

基于改进一致性理论的无人机编队航迹在线规划

乔 港, 吴 宇

(重庆大学航空航天学院, 重庆, 400044)

摘要 针对无人机编队在飞行过程中任务发生变化的情形, 提出了基于改进一致性理论的无人机编队航迹在线规划方法。首先, 针对一致性算法进行改进, 引入人工势场法, 提出了考虑机间距离和相对速度的防碰撞策略; 基于无人机相对位置和状态量, 提出了考虑无人机转弯半径和速度的转弯策略。其次, 基于编队拆分思想和 RRT* 算法, 提出了基于拆分编队思想的在线航迹规划方法。仿真结果表明: 防碰撞策略能使无人机之间在编队成形前保持安全距离, 不发生碰撞; 转弯策略能使编队在转弯过程中保持队形; 编队重组的在线航迹规划方法能满足执行新增任务的情形。

关键词 无人机; 编队飞行; 航迹规划; 防碰撞与转弯; 编队拆分; RRT* 算法

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.04.013

中图分类号 V249; TP391 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)04-0086-08

A Trajectory Planning Online for Unmanned Aerial Vehicle Formation Based on Improved Consistency Theory

QIAO Gang, WU Yu

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Mission being changeable in the process of flight for UAVs formations, a trajectory online planning method is proposed for unmanned aerial vehicle formation based on improved consensus theory. Firstly, the consensus algorithm is improved, and by introducing the artificial potential field method, a collision avoidance strategy is proposed in consideration of inter-vehicle distance and relative velocity. Additionally, a turning strategy is proposed in consideration of the UAV's relative position, state, turning radius, and speed. Furthermore, an online trajectory planning method is presented based on the concept of formation disassembly and the RRT* algorithm. The simulation results show that the collision avoidance strategy can make the intervals of UAVs a safe distance between UAVs before formation is made, preventing collisions, and the turning strategy makes the formation integral in the process of turning, and the trajectory planning method online for formation recombination can handle the execution of new tasks.

Key words UAV; formation flight; trajectory plan; collision avoidance and turning; formation splitting; RRT* algorithm

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(52102453)

作者简介: 乔 港(1997—), 男, 湖北随州人, 硕士生, 研究方向为无人机轨迹规划。E-mail: qiaogang@cqu.edu.cn

通信作者: 吴 宇(1987—), 男, 重庆人, 副教授, 研究方向为飞行器动力学建模与轨迹优化、智能体协同控制、多智能体任务规划、优化算法。E-mail: cquwuyu@cqu.edu.cn

引用格式: 乔港, 吴宇. 基于改进一致性理论的无人机编队航迹在线规划[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(4): 86-93. QIAO Gang, WU Yu. A Trajectory Planning Online for Unmanned Aerial Vehicle Formation Based on Improved Consistency Theory[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(4): 86-93.

当前,无人机已广泛用于军事和民用领域^[1],多架无人机联合飞行能补充单机的局限性^[2]。它们在侦察^[3]、空中加油和搜索救援^[4]等任务中发挥着重要作用。为增强其作战能力,需要研究无人机编队的协同控制^[5]、航迹规划和在线路径规划技术。

目前的无人机编队控制方法包括长机-僚机跟随、虚拟领航和行为控制等。已有研究提出了编队协同控制^[6]和分布式模型预测控制方法^[7],帮助快速形成并保持编队队形^[8]。航迹规划算法分为传统经典算法(如 Dijkstra 算法^[9]、动态规划算法^[10])和现代智能优化算法(如粒子群算法^[11]、遗传算法^[12]、蚁群算法^[13]、A* 算法^[14])。这些算法在路径规划方面做出了贡献,例如基于决策算子和粒子群算法的三维路径规划^[15]及改进的优化算法解决了多无人机路径规划问题。针对无人机编队在线航迹规划,目前的搜索算法有 A* 算法、D* 算法、快速随机树算法和粒子群优化算法。一些研究提出了改进的差分进化算法^[16]和基于量子粒子群的优化算法^[17],以解决航迹规划局部最优和三维问题。但现有研究仍存在一些问题,如一致性算法^[18]中未充分考虑无人机间相对速度可能导致碰撞,以及编队转弯时可能无法保持理想队形等。为此,本文提出了防碰撞策略、转弯策略和基于拆分编队思想的在线航迹规划方法,以解决这些问题。

1 基于一致性理论的无人机编队控制方法

在无人机编队在线航迹规划问题中,针对任务点增加这一情况,提出了拆分编队思想。在为每个编队规划航迹时,先用快速搜索随机树算法(rapidly exploring random trees*, RRT*)计算出航路点,再用一致性算法使编队依次经过各航路点,最终生成无人机编队的飞行航迹。考虑到一致性算法在防止无人机间碰撞和处理转弯过程中编队队形保持问题上的不足,分别提出了改进策略,提高算法性能。

1.1 无人机运动学方程

基于文献[8]给出的无人机三自由度运动学方程可知,无人机速度指令 v_i^c 、航向角指令 φ_i^c 和高度指令 z_i^c 确定时,无人机在下一时刻的飞行状态便能确定。本文采用横航向解耦的带自动驾驶仪无人机三自由度运动学方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \varphi_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \varphi_i \\ \dot{v}_i = \frac{1}{\tau_v} (v_i^c - v_i) \\ \ddot{\varphi}_i = -\frac{1}{\tau_\varphi} \dot{\varphi}_i + \frac{1}{\tau_\varphi} (\varphi_i^c - \varphi_i) \\ \ddot{z}_i = -\frac{1}{\tau_z} \dot{z}_i + \frac{1}{\tau_z} (z_i^c - z_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_i 为水平面速度; $u_i = (v_i^c, \varphi_i^c, z_i^c)$ 为模型的输入指令; v_i^c, φ_i^c 和 z_i^c 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; τ_v, τ_φ 和 τ_z 为水平面速度、高度和爬升率对应的时间常数。

1.2 基本一致性算法及存在问题

根据无人机运动模型特点和基本一致性算法公式,在 3 个方向上设计出基于一致性编队飞行控制律,分别是水平面速度的一阶一致性算法、航向角和高度的二阶一致性算法,详见文献[19]。

关于一致性算法解决编队中无人机碰撞的问题,通常使用人工势场法来增加无人机之间的距离,可能存在由于无人机间相对速度较大而导致来不及错开高度的情况,导致无人机之间发生碰撞。同时,在编队转弯角度很大时,由于每架无人机转弯半径不同,实际队形与理想队形相差很大,不能满足保持队形转弯要求。

针对以上问题,本文提出了基于人工势场法的防碰撞策略,增加了无人机的相对速度阈值判定,考虑了无人机之间相对速度,避免了无人机碰撞。在编队转弯时,采用单机形式的一致性算法,单独为每架无人机生成航迹,利用队形信息控制方法来计算理论转弯轨迹,并将其分配给编队中的无人机,实现整个编队保持队形转弯。

1.3 防碰撞策略

本节基于人工势场法,考虑了队形控制和高度控制,增加了无人机间相对速度阈值判定,避免机间碰撞。引入无人机之间位置关系得到具有队形约束的一致性编队飞行控制律,如式(2)~式(4)所示。

$$\begin{cases} v_i^c = v_i + \tau_v u_{vi} \\ u_{vi} = -b_i(v_i - v^*) - \sum_{j=1}^N a_{ij} [(v_i - v_j) + (x_i - x_j - x_{ij})] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \varphi_i^c = \varphi_i + \frac{\tau_\varphi}{\tau_\varphi} \dot{\varphi}_i + \tau_\varphi u_{\varphi i} \\ u_{\varphi i} = c_i(\varphi^* - \varphi_i) - \beta_\varphi \dot{\varphi}_i - \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot [(\varphi_i - \varphi_j) - a_\varphi (\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_j) + k_{\varphi i} (y_i - y_j - y_{ij})] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_i^c = z_i + \frac{\tau_z}{\tau_{\dot{z}}} \dot{z}_i + \tau_z u_{zi} \\ u_{zi} = -d_i(z_i - z^*) - \beta_z \dot{z}_i - \sum_{j=1}^N a_{ij} [(z_i - z_j - z_{ij}) - k_i^z (\dot{z}_i - \dot{z}_j)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_{vi} 、 $u_{\varphi i}$ 、 u_{zi} 为一致性算法给当前编队飞行的反馈信号; 无人机速度指令 v_i^c 、航向角指令 φ_i^c 、高度指令 z_i^c 为反馈信号相对应的飞行指令; v^* 、 φ^* 、 z^* 分别为无人机编队的理想速度、理想航向角和理想飞行高度。当一致性算法收敛时, 则有 $|v^* - v_i| \rightarrow 0$, $|\varphi^* - \varphi_i| \rightarrow 0$, $|z^* - z_i| \rightarrow 0$, $\dot{\varphi}_i \rightarrow 0$, $\dot{z}_i \rightarrow 0$ 。

以无人机 1 为圆心、 D_{safe} 为半径、 H_{safe} 为高度建立圆柱体, Δd_x 、 Δd_y 和 Δd_v 分别表示无人机 1 与无人机 2 在水平面、高度上的相对距离和两机相对速度, 如图 1 所示。

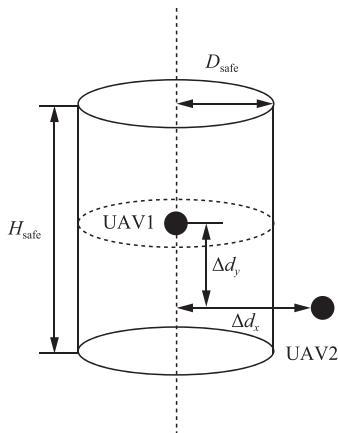


图 1 无人机间信息示意图

定义 2 架无人机之间的人工势场为:

$$U_{ij} = \begin{cases} \frac{k_h}{2} \left(\frac{1}{|\Delta h|+1} + \frac{1}{h+1} \right)^2, & (\Delta d_x \leq D_{\text{safe}} \text{ and } |\Delta d_z| \leq H_{\text{safe}}) \text{ or } \Delta d_v > V_{\text{safe}} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Δh 为 2 架无人机高度方向上差值; h 为无人机所处的水平高度; $k_h \in R$ 为 1 个正实数; V_{safe} 为相对速度阈值。人工势场力的矢量形式可以表示为:

$$\vec{f}_{ca} = \nabla U_c = - \left[\frac{\partial U_c}{\partial U_1}, \frac{\partial U_c}{\partial U_2}, \dots, \frac{\partial U_c}{\partial U_n} \right] \quad (6)$$

对一致性算法进行改进的实质是对飞行高度控制律在某个时刻进行“限幅”或者改变值操纵, 使调整后的控制指令和状态量满足所有约束, 其收敛性已在现有文献[8]中通过引入状态量的能量函数, 构造李雅普诺夫函数进行收敛性证明。

$$\begin{cases} \dot{z}_i^c = z_i + \frac{\tau_z}{\tau_{\dot{z}}} \dot{z}_i + \tau_z u_{zi} \\ u_{zi} = -d_i(z_i - z^*) - \beta_z \dot{z}_i - \sum_{j=1}^N a_{ij} [(z_i - z_j - z_{ij}) - k_i^z (\dot{z}_i - \dot{z}_j)] - \frac{\partial U_c}{\partial U_i} \end{cases} \quad (7)$$

基于队形信息控制和式(5)中的高度控制律, 使编队形成过程中无人机之间能够保持安全距离。

无人机在未形成指定队形时, 先采用集结策略使无人机聚集在某个区域内, 再启动一致性算法使无人机形成指定队形^[20], 该策略能够减少无人机形成指定队形的时间。因此, 为提高队形形成效率, 本文中也是当无人机之间的距离相对较小时再采用一致性算法。

1.4 转弯策略

在编队进行转弯时, 无人机会有不同的转弯半径, 导致编队的队形不协调甚至队形解散, 需要考虑无人机转弯半径、飞行速度等状态量差异。因此, 提出了速度改进的编队转弯策略, 只改变每架无人机的转弯半径和速度来实现队形保持。首先利用改进的一致性算法得出领航无人机的速度、航向角和飞行高度, 然后设定转弯角度, 得出每架无人机的转弯半径和飞行速度。

如图 2 所示, 已知领航无人机转弯半径 r_{o1} 、飞行速度 v_1 、航向角 φ_1 、航向角加速度 $\dot{\varphi}_1$ 、飞行高度 z_1 、位置矢量 $\mathbf{P}_i = [x_i, y_i, z_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$ 和无人机之间位置矢量关系 $\mathbf{L}_{1i} = [x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}]$, $i \neq 1$, 可以得到其余无人机的转弯半径 r_{oi} 、飞行速度 v_i 、航向角 φ_i 、航向角加速度 $\dot{\varphi}_i$ 和飞行高度 z_i 等信息。

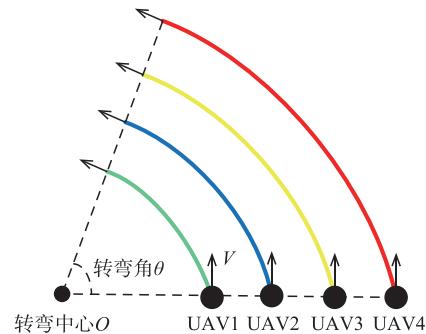


图 2 无人机编队转弯示意图

如式(8)~式(12)所示, 其余无人机转弯半径 r_{oi} 通过 $\vec{\mathbf{P}}_1$ 、 $\vec{\mathbf{L}}_{1i}$ 和 r_{o1} 得到, 速度通过 v_1 和 r_{oi} 得到, 航向角 φ_i 、航向角加速度 $\dot{\varphi}_i$ 和飞行高度 z_i 与领航无人机保持一致。

$$r_{oi} = \left(1 + \frac{|\vec{\mathbf{L}}_{1i}|}{|\vec{\mathbf{P}}_1|} \right) r_{o1}, i \neq 1 \quad (8)$$

$$v_i = v_1 r_{oi}, i \neq 1 \quad (9)$$

$$\varphi_i = \varphi_1, i \neq 1 \quad (10)$$

$$\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_1, i \neq 1 \quad (11)$$

$$z_i = z_1, i \neq 1 \quad (12)$$

将式(9)更新后,得到飞行速度控制律:

$$\begin{cases} v_i^c = v_i + \tau_v u_{vi} \\ v_i = v_1 r_{oi}, (i \neq 1) \\ u_{vi} = -b_i(v_i - v^*) - \sum_{j=1}^N a_{ij}[(v_i - v_j) + (x_i - x_j - x_{ij})] \end{cases} \quad (13)$$

2 基于拆分编队思想的在线航迹规划

2.1 任务介绍

随着现代战场环境的动态变化,当无人机编队在飞行中遇到突发情况,需要拆分出新编队前往新增任务点,依靠离线航迹规划难以保证无人机编队成功执行飞行任务,必须考虑编队拆分和编队在线航迹规划。

在真实战场环境下,无人机编队接到新的任务,无人机编队既要执行原定任务,同时也要拆分出新编队去新的任务点。首先,无人机编队拆分出新编队,剩下的无人机组成原编队;其次,再分别确定出原编队和新编队队形的临时聚集点;最后,分别为原编队和新编队在线规划出去往各自目标点的航迹。

2.2 编队拆分重组方法和流程

无人机编队在接到新增任务需求后,需立即进行拆分。首先,编队中无人机不再保持队形,各自错开高度飞行,避免碰撞;然后,根据新增任务点的位置信息,分别设置原编队和新编队的临时聚集点;原编队和新编队飞往各自的临时聚集点,在此过程中基于改进的一致性算法形成队形;原编队和新编队形成队形后,分别前往各自任务点。

编队拆分重组流程如下:

1)错开飞行高度,避免碰撞:在编队中无人机不再保持队形,各自错开飞行高度,以避免发生碰撞。

2)确定临时聚集点:根据新增任务点的位置,设置出合适的临时聚集点。

3)编队成形:原编队和新编队形成理想的队形。

4)去往目标点:编队成形后,基于 RRT* 算法分别规划原编队和新编队飞往各自任务点的航迹。

2.3 RRT* 算法的优化

RRT* 算法能够随着采样点的增加逐步优化路径,但要不断重新计算路径,计算量大。解决上述不足,可以通过以下几种方法,对 RRT* 算法随机树搜索时进行优化。

1)限制树节点扩展方向和距离。对最大转弯角、最大爬升率和最小航段长度进行限制,如图 3 所示。 θ_{\max} 、 \dot{h}_{\max} 和 l_{\min} 分别为最大转弯角、最大爬升率和最小航段长度。计算每个树节点到起始节点的距离,并按照距离远近的顺序进行节点扩展。

2)基于已知树节点进行扩展延伸。从已知的树节点中随机选择一个进行扩展,避免因随机点产生的方向背离目标点的问题,提高无人机编队航迹规划的精度和效率。

3)使用自适应参数方法。自适应参数包括转弯角 θ'_{\max} 、爬升率 \dot{h}'_{\max} 和航段长度 l'_{\min} 。在规划航程的前段时,可以适当增加航段长度 l'_{\min} 的值,提高无人机编队飞行的机动性;同时,也能使用更大数值的转弯角 θ'_{\max} 和爬升率 \dot{h}'_{\max} ,以减小对无人机编队飞行的限制,使无人机编队有更大的机动空间来改变航向。

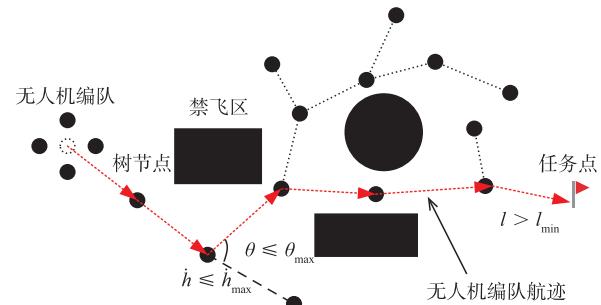


图 3 随机树节点扩展方向和距离示意图

3 场景与仿真验证分析

3.1 对比防碰撞策略与原始一致性算法

本节以 4 架无人机从起飞到集结成一定队形的编队场景为例,验证了编队防碰撞策略的有效性。在此算例中,设置编队理想队形 \mathbf{R}_x 、 \mathbf{R}_y 、 \mathbf{R}_z ,如式(14)所示,其中 \mathbf{R}_x 和 \mathbf{R}_z 为零矩阵, \mathbf{R}_x 、 \mathbf{R}_y 、 \mathbf{R}_z 及矩阵中的数字为各架无人机之间在 3 个方向上的相对距离。

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} 0 & 30 & 60 & 90 \\ -30 & 0 & 30 & 60 \\ -60 & -30 & 0 & 30 \\ -90 & -60 & -30 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

设置无人机之间水平距离阈值 D_{safe} 为 10 m、高度方向上距离阈值 H_{safe} 为 10 m, 相对速度阈值 V_{safe} 为 20 m/s。

当各架无人机起始位置相距较远时,在聚集成编队过程中发生碰撞可能性较小,如图 4 所示,4 架无人机起始位置相距较远,在不含有人工势场法的原始一致性算法基础上进行编队成形过程中,无人机间最小距离为 57.1 m, 大于安全距离阈值。

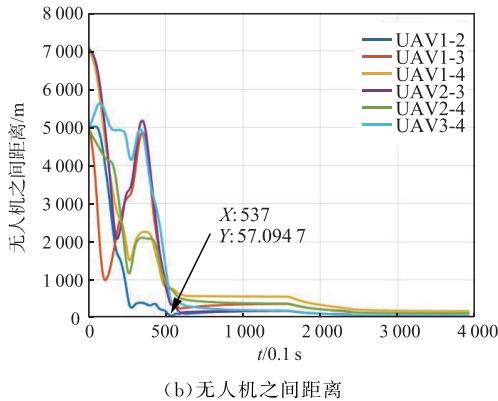
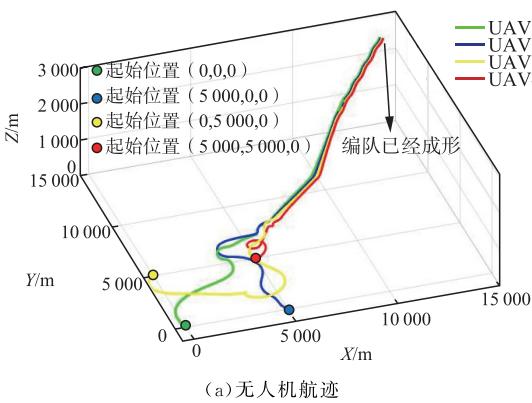


图 4 起始位置相距较远无人机编队成形示意图

当各架无人机起始位置相距较近时,发生碰撞的可能性大大增加,如图 5 所示,4 架无人机起始位置相距较近,在不含有工势场法的原始一致性算法基础上进行编队成形过程中,无人机间最小距离 7.1 m,小于安全距离阈值。

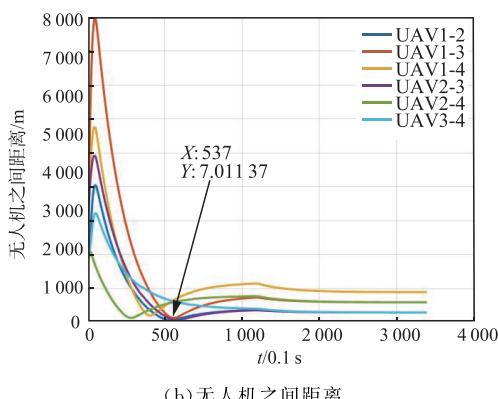
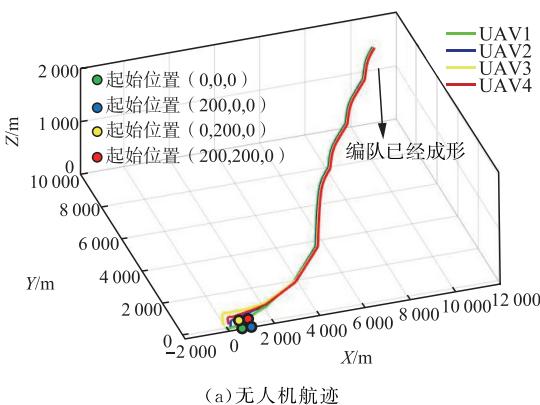


图 5 起始位置相距较近无人机编队成形示意图

如图 6 所示,当各架无人机起始位置相距较近时,引入人工势场法,但没有考虑无人机间相对速度的一致性算法,进行编队成形过程中,当无人机间相对速度过大时,无人机间最小距离 8.4 m,小于安全距离阈值。

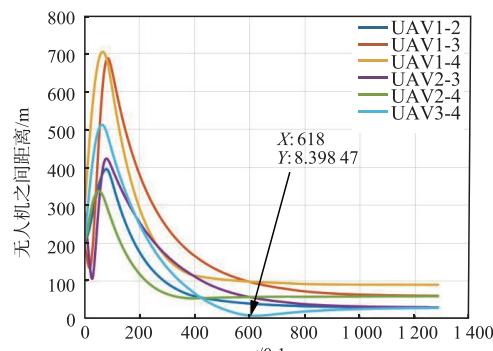
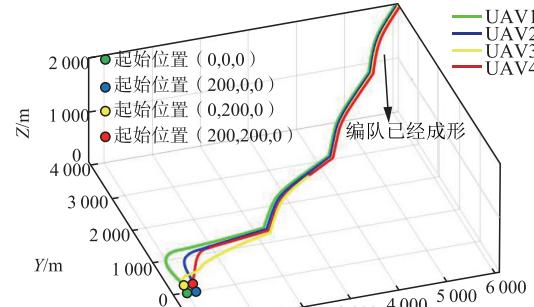
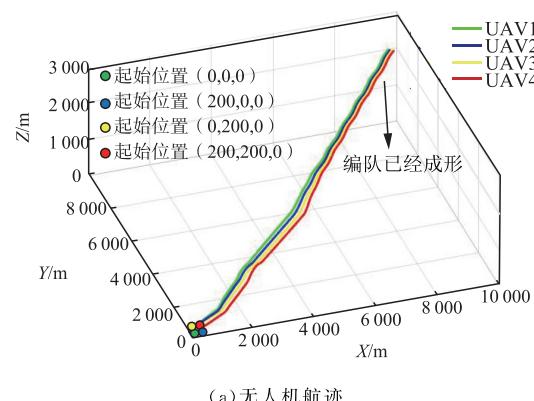


图 6 起始位置相距较近无人机编队成形示意图

当无人机起始位置相距过近的情况下,无人机从起始位置飞行到形成编队过程的前期,容易发生碰撞。加入防碰撞策略后,在无人机起始位置相距过近的情况下,避免了无人机间碰撞。图 7 展示了引入防碰撞策略的无人机编队形成编队航迹和无人机之间的距离,在 4 架无人机起飞位置距离相近的情况下,无人机在编队成形的过程中最近距离为 41.4 m,有效避免了机间碰撞。



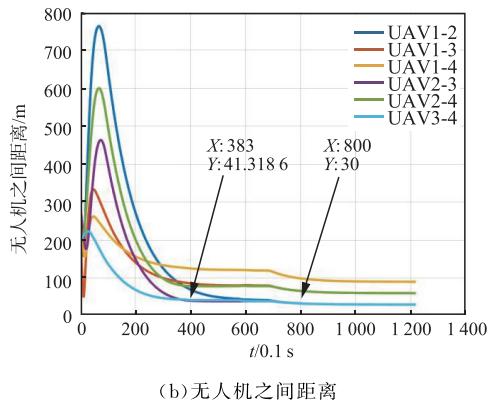


图 7 防碰撞策略下的无人机成形示意图

3.2 对比转弯策略与原始一致性算法

本节继续以编队保持初始队形的状态下持续转弯的场景为例。原始一致性算法控制下的编队航迹中,编队队形在转弯过程中发生了改变,见图 8。图 9 和图 10 展示了各架无人机的速度和实际队形与理想队形之差,当原始一致性算法趋于收敛时,编队中各架无人机速度保持一致。原始一致性算法没有考虑各架无人机的转弯半径不同,导致无人机之间距离变化剧烈,编队队形不协调,甚至发生解散。

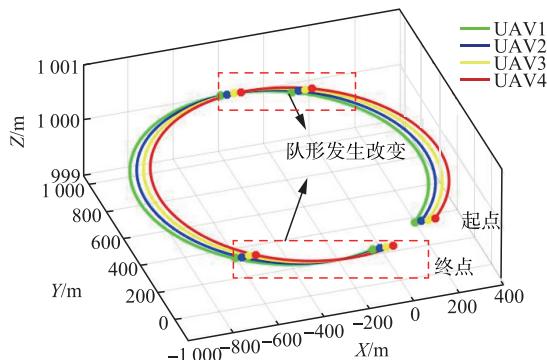


图 8 无人机编队转弯航迹

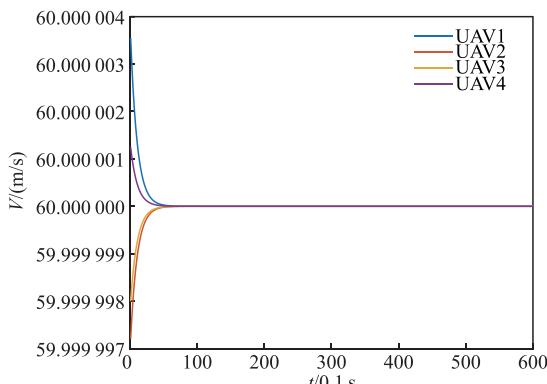


图 9 无人机速度

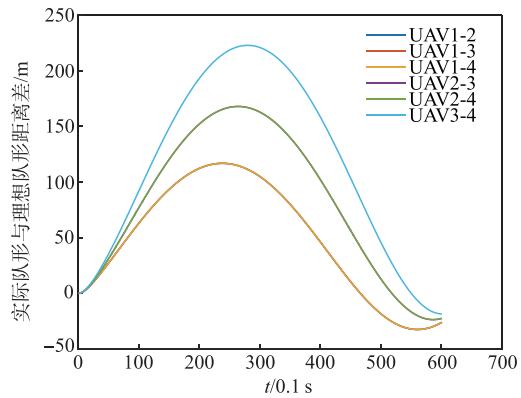


图 10 实际队形与理想队形距离差

在原始一致性算法基础上引入转弯策略,保留一致性算法中航向角和飞行高度项,见图 11,编队队形在转弯过程中基本保持不变。计算转弯半径,改变速度项,得到各架无人机飞行速度,如图 12 所示。由于在实际生成航迹点中采用了数学插值方法,导致无人机之间的距离有很小的周期性波动,如图 13 所示。

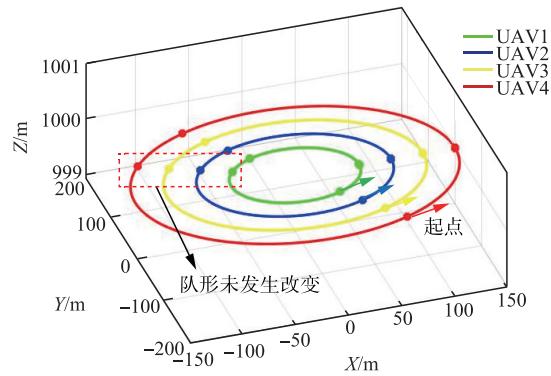


图 11 无人机编队转弯航迹图

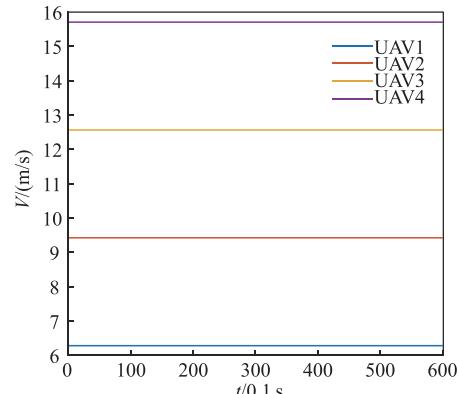


图 12 无人机速度

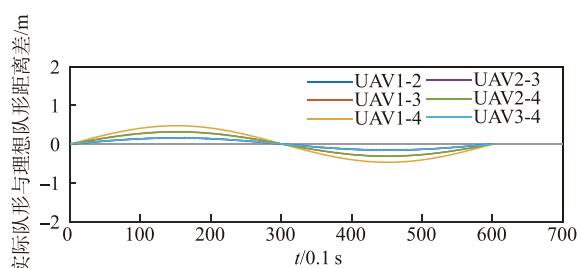


图 13 实际队形与理想队形距离差

3.3 编队在线航迹规划仿真结果

以无人机编队执行侦察任务的场景为例,在 $10^5 \times 10^5 \times 10^4$ 的空间内随机生成新增任务点位置,仿真出无人机编队在执行侦察任务过程中遇到新增任务点情况下的在线航迹规划。首先,无人机编队拆分为 2 只编队,第 1~4 架无人组成新编队,第 5~8 架无人机组成原编队;然后,2 只编队分别集

结,去往各自任务点。

图 14 展示了无人机编队拆分、集结和去往各自任务点的航迹。图中,新编队飞往临时聚集点 A,完成编队成形后规划去往新增任务点;原编队飞往临时聚集点 B,完成编队成形后在线规划去往终点。仿真结果表明改进的 RRT* 算法适用于无人机编队在线航迹规划。

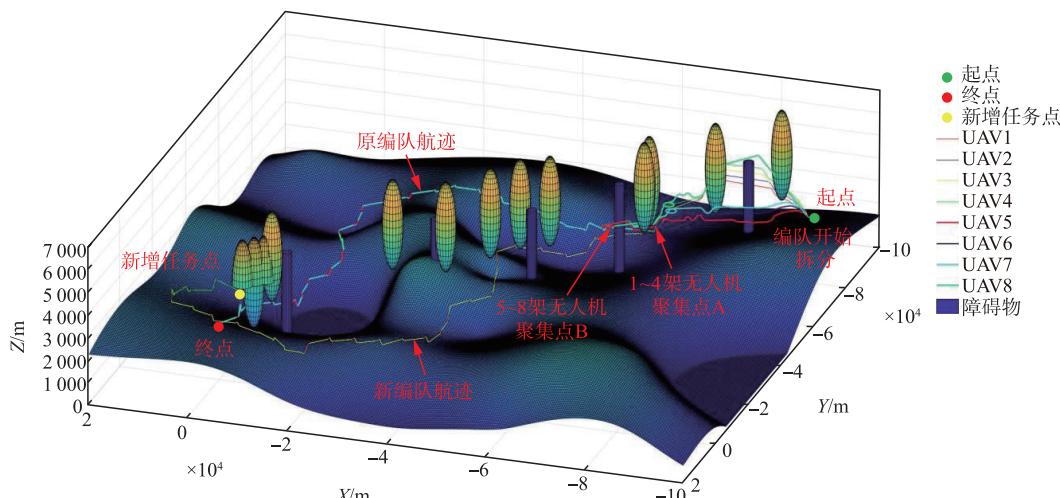


图 14 在线航迹 3D 仿真图

4 结语

本文研究了基于编队拆解重组策略的在线航迹规划问题。对用于编队成形、保持、变换的一致性算法进行改进,使其在防止无人机间碰撞时更加可靠,且在编队进行机动转弯时仍能精确保持队形。在编队飞行过程中新增任务时,设计了编队拆解与重组策略,提高了无人机编队完成任务的效率。

仿真结果表明防碰撞策略能够有效防止编队成形前机间碰撞,该转弯策略能够保证编队在转弯过程中保持队形。基于拆分编队思想和优化 RRT* 算法,提出了编队拆分方法和流程。在线航迹规划仿真结果表明基于 RRT* 算法和拆分编队思想的在线航迹规划,有效解决了在线航迹规划中新增任务需要拆分编队的问题。

参考文献

- [1] AL-DOSARI K, HUNAITI Z, BALACHANDRAN W. Systematic Review on Civilian Drones in Safety and Security Applications [J]. *Drones*, 2023, 7(3):210.
- [2] DONG X W, YU B C, SHI Z Y, et al. Time Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications. [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2015, 23(1): 340-348.
- [3] OPROMOLLA R, INCHINGOLO G, FASANO G. Airborne Visual Detection and Tracking of Cooperative UAVs Exploiting Deep Learning [J]. *Sensors*, 2019, 19(19):4332.
- [4] SAN JUAN V, SANTOS M, ANDUJAR J M. Intelligent UAV Map Generation and Discrete Path Planning for Search and Rescue Operations [J]. *Complexity*, 2018, 2018:6879419.
- [5] 张清瑞, 刘震韵, 孙慧杰, 等. 固定翼无人机紧密编队的鲁棒协同跟踪控制 [J]. *航空学报*, 2024, 45(1): 103-119.
- [6] 张鹏飞, 何印, 马振华, 等. 无人机集群协同控制技术综述 [J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(4): 1-9.
- [7] 赵超轮, 戴邵武, 赵国荣, 等. 基于分布式模型预测控制的无人机编队控制 [J]. *控制与决策*, 2022, 37(7): 1763-1771.
- [8] 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.
- [9] 程凝怡, 刘志乾, 李昱奇. 一种基于 Dijkstra 的多约束条件下智能飞行器航迹规划算法 [J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(6):1284-1290.
- [10] 张莹. 动态规划算法综述 [J]. *科技视界*, 2014(28): 126, 158.
- [11] LIU Y, ZHANG X J, ZHANG Y, et al. Collision Free 4D Path Planning for Multiple UAVs Based on Spatial Refined Voting Mechanism and PSO Approach [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(6):1504-1519.

- [12] 张学聪,晁永生. 工业机器人动力学参数的改进遗传算法辨识[J]. 机床与液压, 2024, 52(9): 30-35.
- [13] 张松灿,普杰信,司彦娜,等. 蚁群算法在移动机器人路径规划中的应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(8): 10-19.
- [14] 刘永琦,徐丹,程归,等. 基于改进 A* 算法的无人机快速轨迹规划方法[J]. 飞行力学, 2020, 38(2): 40-46.
- [15] LIU Y, ZHANG X J, GUAN X M, et al. Adaptive Sensitivity Decision Based Path Planning Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle with Improved Particle Swarm Optimization [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 58:92-102.
- [16] 彭志红,孙琳,陈杰. 基于改进差分进化算法的无人
- [17] 机在线低空突防航迹规划[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(1):96-101.
- [18] 过金超,黄心汉,王延峰,等. 基于量子粒子群优化的在线航迹规划[J]. 计算机科学, 2009, 36 (7): 237-239.
- [19] 符小卫,潘静. 无人机集群规避动态障碍物的分布式队形控制[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(2): 529-537.
- [20] 任伟. 多航行体协同控制中的分布式一致性: 理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [20] 荀进展,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.

(编辑:杜娟)

(上接第 85 页)

- [7] HARRIS R, LIEVER P, LUKE E, et al. Towards a Predictive Capability for Multiple-Body Proximate-Flight in High-Speed Air-Delivered Systems [C]// 42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2012: 2816.
- [8] 王金龙,王浩,陶如意,等. 子母弹不同舱段分离流场特性及运动特性研究[J]. 空气动力学学报, 2016, 34 (4): 490-496.
- [9] WANG J L, WANG H, JIANG K, et al. Analysis of the Aerodynamic Impact of the Dispenser Stance for the Separation of Cluster Munitions [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2016, 10(1): 427-440.
- [10] 靳晨晖,王刚,王泽汉. 子母弹多体分离过程的非定常 CFD/RBD 数值仿真[J]. 气体物理, 2018, 3 (4): 47-63.
- [11] 陈时通,于勇. 超声速流场中子母弹分离与子弹姿态变化规律的数值模拟[J]. 弹道学报, 2019, 31(1): 29-35.

- [12] 庞川博,蒋胜矩. 云爆式子母弹超声速分离气动特性研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(2): 75-82.
- [13] 李鹏,高振勋,蒋崇文. 重叠网格方法的研究进展[J]. 力学与实践, 2014, 36(5): 551-565.
- [14] 张来平,邓小刚,张涵信. 动网格生成技术及非定常计算方法进展综述[J]. 力学进展, 2010, 40 (4): 424-447.
- [15] 刘秋洪,屈崑,蔡晋生,等. 嵌套重叠网格的构造策略及其隐式切割[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2013, 43(2):186-198.
- [16] 杨文青,宋笔锋,宋文萍. 高效确定重叠网格对应关系的距离减缩法及其应用[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 205-212.
- [17] 杨磊. 非结构嵌套网格的六自由度武器投放过程数值研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [18] HEIM E R. CFD Wing/Pylon/Finned Store Mutual Interference Wind Tunnel Experiment[R]. Tennessee: Arnold Engineering Development Center, 1991.

(编辑:韩茜)