\varphi^* & 0 \\ -\sin\varphi^* & \cos\varphi^* & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^g \\ y^g \\ z^g \end{bmatrix} \quad (1)$$

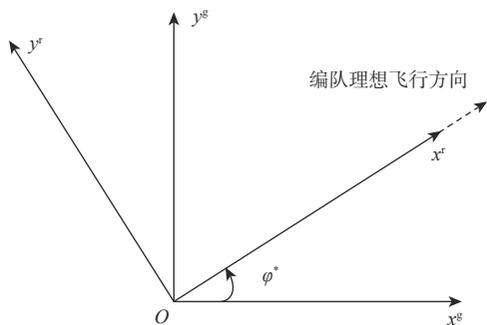


图1 $Ox^g y^g$ 坐标系与 $Ox^f y^f$ 坐标系的关系

Fig. 1 Position relation between $Ox^g y^g$ coordinate system and $Ox^f y^f$ coordinate system

图中, φ^* 为理想航向角,在 $Ox^f y^f$ 系中,编队理想飞行方向始终为 Ox^f 轴方向,因此,可直接根据 Ox^f 轴方向设计编队的相对位置矩阵 R_x 、 R_y 和 R_z 如式(2)所示。在式(2)中,矩阵的元素 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) ($i, j=1, 2, \dots, m$) 分别为无人机 i 与无人机 j 在 Ox 、 Oy 和 Oz 方向上的相对距离。编队收敛到目标队形时,无人机 i 与 j 之间的相对位置坐标应满足式(3)所示的条件。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mm} \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mm} \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mm} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_i^t - x_j^t) \rightarrow x_{ij} \\ (y_i^t - y_j^t) \rightarrow y_{ij} \\ (z_i^t - z_j^t) \rightarrow z_{ij} \end{array} \right. \quad (3)$$

1.2 无人机运动学模型

在无人机编队控制中,采用纵向和横航向解耦的带自动驾驶仪的三自由度运动学模型^[17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_i = v_i \cos \varphi_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \varphi_i \\ \dot{v}_i = \frac{1}{\tau_v} (v_i^c - v_i) \\ \dot{\varphi}_i = -\frac{1}{\tau_\varphi} \dot{\varphi}_i + \frac{1}{\tau_\varphi} (\varphi_i^c - \varphi_i) \\ \dot{z}_i = -\frac{1}{\tau_z} \dot{z}_i + \frac{1}{\tau_z} (z_i^c - z_i) \end{array} \right. \quad (4)$$

式中:模型输入指令 $u_i = (v_i^c, \varphi_i^c, z_i^c)$, 分别为自动驾驶仪的一阶水平面速度指令、二阶航向角指令和二阶高度指令; v_i 、 φ_i 和 z_i 分别为水平面速度、航向角和高度; \dot{v}_i 为水平面加速度; $\dot{\varphi}_i$ 和 $\ddot{\varphi}_i$ 分别为航向角速度和航向角加速度; \dot{z}_i 和 \ddot{z}_i 分别为爬升(下降)率与爬升(下降)加速度; τ_v 、 τ_φ 、 τ_φ 、 τ_z 和 τ_z 分别为水平面速度、航向角速度、航向角、爬升(下降)率和飞行高度指令的时间常数。为满足机动性约束,本文对无人机各方向上的速度与加速度约束如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i \in [v_{\min}, v_{\max}], \dot{v}_i \in [a_{\min}, a_{\max}] \\ \dot{\varphi}_i \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}], \ddot{\varphi}_i \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] \\ \dot{z}_i \in [v_{\min}^z, v_{\max}^z], \ddot{z}_i \in [a_{\min}^z, a_{\max}^z] \end{array} \right. \quad (5)$$

2 融合集结过程的编队控制算法

文献[18]给出了一致性算法的基本理论,本节将根据最基本的一致性理论,设计无人机在横航向和纵向上的控制算法,再将无人机机动约束条件引入至控制指令中,得到本文算法。然后,针对远距离成形的调参问题,设计了无人机集结-成形策略。

2.1 本文算法

式(4)给出了无人机的运动学方程,当水平面速度指令 v_i^c 、航向角指令 φ_i^c 和高度指令 z_i^c 确定时,

无人机在下一采样时刻的飞行状态则被确定。本文主要根据式(4)所示的运动学模型的特点,对文献[18]中基本的一致性算法进行了改进,使改进后的一致性算法能直接输出运动学模型所需的指令,便于对相关机动约束进行处理,免去了如文献[15]中关于指令约束的繁琐处理。改进后一致性算法在水平面速度、航向和高度上的队形控制算法如式(6)~式(8)所示。其中,式(6)为水平面内速度的一阶一致性算法,式(7)和式(8)分别为航向角和高度的二阶一致性算法。

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i^c = v_i + \tau_v u_{vi} \\ u_{vi} = b_i (v_i^* - v_i) - \sum_{j=1}^n a_{ij} [(x_i - x_j - x_{ij}) + \alpha_v (v_i - v_j)] \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_i^c = \varphi_i + \frac{\tau_\varphi}{\tau_\varphi} \dot{\varphi}_i + \tau_\varphi u_{\varphi i} \\ u_{\varphi i} = c_i (\varphi_i^* - \varphi_i) - \beta_\varphi \dot{\varphi}_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} [(\varphi_i - \varphi_j) + k_{y_i} (y_i - y_j - y_{ij}) + \alpha_\varphi (\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_j)] \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_i^c = z_i + \frac{\tau_z}{\tau_z} \dot{z}_i + \tau_z u_{zi} \\ u_{zi} = d_i (z_i^* - z_i) - \beta_z \dot{z}_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} [(z_i - z_j - z_{ij}) + \alpha_z (\dot{z}_i - \dot{z}_j)] \end{array} \right. \quad (8)$$

在式(6)~式(8)中, u_{vi} 、 $u_{\varphi i}$ 和 u_{zi} 为当前编队飞行的反馈信号, v_i^* 和 z_i^* 为编队的理想飞行水平面速度和理想高度,其所在项为本文算法的跟踪给定项,旨在跟踪到编队的理想飞行状态。 b_i 、 c_i 和 d_i 为跟踪给定项的控制系数,满足 $b_i, c_i, d_i > 0$ 。 α_v 、 α_φ 和 α_z 表示相应项增益的正数。在二阶一致性算法中,还包含速度阻尼项 $-\beta_\varphi \dot{\varphi}_i$ 和 $-\beta_z \dot{z}_i$, 其中, β_φ 和 β_z 为阻尼系数。式(6)~式(8)中的求和项为编队飞行的一致项,其作用使不同无人机的状态趋于一致,同时使无人机收敛到目标队形。

在本文算法中,编队在水平面内的理想速度方向始终为 Ox^f 轴方向,因此,本文将编队在 Ox^f 方向上的队形信息添加到本文算法的速度控制项中。当任意2架无人机在 Ox^f 方向上的距离确定以后,再确定这2架无人机的连线与 Ox^f 轴的夹角,便能得到编队在水平面内的队形。所以,确定编队在 Ox^f 方向上的队形后,编队在 Oy^f 方向上的队形信息则受相关夹角影响(即 Oy^f 方向上的队形信息与航向角队形信息存在一定的转换关系),所以本文将编队在 Oy^f 方向上的队形信息加入到如式(7)所示的本文算法的航向控制项中,用 $k_{y_i}(y_i - y_j - y_{ij})$ 代替相应的角度信息,其中, k_{y_i} 为转换参数。当编队收敛时,

则 $|v^* - v_i| \rightarrow 0$, $|\varphi^* - \varphi_i| \rightarrow 0$, $|z^* - z_i| \rightarrow 0$, $\dot{\varphi}_i \rightarrow 0$, $\dot{z}_i \rightarrow 0$, 同时不同无人机在 Ox^f 、 Oy^f 和 Oz^f 方向上的距离分别收敛到预设队形中的距离如式 (3) 所示。

但是,关于无人机机动性的约束并没有在式 (6)~式 (8) 所示的本文算法中体现,由此得到的指令信号在无人机的实际飞行中可能不可行。式 (4) 和式 (5) 给出了无人机的运动学方程及机动约束条件,以更新下一时刻无人机可行的飞行状态。在本文算法中,本文也对 v_i 、 \dot{v}_i 、 $\dot{\varphi}_i$ 、 $\dot{\varphi}_i$ 、 \dot{z}_i 与 \dot{z}_i 进行了约束,以得到可行的飞行指令。机动约束处理方法以 u_{vi} 为例,其值可通过修正以满足 v_i 和 \dot{v}_i 的约束条件,如式 (9)~式 (11) 所示。

$$a'_{\min} = \max \left\{ a_{\min}, \frac{v_{\min} - v_i}{\Delta t} \right\} \quad (9)$$

$$a'_{\max} = \min \left\{ \frac{v_{\max} - v_i}{\Delta t}, a_{\max} \right\} \quad (10)$$

$$u'_{vi} = \min \{ a'_{\max}, \max \{ a'_{\min}, u_{vi} \} \} \quad (11)$$

式中: Δt 为采样时间间隔; a'_{\min} 与 a'_{\max} 分别为融入 v_i 约束后,关于 \dot{v}_i 新的约束的下限和上限; u'_{vi} 为修正后的 u_{vi} 的值。经过以上处理,本文算法产生的指令能同时满足 v_i 和 \dot{v}_i 的约束条件。类似地, $u_{\varphi i}$ 和 $u_{z i}$ 也可以采取以上方式进行修正,以满足 $\dot{\varphi}_i$ 、 $\dot{\varphi}_i$ 、 \dot{z}_i 与 \dot{z}_i 的约束条件,具体方法如式 (12)~式 (17) 所示。利用修正后的 u'_{vi} 、 $u'_{\varphi i}$ 与 $u'_{z i}$ 的值,便能得到满足无人机机动约束条件的指令信号。

$$\alpha'_{\min} = \max \left\{ \alpha_{\min}, \frac{\omega_{\min} - \dot{\varphi}_i}{\Delta t} \right\} \quad (12)$$

$$\alpha'_{\max} = \min \left\{ \frac{\omega_{\max} - \dot{\varphi}_i}{\Delta t}, \alpha_{\max} \right\} \quad (13)$$

$$u'_{\varphi i} = \min \{ \alpha'_{\max}, \max \{ \alpha'_{\min}, u_{\varphi i} \} \} \quad (14)$$

$$\alpha''_{\min} = \max \left\{ \alpha_{\min}, \frac{v_{\min}^z - \dot{z}_i}{\Delta t} \right\} \quad (15)$$

$$\alpha''_{\max} = \min \left\{ \frac{v_{\max}^z - \dot{z}_i}{\Delta t}, \alpha_{\max} \right\} \quad (16)$$

$$u'_{z i} = \min \{ \alpha''_{\max}, \max \{ \alpha''_{\min}, u_{z i} \} \} \quad (17)$$

为避免机间碰撞,在高度控制项中引入了如文献 [16] 所述的人工势场。当 2 架飞机在水平面上的距离 Δd_u 和高度上的距离 Δh_u 都分别小于设定的阈值 d_{safe} 和 h_{safe} 时,则启动人工势场,使这 2 架无人机在高度方向上距离增大。

为增大编队成形过程中的安全裕度,无人机将被指引至不同的高度层,然后采用编队三步成形法完成成形。第 1 步,无人机仅在各自高度层上运动,使编队在水平面上的投影达到目标队形的疏开形式(即目标队形等比例扩大队形)。第 2 步,保持

横航向上的队形,各架无人机在高度方向上运动,使编队达到目标纵向队形。第 3 步,编队收缩成目标队形。

2.2 无人机集结-成形策略

在编队成形过程中,当不同无人机起飞位置间距改变较大时,一致性算法的航向控制项中的参数 k_{y_i} 也需要做相应的调整,无人机的航向反馈信号一直被 $k_{y_i}(y_i - y_j - y_j)$ 项的累和所主导,在机动约束修正限制下,一致性算法无法及时根据无人机的相对信息反馈输出有效的成形指令,导致本文算法失效。为提升本文算法的适应性,避免频繁调参,本节提出了无人机集结-成形策略。在该策略下进行编队成形时,无人机需先飞到指定的集结区域完成汇合,当无人机间距稳定在一定的范围内后,完整的一致性算法才被用于编队成形中。

在集结过程中,每架无人机在集结区域的目标点各不相同,且运动相对独立,需分别为其规划航路。为避免集结时无人机发生机间碰撞,每架无人机的飞行速度将被优化。虽然集结过程中的航迹规划问题涉及到多架无人机,但是无人机的航迹规划是依次进行的,即每次只规划一架无人机的航迹,后进行航迹规划的无人机应避免与已经规划好航迹的无人机发生冲突,因此,后进行规划的无人机需要考虑更多的约束。本文策略可将一个大规模的优化问题(优化变量为多架无人机的控制量)分解为若干小规模优化问题(优化变量为单架无人机的控制量),有助于提高计算速度和航迹质量。

无人机在朝各自目标点飞行时,利用式 (6)~式 (8) 所示的本文算法的跟踪给定项求解单机飞行指令,并在每一采样时刻调整自己的理想航向角,以使无人机能最终抵达目标点。无人机 i 在 4 个象限中理想航向角的计算式为

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \left| \arctan \left(\frac{y_i^* - y_i}{x_i^* - x_i} \right) \right| + \frac{\pi}{2} & y_i^* - y_i \geq 0, x_i^* - x_i < 0 \\ - \left| \arctan \left(\frac{y_i^* - y_i}{x_i^* - x_i} \right) \right| - \frac{\pi}{2} & y_i^* - y_i < 0, x_i^* - x_i < 0 \\ \arctan \left(\frac{y_i^* - y_i}{x_i^* - x_i} \right) & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中: (x_i^*, y_i^*) 和 (x_i, y_i) 分别为无人机 i 在 $Ox^s y^s$ 系中的目标点坐标和当前位置坐标。

对无人机速度进行优化时,为使各架无人机在满足约束条件下尽快到达集结区并在最短的时间间隔内进行汇合,本文根据规划无人机的顺序设计了相应的优化指标。在规划第 1 架无人机时,优化目标是使无人机到达集结区域的时间最短,而在规划后续的无人机时,优化目标则是使该无人机与已

规划好航迹的无人机达到集结区域的时间间隔最短。包含 N_U 架无人机的优化问题表述为

$$\begin{cases} \min J_i = \begin{cases} \mu t_i & i = 1 \\ \sigma \sum_{j=1}^{i-1} t_{\text{gap}}^i(j) & i = 2, 3, \dots, N_U \end{cases} \\ \text{s.t.} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_U} C_{ij} = 0, v_{\min}^i < v_i^* < v_{\max}^i \end{cases} \quad (19)$$

式中: J_i 为第 i 架无人机的优化指标; t_i 为第 i 架无人机到达集结区域的飞行时间; $t_{\text{gap}}^i(j)$ 为无人机 i 与已规划好航迹的无人机 j 到达集结区域时的时间间隔; μ 与 σ 为相应优化项的系数。该优化问题中最重要的约束条件是任意 2 架无人机的航迹无冲突, 因此, 定义了冲突矩阵 $C = [C_{ij}]_{N_U \times N_U}$, $C_{ij} = 0$ 表示无人机 i 与无人机 j 的航迹无冲突。

在此优化问题中, 优化变量为每架无人机的速度 $v_i^* (i=1, 2, \dots, N_U)$, 采用粒子群算法对其进行优化, 更新 v_i^* 的计算式为

$$\Delta v_{ik}^*(o+1) = \omega \Delta v_{ik}^*(o) + c_1 r_1 (v_{kb}^*(o) - v_{ik}^*(o)) + c_2 r_2 (v_{gb}^*(o) - v_{ik}^*(o)) \quad (20)$$

$$v_{ik}^*(o+1) = v_{ik}^*(o) + \Delta v_{ik}^*(o+1) \quad (21)$$

式中: $v_{ik}^*(o)$ ($k=1, 2, \dots, N$; $o=1, 2, \dots, T_{\max}$) 为在第 o 次迭代中粒子 k 的优化变量, N 为粒子个数, T_{\max} 为最大迭代次数; $\Delta v_{ik}^*(o+1)$ 为优化变量的增量; ω 为惯性权重; $v_{kb}^*(o)$ 为第 k 个粒子在第 o 次迭代中的个体极值点; $v_{gb}^*(o)$ 为种群的全局极值点; c_1 和 c_2 为加速系数; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间服从均匀分布的随机数。在解的更新过程中, 若出现违背约束的情况, 则将优化指标置为 0, 表示不可行解, 具体的伪代码如下。

算法 无人机集结的粒子群算法

1: for $i=1: N_U$

2: 初始化粒子种群状态;

3: for $t=1: T_{\max}$

4: for $k=1: N$

5: 更新 v_{ik}^* ;

6: 生成航迹, 更新 J_{ik} ;

7: while $J_{ik} = 0$

8: 随机产生新的 v_{ik}^* , 并转第 6 步;

9: end

10: 更新种群状态;

11: end

12: end

13: 得到无人机 i 的航迹, 并将其添加至后续无人机 $j (j > i)$ 的约束条件中;

14: end

为提高编队成形阶段的安全裕度, 各架无人机在集结区域的目标点被置于处于不同的高度层, 这个高度差正好配合 2.1 节所述的编队三步成形法。集结过程中, 为解决无人机不能同时到达指定目标点的问题, 先到达的无人机将在其目标点所在的高度层盘旋以等待其他无人机, 当最后一架无人机抵达目标点时, 则无人机集结成功。

3 仿真验证与结果分析

本文以 4 架无人机组成的菱形编队为例, 设计了 2 组仿真算例, 分别验证了本文算法与本文策略的有效性。在这 2 组算例中, 编队目标队形的 R_x 和 R_y 如式 (22) 所示, R_z 为零矩阵, 无人机机动性能参数如表 1 所示。

$$\begin{cases} R_x = \begin{bmatrix} 0 & 60 & 60 & 120 \\ -60 & 0 & 0 & -60 \\ -60 & 0 & 0 & -60 \\ -120 & -60 & -60 & 0 \end{bmatrix} \\ R_y = \begin{bmatrix} 0 & -60 & 60 & 0 \\ 60 & 0 & 120 & 60 \\ -60 & -120 & 0 & -60 \\ 0 & -60 & 60 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (22)$$

表 1 无人机机动性能参数

Table 1 Maneuvering performance parameters of UAV

| $v_{\max}^i /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | $v_{\min}^i /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | $a_{\max}^i /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) | $a_{\min}^i /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) | $\omega_{\max}^i /$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) | $\omega_{\min}^i /$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) | $\alpha_{\max}^i /$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$) | $\alpha_{\min}^i /$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$) | $v_{\max}^z /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | $v_{\min}^z /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | $a_{\max}^z /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) | $a_{\min}^z /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) |
|--|--|--|--|---|---|---|---|--|--|--|--|
| 300 | 50 | 49 | -49 | $\frac{\pi}{9}$ | $-\frac{\pi}{9}$ | $\frac{\pi}{12}$ | $-\frac{\pi}{12}$ | 20 | -20 | 4 | -4 |

3.1 本文算法仿真结果

本节利用本文算法, 对编队成形过程进行了仿真。设置编队理想飞行状态为 $v^*=100 \text{ m/s}$ 、 $\varphi^*=45^\circ$ 、 $z^*=600 \text{ m}$, 无人机的初始位置坐标信息如表 2 所示, 其中, UAV 表示无人机, 一致性算法中参数设置为 $\tau_v=1$, $\tau_\varphi=\tau_z=0.694$, $\tau_\psi=\tau_z=0.417$, $b_i=c_i=1$, $d_i=3$, $\alpha_v=\alpha_\psi=1$, $\alpha_z=2$, $\beta_\psi=1$, $\beta_z=10$, $k_{\psi_y}=0.001$, 设置无人机间的

安全距离 $d_{\text{saf}}=50 \text{ m}$, $h_{\text{sap}}=30 \text{ m}$, 得到编队成形仿真如图 2~图 4 所示。

图 2 为编队在成形过程中的飞行航迹、队形变化和飞行状态的情况, 本文三维图中 y 轴由大到小可更好地展示航迹情况, 由图可知, 本文算法能使不同初始状态的无人机形成目标队形, 并使本文算法中水平面内速度、航向角、高度在较短时间内收

表 2 无人机初始位置信息

Table 2 Initial position information of UAVs

| 无人机 | x/m | y/m | z/m |
|------|--------|--------|-------|
| UAV1 | -3 565 | -2 846 | 0 |
| UAV2 | 4 098 | 3 415 | 0 |
| UAV3 | 1 372 | 2 588 | 0 |
| UAV4 | -3 360 | 1 612 | 0 |

收敛至预设的理想状态值 v^* 、 φ^* 、 z^* , 实现编队飞行。同时, 在成形过程中, 为进一步减小无人机间碰撞的可能性, 由图 2(a) 和图 2(f) 可知, 在 40~110 s 期

间, 无人机在高度上出现了分层, 并在水平面内形成了疏开队形(其无人机间的相对距离为目标队形的 3 倍)如图 2(b) 所示。

图 2(d) 和图 3 给出了编队成形过程中无人机动参数的变化情况, 这些参数都在其取值范围内(见表 1)波动, 如图 3 中虚线所示, 证明本文策略的有效性。图 4 为每一时刻各架无人机与距离最近的相邻无人机的机间距离, 可见在成形过程中, 无人机能保持安全距离飞行。

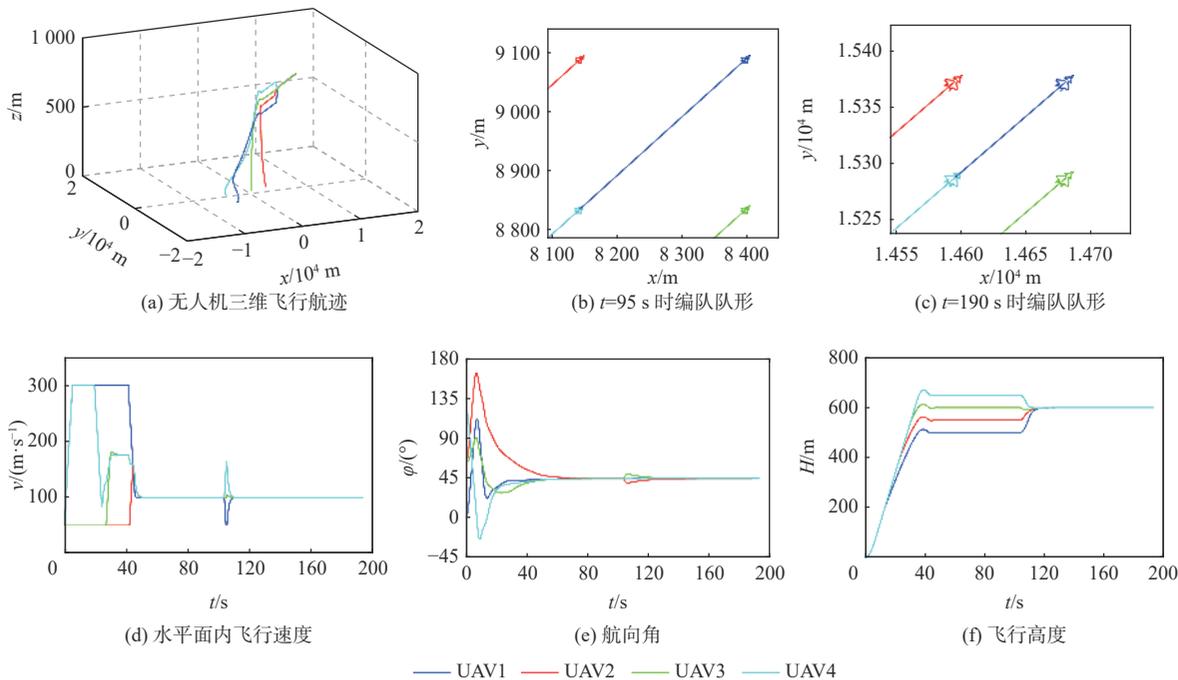


图 2 编队成形飞行航迹及状态响应

Fig. 2 Trajectories and state response of formation forming flight

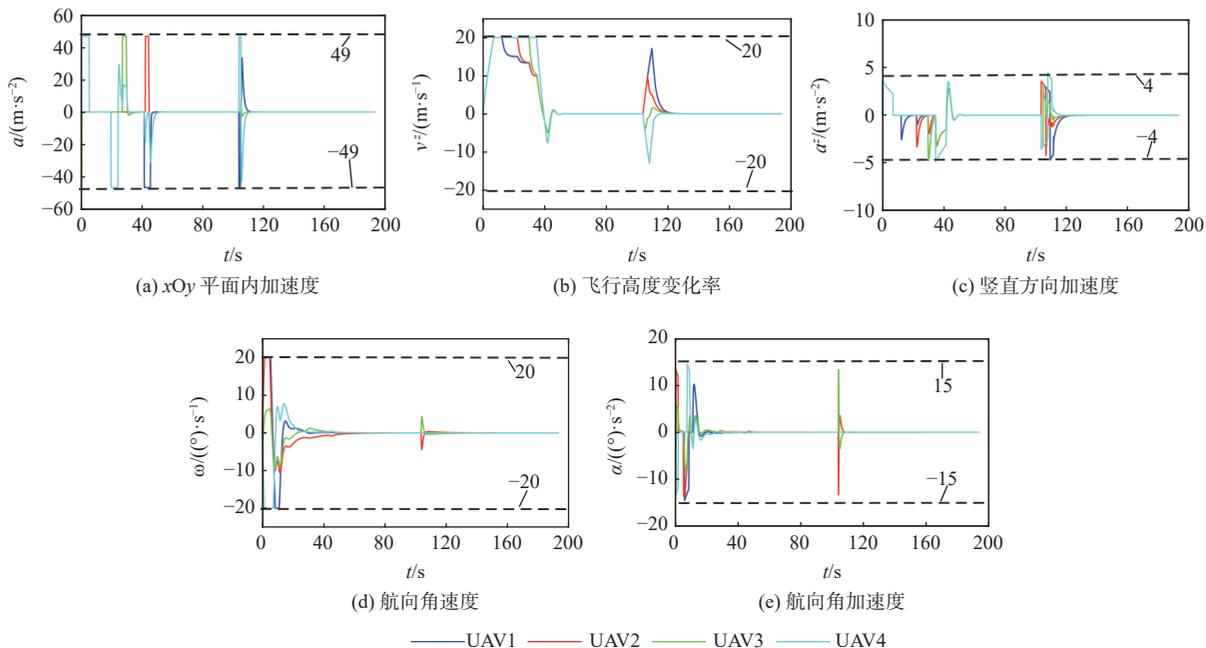


图 3 无人机动性约束值

Fig. 3 Values of constraints for UAV maneuverability

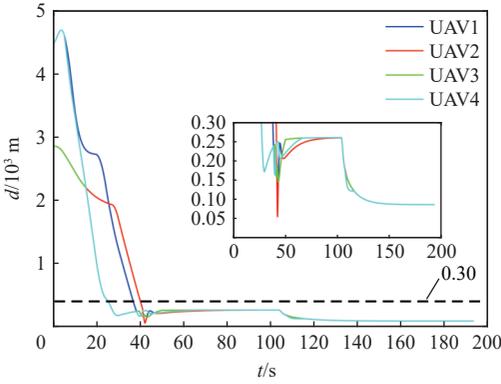


图4 无人机与其他无人机间最小距离

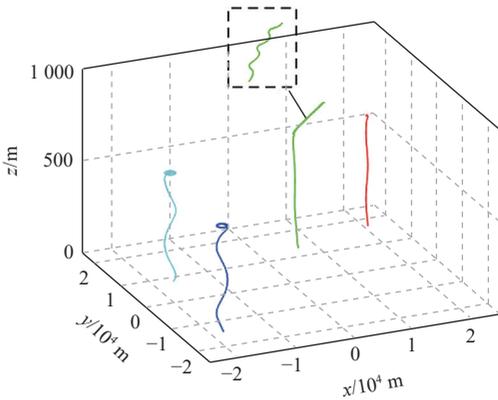
Fig. 4 Minimum distance between UAV and other UAVs

3.2 本文策略仿真结果

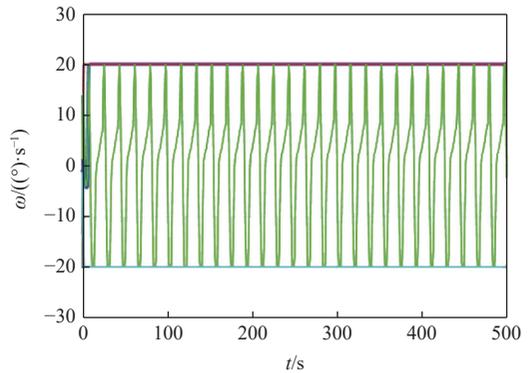
为验证本文策略的有效性,本节将表2所示的各无人机的出发间距扩大为原来的5倍(即将表2中的坐标值扩大为原来的5倍),设置了直接成形策略和本文策略2组仿真。在粒子群算法中,相关

参数设置参考文献[19]。

如图5所示,当无人机起飞位置相距较远时,各无人机能到达理想高度,但在水平面上,编号为1号、2号和4号的无人机却一直以最大航向角速度做盘旋运动,3号无人机虽能朝着理想航向飞行,但其运动的形式是振荡的。随着时间的推移,各架无人机仍保持着图中的运动状态,无法形成指定队形。之所以出现这样的情况,是因为在较远的起飞间距下,式(7)中的参数 k_{y_i} 未进行相应的调整(其值过大),导致1号、2号和4号无人机的反馈信号 u_{ef} 一直被 $k_{y_i}(y_i - y_j - y_{ij})$ 项的累和所主导而输出其最大值,因此,这些无人机一直做盘旋运动,图5(b)中这些无人机的航向角加速度曲线证实了这一点。无人机朝着理想航向飞行不会影响各无人机在 $Ox'y'$ 系中 y 方向的间距,但1号、2号和4号无人机所作的盘旋运动会周期性改变这个距离,所以3号无人机制作航迹大致指向理想航向的振荡运动。



(a) 无人机三维飞行航迹



(b) 航向角速度

— UAV1 — UAV2 — UAV3 — UAV4

图5 无人机初始间距较大时的编队成形

Fig. 5 Formation forming when the initial distance between UAVs is large

图6和图7分别为无人机集结和集结后编队成形的情况。如图6所示,各无人机能从间隔较远的位置出发,在指定的球形集结区域的不同高度层进行汇合。汇合后,各无人机间的距离是可控的,因

此,可使用固定的参数 k_{y_i} 使无人机形成编队。图7为无人机集结后编队成形的仿真结果,由图可知,无人机能利用集结产生的高度差,根据3.2节中给出的各成形阶段的策略,分3步安全有效地完成编队成形。

通过对比仿真结果,可见直接成形策略和本文策略2种策略的差别主要体现在2个方面。首先,在直接成形策略下,固定参数的一致性算法无法使初始状态发生较大变化的无人机形成编队,因此,一致性算法会受初始状态的影响而出现频繁调参的问题。增加集结过程后,编队成形前的距离总会被控制到一定的范围内,使得一致性算法不再受无人机初始状态的影响,因此,本文策略具有更强的适应性。其次,本文策略也比直接成形策略更安全可靠,因为集结完成后各无人机处于不同的高度

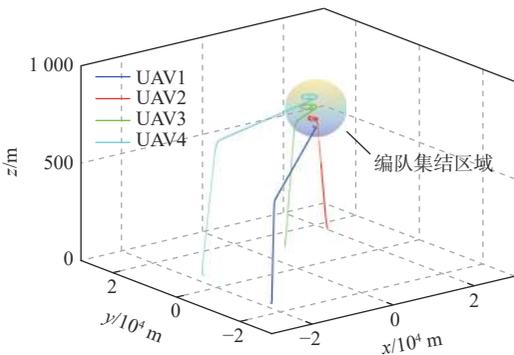


图6 无人机集结飞行航迹

Fig. 6 Trajectories of UAVs at gathering

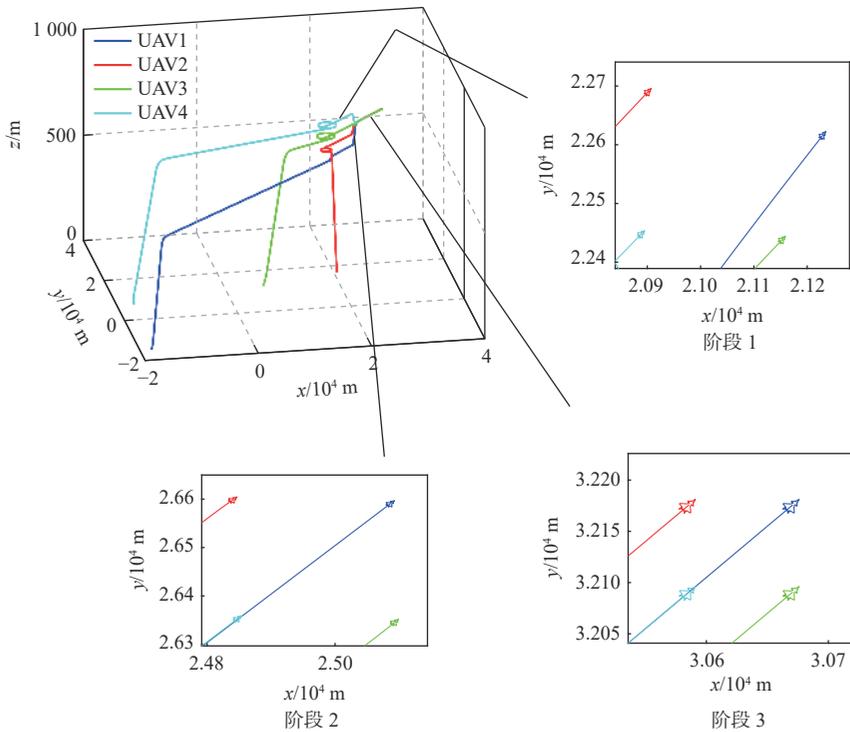


图 7 含无人机集结的编队成形飞行航迹

Fig. 7 Trajectories of formation forming with UAVs gathering phase

层,能更好地配合编队三步成形法,避免成形阶段无人机在同一高度上产生交叉航迹。除上述 2 个方面以外,本文策略还具有可控性好的优点,因为集结后一致性算法的收敛时间不再受初始条件的影 响,所以编队完成成形所花的时间变得更可控。

4 结 论

1) 根据纵向和横航向解耦的带自动驾驶仪的三自由度运动学模型的特点,设计了本文算法。

2) 在编队成形前,利用粒子群算法优化各无人机的理想飞行速度,使无人机在无冲突的情况下尽快到达集结区域,形成了本文策略,使得一致性算法不受初始条件限制,并使无人机在可控的时间内快速形成编队。

3) 仿真结果显示,本文算法能使无人机在满足机动性的情况下形成队形,本文策略能使无人机在不同初始条件下形成队形,并在成形过程中避免机间碰撞。

参考文献 (References)

[1] 张军国, 闫浩, 胡春鹤, 等. 无人机在林业中的应用及前景展望[J]. 林业工程学报, 2019, 4(1): 8-16.
ZHANG J G, YAN H, HU C H, et al. Application and future development of unmanned aerial vehicle in forestry[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(1): 8-16(in Chinese).

[2] 南江林. 消防无人机研究与应用前景分析[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(8): 1105-1107.

NAN J L. The research and application prospect analysis of fire UAV[J]. *Fire Science and Technology*, 2017, 36(8): 1105-1107(in Chinese).

[3] 代威, 张洪涛, 惠俊鹏. 无人机在未来海战场中的应用分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(1): 21-24.
DAI W, ZHANG H T, HUI J P. Application analysis of UAV in future naval warfare field[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(1): 21-24(in Chinese).

[4] 韩亮, 任章, 董希旺, 等. 多无人机协同控制方法及应用研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 1-7.
HAN L, REN Z, DONG X W, et al. Research on cooperative control method and application for multiple unmanned aerial vehicles[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, 5(4): 1-7(in Chinese).

[5] NO T S, KIM Y, TAHK M J, et al. Cascade-type guidance law design for multiple-UAV formation keeping[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15(6): 431-439.

[6] SAIF O, FANTONI I, ZAVALA-RÍO A. Distributed integral control of multiple UAVs: Precise flocking and navigation[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2019, 13(13): 2008-2017.

[7] ASKARI A, MORTAZAVI M, TALEBI H A. UAV formation control via the virtual structure approach[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 28(1): 04014047.

[8] 杜永浩, 王凌, 邢立宁. 空天无人系统智能规划技术综述[J]. 系统工程学报, 2020, 35(3): 416-432.
DU Y H, WANG L, XING L N. Intelligent planning technologies for unmanned aerospace system: A literature review[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(3): 416-432(in Chinese).

[9] REN W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2): 505-512.

- [10] GULZAR M M, RIZVI S T H, JAVED M Y, et al. Multi-agent cooperative control consensus: A comparative review[J]. *Electronics*, 2018, 7(2): 22.
- [11] 陈旸, 张鑫, 金鑫, 等. 一种多智能体协同信息一致性算法[J]. *航空学报*, 2017, 38(12): 321222.
CHEN W, ZHANG X, JIN X, et al. A cooperative information consensus algorithm for multi-agent system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(12): 321222(in Chinese).
- [12] DU H B, ZHU W W, WEN G H, et al. Distributed formation control of multiple quadrotor aircraft based on nonsmooth consensus algorithms[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(1): 342-353.
- [13] 何吕龙, 张佳强, 侯岳奇, 等. 有向通信拓扑和时延条件下的无人机集群时变编队控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(2): 314-323.
HE L L, ZHANG J Q, HOU Y Q, et al. Time-varying formation control for UAV swarm with directed interaction topology and communication delay[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(2): 314-323(in Chinese).
- [14] DONG X W, 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[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(6): 5014-5024.
- [15] 吴宇, 梁天骄. 基于改进一致性算法的无人机编队控制[J]. *航空学报*, 2020, 41(9): 323848.
WU Y, LIANG T J. Improved consensus-based algorithm for unmanned aerial vehicle formation control[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(9): 323848(in Chinese).
- [16] 张佳龙, 闫建国, 张普, 等. 基于一致性算法的无人机协同编队避障研究[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(9): 168-174.
ZHANG J L, YAN J G, ZHANG P, et al. Collision avoidance of unmanned aerial vehicle formation based on consensus control algorithm[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(9): 168-174(in Chinese).
- [17] BEARD R W, MCLAIN T W. Small unmanned aircraft: Theory and practice[M]. Princeton: Princeton University Press, 2012: 164-172.
- [18] REN W, BEARD R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control[M]. Berlin: Springer, 2008: 7-22.
- [19] SHI Y H, EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C]//Proceedings of the Evolutionary Programming VII. Berlin: Springer, 1998: 591-600.

Formation control and aggregation method of UAV based on consensus theory

GOU Jinzhan¹, LIANG Tianjiao^{2,*}, TAO Chenggang², MA Bo², WANG Haifeng², WU Yu¹

(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Fighter Integrated Simulation, Chengdu 610091, China)

Abstract: According to the characteristics of unmanned aerial vehicle kinematics model and the problem of remote forming, an improved consensus-based algorithm was proposed to solve the gathering-forming strategy of unmanned aerial vehicle. The coordinate system which can describe the formation directly was established. According to the characteristics of the three degree-of-freedom kinematics model of unmanned aerial vehicle with autopilot decoupled from longitudinal and transverse directions and the constraints of unmanned aerial vehicle maneuvering performance, the consensus algorithm was improved to realize the control of unmanned aerial vehicle speed, heading and flight altitude. The formation control algorithm was proposed. In addressing the parameter tuning problem caused by the large initial spacing of unmanned aerial vehicle, a gathering process was added. The particle swarm optimization algorithm was used to optimize the gathering speed to avoid trajectory conflicts, and the proposed algorithm was used to generate trajectory of each unmanned aerial vehicle after the gathering, both of which improved the adaptability of the algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm can make unmanned aerial vehicles form a stable formation under the condition of satisfying the maneuverability constraints. Compared with the direct forming method, the proposed strategy improves the adaptability and security of the improved consistency algorithm.

Keywords: unmanned aerial vehicle; formation flight; drone aggregation; consensus theory; particle swarm optimization

Received: 2022-06-11; Accepted: 2022-07-22; Published Online: 2022-12-28 16:52

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221227.1521.003

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52102453); Aeronautical Science Foundation of China (20180511001)

* Corresponding author. E-mail: liangtj@avic.com