

基于路径跟随的改进领航-跟随无人机协同编队方法^{*}

胡阳修^{1,2}, 贺亮^{1,2}, 赵长春^{1,2}, 陈扬^{1,2}, 钱洲元^{1,2}

(1. 上海航天控制技术研究所·上海·201109;
2. 上海市空间智能控制技术重点实验室·上海·201109)

摘要: 针对集群无人机完成高精度协同编队的需要, 提出了一种基于路径跟随的改进领航-跟随无人机协同编队方法。首先, 在传统 A* 算法的基础上, 引入了障碍威胁系数改进 A* 算法, 为领航无人机规划从起点到目标的全局安全路径; 其次, 采用 Hermite 多项式对领航无人机的全局安全路径离散化后进行参数化表示; 当遇到新的障碍信息时, 利用改进 A* 算法重新规划路径; 随后, 领航无人机将跟随无人机的空间编队信息与编队路径参数信息在集群中完成同步; 最后, 基于一致性原理设计了编队队形协同控制器, 并基于改进人工势场法设计了动态避障控制器。仿真结果表明, 与传统的领航-跟随方法相比, 该方法可以降低编队误差, 提高了复杂曲线路径下无人机的编队精度与稳定性, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 集群; 领航-跟随; 曲线拟合; 路径跟随; 协同编队

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2021)02-0026-10

Improved Method of Leader-Follower UAV Coordinated Formation Based on Path Following

HU Yangxiu^{1,2}, HE Liang^{1,2}, ZHAO Changchun^{1,2}, CHEN Yang^{1,2}, QIAN Zhouyuan^{1,2}

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109;
2. Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109)

Abstract: To meet the need of high-precision coordinated formation, an improved method of leader-follower UAV coordinated formation based on path following is proposed. Firstly, from the traditional A* algorithm, the obstacle threat coefficient is introduced to improve the A* algorithm to plan the global path from the starting point to the target. Secondly, the Hermite polynomial is used to parameterize the discrete flight path of the leader UAV. When it encounters new obstacles, the improved A* algorithm is used to re-plan the path, and then the space formation information and formation path parameter information of follower UAV are synchronized by leader UAV. Finally, the formation coordination and collision avoidance controllers are designed based on the consistency principle and improved artificial potential field. The simulation results show that, compared with the traditional leader-follower method, this method can reduce the formation error, and improve the formation accuracy and stability of the UAV swarm under the complex curve path, and shows the value of engineering application.

Keywords: swarm; leader-follower; curve fitting; path following; coordinated formation

0 引言

采用集群的方式可以拓展单体无人机的能力, 以高效、合作、协同地完成任

实现相互的功能备份, 可以避免由单一无人机失效而造成的任务失败^[1-2]。目前, 集群无人机协同编队控制方法主要通过位置与速度控制保持相对队形^[3]。常用的方法有: 基于领航-跟随、基于行

* 收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-09-04

基金项目: 智能无人系统控制技术联合实验室(项目编号 18510750100)

作者简介: 胡阳修(1993—), 男, 硕士, 助理工程师。E-mail: kenhyx@163.com

为、基于虚拟结构等。基于领航-跟随的方法有着结构简单、对通信容量需求少的优点, 在工程实践中的应用较多, 国内外学者在此基础上进行了大量的改进研究^[4]。

领航无人机通常需要完成全局路径规划, A * 算法主要采用了路径搜索算法^[5]。文献 [6] 通过改进 A * 算法开闭表中的元素存储方式, 提升了路径规划效率, 但并没有提升路径规划的效果。文献 [7] 将 A * 算法与 Dubins 曲线进行了结合, 在起止段采用 Dubins 曲线, 中间采用 A * 算法, 满足了长度最短与安全性的要求。但是, 安全性改进只在起点和终点有效, 没有考虑全过程的障碍威胁。

跟随无人机通常根据领航无人机的距离与方位信息完成编队跟随。通过将路径信息进行参数化, 利用数据链在集群中同步, 可以大大提升路径跟踪效果^[8]。文献 [9] 建立了一种基于路径参数协同的多移动机器人编队控制模型, 通过建立统一的路径参数, 实现了对编队路径的协同, 但其所选择的路径参数对于不规则曲线而言不具备较好的普适性。

集群无人机之间的队形协同控制通常采用一致性原理。通过选取无人机的状态信息, 设计控制率保持一致^[10]。避障是集群系统必须考虑的问题, 文献 [11] 针对无人机编队的机间防撞需求, 基于人工势场改进防撞控制方法, 构建了受两者相对运动速度影响的辅助斥力势, 并给出了机间防撞、障碍物规避的总速度场, 但没有考虑动态障碍下的避障优化问题。

综上所述, 针对上述研究中存在的问题, 本文在领航-跟随法的基础上通过对各障碍物引入威胁系数而改进 A * 算法, 在 A * 最短路径的基础上考虑不同障碍的安全威胁, 提高集群的生存率。在利用改进 A * 算法完成领航无人机全局路径规划后, 采用 Hermite 多项式完成了全局路径的参数化表示。Hermite 多项式在路径点多阶连续的特性, 可以降低对无人机动力系统的冲击。最后, 通过带有动态避障功能的编队协同控制器, 实现无人机编队队形的协同控制。

1 问题描述

1.1 无人机运动模型

无人机主要包括多旋翼与固定翼两类, 两者

的运动学模型并不完全一致。为了使异构无人机也能进行组合并完成协同编队任务, 需将无人机统一视作二阶积分系统^[12]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^m$ 为无人机的状态量, \mathbf{u}_i 为控制输入量, $i = 1, 2, \dots, k$ 为积分系统数量。考虑水平面的运动, 假设无人机作匀速运动, 其运动学模型与运动约束为

$$\begin{cases} \dot{x} = \|\mathbf{v}\| \cos \lambda \\ \dot{y} = \|\mathbf{v}\| \sin \lambda \\ \dot{\lambda} = \frac{\|\mathbf{a}\|}{\|\mathbf{v}\|} \\ \|\mathbf{a}\| \leq a_{\max}, \|\mathbf{v}\| \leq v_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, (x, y) 为无人机在 NED 北东地地理坐标系下的位置, BODY 为机体坐标系, \mathbf{v}, \mathbf{a} 和 λ 分别为无人机速度、加速度和速度角, v_{\max}, a_{\max} 分别为最大速度和最大加速度。各物理量的示意图如图 1 所示。

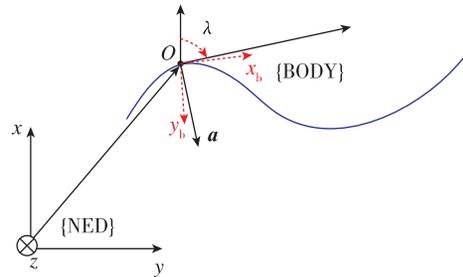


图 1 无人机运动模型示意图

Fig. 1 UAV motion model diagram

1.2 通信拓扑结构

使用图论中的有向图来描述各无人机之间的通信拓扑结构。领航无人机负责全局路径的规划, 将各跟随无人机的路径参数进行全局统一分配。其与跟随无人机之间为双向通信, 各跟随无人机之间通过互联进行状态信息的同步。无人机的通信拓扑结构如图 2 所示。

根据图论知识^[13], 上述通信拓扑结构可用有向图 $G = (V, E, A)$ 表示。其由顶点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 、边集合 E 和邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 组成。若任意 $\forall i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$, 顶点 i 可直接到达顶点 j , 则该边存在于边集合 E 中, 可记为 $(v_i, v_j) \in E$ 。此时, 邻

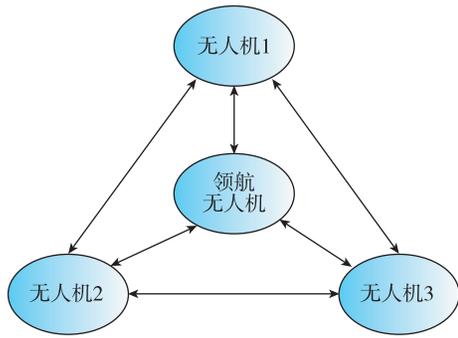


图 2 无人机通信拓扑结构

Fig. 2 Communication topology between UAV

接矩阵 A 中的元素 $a_{ij} = 1$ 。否则 $a_{ij} = 0$ ，且记作 $a_{ii} = 0$ ，即有

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } (v_i, v_j) \in E \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

2 全局航迹路径规划

2.1 改进 A* 算法

为了最小化任务时间与能量消耗，对无人机进行预先的全局航迹路径规划是必要的。航迹路径规划算法的目标是基于预先给定的地图生成一条最小代价的路径。考虑计算的时间与空间代价，利用启发式搜索的 A* 算法可以获得理论上的时间最优。其代价函数如下

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (4)$$

式中， n 代表当前搜索过程中的节点， $g(n)$ 为沿着规划路径从起点到节点 n 的耗费值， $h(n)$ 为从节点 n 到目标点的耗费估算。 $g(n)$ 由已产生的路径确定， $h(n)$ 的选取会直接影响路径的规划。通常使用曼哈顿距离作为 $h(n)$ 的估计，如公式 (6) 所示

$$h(n) = \|x - x_d\| + \|y - y_d\| \quad (5)$$

式中， x 、 y 和 x_d 、 y_d 分别是当前节点坐标与目标节点坐标。由于曼哈顿距离只考虑了当前节点与目标节点的预测距离，搜索目标为最短路径，考虑各障碍对集群任务的威胁不同，需引入障碍威胁系数。这里选用了新的预测函数

$$h'(n) =$$

$$m_a h(n) + (1 - m_a) \sum_{i=1}^k \omega_i(x, y) (r_{i_max} - r_i) \quad (6)$$

式中， m_a 为权重系数， $\omega_i(x, y)$ 为第 i 个障碍在 (x, y) 处的威胁系数， r_{i_max} 是在路径搜索过程中无人机与第 i 个障碍中心距离的预设最大值， r_i

是无人机与第 i 个障碍的中心距离， k 为障碍个数。

路径点搜索的流程如下：

(1) 路径初始化

将搜索区域网格化，将起点 A 周围可通过的节点加入到 open 列表，将 A 加入到 close 列表。其中，open 列表存储了待搜索的节点，close 列表存储了最小代价点以及不再需要搜索的节点。

(2) 搜索节点

从 A 点开始，向周围 8 个方向对存在于 open 列表中的节点进行搜索。依据上述代价函数计算各节点的代价值，选取其中的最小代价值节点，将其从 open 列表中移除，并将其加入到 close 列表。设置当前节点为最小代价点的父节点，然后从该子节点开始进行搜索。重新添加子节点的周围节点并将其添加到 open 列表，如果新的待加入节点已经在子节点的 open 列表中，则计算新的代价值。若代价更小则更新该值，并更新父节点为当前节点，否则保持。

(3) 终止判断

循环上述步骤 (2) 直至目标节点被加入到 close 列表时关闭循环。在 close 列表中，从目标节点开始，将各节点的父节点根据顺序连接起来直至起点，即为规划的路径。若开启列表为空后还未找到目标节点，则路径搜索失败，如图 3 所示。

引入威胁系数后，搜索的方向将变为路径代价与威胁代价和最小的方向，两者的优先级可以根据实际任务通过权重系数进行调整。改进前后的 A* 路径搜索对比如图 4 所示。3 个蓝色网格为障碍，绿色和红色网格分别为起点和终点。设每个网格的长度为 10，对角线长度为 14，则在 $m_a = 0.5$ 、 $\omega_i(x, y) = 1$ 、 $r_{i_max} = 70$ 时，改进前和改进后的搜索网格数分别为 34 和 52。两条路径的长度均为 68，与障碍中心的累计距离分别为 120 和 128。改进之后，A* 搜索路径的次数虽然增大了，但路径长度均为 68，且降低了路径平均威胁。

2.2 离散航迹路径优化与编队队形表示

由上述步骤生成的路径为全局曲线路径。考虑降低数据链的通信需求，本文采用离散路径结合曲线拟合的方式对该路径进行参数化表示。领航无人机的规划路径 Ω 是网格化后的离散路径点的集合，从当前位置沿路径 Ω 在到达目标点之前截取一段长度为 L 的路径，采用 Hermite 多项式对路径 Ω 进行参数化表示^[14]。

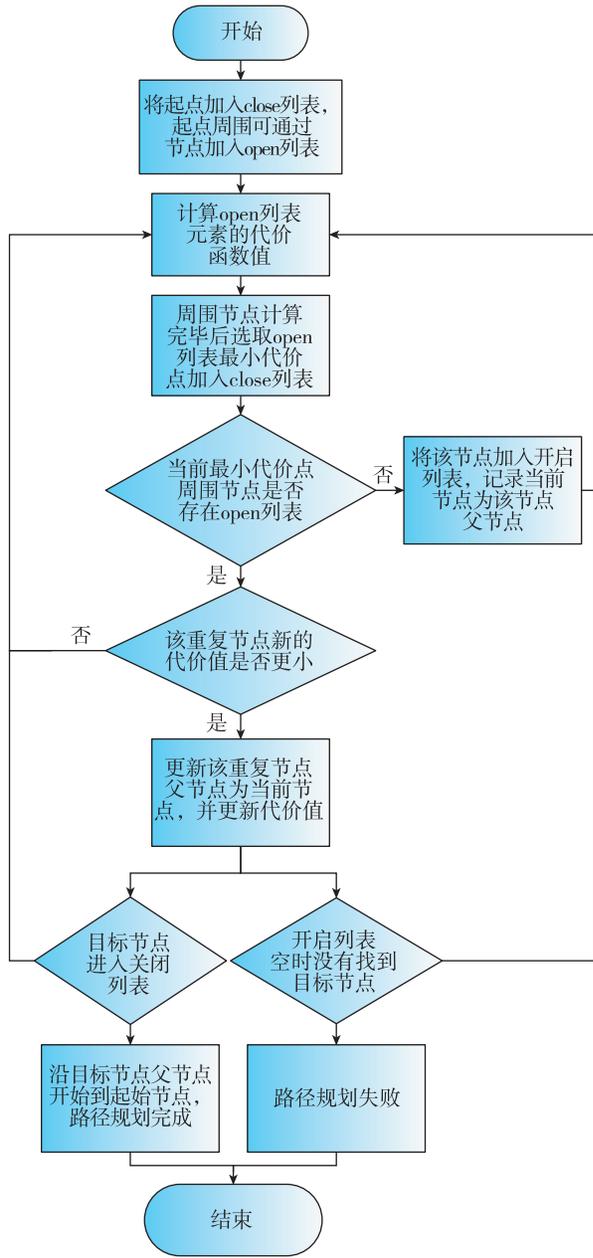
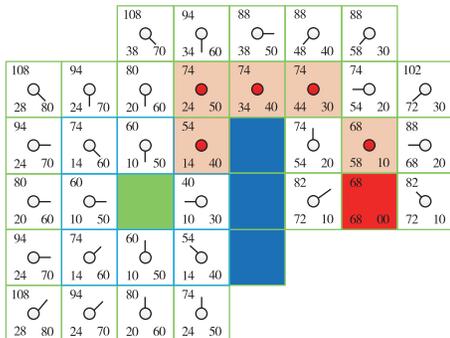
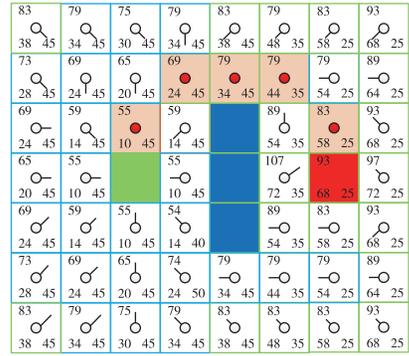


图 3 A* 算法搜索流程图

Fig. 3 A* algorithm search flow chart



(a) 传统 A* 算法



(b) 引入威胁系数的 A* 算法

图 4 A* 算法全局路径生成对比图

Fig. 4 Comparison of global path generation with A* algorithm

路径 Ω 的参数化信息包含 $m + 1$ 个路径点 $P_i = (x_i, y_i)$, 以及路径点上对应的导数 $q_i, i = 0, 2, \dots, m$ 。选取拟合曲线在离散路径点处的切线与离散路径点前后折线的角平分线垂直, 则起始点与路径折线的斜率相同, 可由此计算各路径点的导数 q_i

$$q_i = \begin{cases} \nabla(k_i) \\ k_i = P_{i+1} - P_i, i = 0 \text{ 或 } i = m - 1 \\ k_i \perp \left(\frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2} - P_i \right), \text{ else} \end{cases} \quad (7)$$

式中, ∇ 表示对向量求导, k_i 为拟合曲线上各路径点处的切线向量。通过 Hermite 多项式可将该路径信息进行拟合, 得到后续进行跟踪的连续路径方程 $H_{2m+1}(x)$ 。该连续路径满足

$$\begin{aligned} H_{2m+1}(x_i) &= y_i \\ \nabla H_{2m+1}(x_i) &= q_i \\ i &= 0, 1, \dots, m \end{aligned} \quad (8)$$

选取 Hermite 多项式插值基函数 $\alpha_i(x_k), \beta_i(x_k)$, 并满足

$$\begin{aligned} \alpha_i(x_j) &= \begin{cases} 0, i \neq j \\ 1, i = j \end{cases}, \alpha'_i(x_j) = 0 \\ \beta_i(x_j) &= 0, \beta'_i(x_j) = \begin{cases} 0, i \neq j \\ 1, i = j \end{cases} \\ i, j &= 0, 1, \dots, m \end{aligned} \quad (9)$$

利用插值基函数表示 Hermite 多项式 $H_{2m+1}(x) = H(x)$

$$H(x) = \sum_{i=0}^m [y_i \alpha_i(x) + q_i \beta_i(x)] \quad (10)$$

引入拉格朗日函数 $l_i(x) =$

$\frac{(x-x_0)\cdots(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})\cdots(x-x_m)}{(x_i-x_0)\cdots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\cdots(x_i-x_m)}$,
设

$$\begin{aligned}\alpha_i(x) &= (k_1x + k_2)l_i^2(x) \\ \beta_i(x) &= (k_3x + k_4)l_i^2(x)\end{aligned}\quad (11)$$

式中, k_1, k_2, k_3, k_4 为引入的临时中间变量。根据式 (8) ~ 式 (11), 可得到该路径的分段 3 次 Hermite 多项式

$$\begin{aligned}H(x) &= \left(1 + 2\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i}\right)\left(\frac{x-x_{i+1}}{x_i-x_{i+1}}\right)^2 y_i + \\ &\left(1 + 2\frac{x-x_{i+1}}{x_i-x_{i+1}}\right)\left(\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i}\right)^2 y_{i+1} + \\ &(x-x_i)\left(\frac{x-x_{i+1}}{x_i-x_{i+1}}\right)^2 q_i + (x-x_{i+1}) \cdot \\ &\left(\frac{x-x_i}{x_i-x_{i+1}}\right)^2 q_{i+1}\end{aligned}\quad (12)$$

式中, $x \in [x_i, x_{i+1}]$, ($i=0, 1, \dots, m-1$)。由式 (12) 可得到利用 Hermite 多项式进行参数化后的领航无人机路径, 但该路径有可能重新进入障碍物影响范围, 因此需要重新优化路径。可采用如下的局部重新规划方案: 在发生碰撞的路径的下一路径点 B 、新增点 B 的前后两条原始路径点的连线中点 D 和 E 重新生成新的曲线。重复该步骤, 直至曲线满足运动学约束与避碰要求。优化后的示意图如图 5 所示。

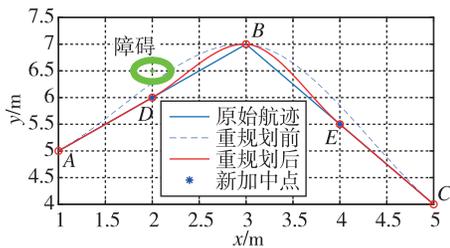


图 5 重新规划路径优化示意图

Fig. 5 Re-planning path optimization diagram

考虑跟随无人机的编队路径 Ω_i , 由领航无人机为编队中的所有跟随无人机分配队形位置。为了直观描述编队队形, 首先以领航无人机的位置为原点, 建立 Serret-Frenet (SF) 坐标系^[15]。其中, 速度切线方向为 x_{sf} 轴, 法线方向为 y_{sf} 轴。在 SF 坐标系下, 无人机 i 到无人机 j 的期望编队坐标向量为 $\mathbf{d}_{ij} = (x_{off_{ij}}, y_{off_{ij}}, z_{off_{ij}})$, $i, j=0, 1, 2, \dots, n$, n 为跟随无人机数量, 领航无人机的编号为 0。第 i 架跟随无人机的路径 Ω_i 生成参考

领航无人机, 在将相对于领航无人机的编队坐标向量 \mathbf{d}_{0i} 旋转到 NED 北东地地理坐标系下后, 将其添加到领航无人机的离散路径点上, 再用 Hermite 多项式进行表示

$$\Omega_i = \Omega + \mathbf{R}(-\lambda)\mathbf{d}_{0i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中, λ 为 1.1 节所述的速度角, $\mathbf{R}(-\lambda)$ 为绕 NED 北东地地理坐标系 z 轴转动 $-\lambda$ 角度的方向余弦矩阵。无人机在 SF 坐标系下的队形示意图如图 6 所示。

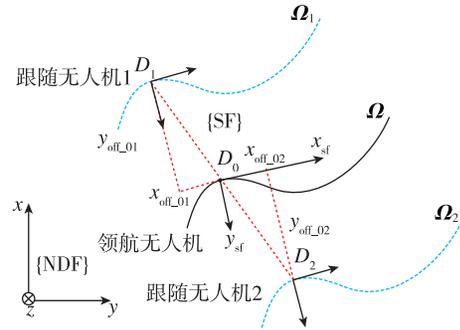


图 6 Serret-Frenet 坐标系下的编队队形示意图

Fig. 6 Swarm formation diagram under Serret-Frenet coordinate

3 编队协同控制器设计

3.1 路径协同控制器设计

无人机编队任务多种多样, 常需要在编队飞行过程中进行队形变换以躲避障碍物、切换任务等, 或者在到达目标点上空后进行盘旋、环绕, 以对目标进行侦察等。随着队形的切换以及时间的推移, 如果不加修正, 则无法保证无人机按照预期的队形飞行。因此, 需根据一致性原理设计路径协同控制器, 使编队队形满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\|\mathbf{D}_j - \mathbf{D}_i - \mathbf{d}_{ij}\|) = 0, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中, \mathbf{D}_i 为第 i 架无人机在 SF 坐标系下的实际位置。定义无人机 i 编队队形误差 ζ_{ei} 为

$$\zeta_{ei} = \mathbf{D}_i - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n a_{ij} \omega_{ij} (\mathbf{D}_j - \mathbf{d}_{ij}) \quad (i \neq j) \quad (15)$$

根据上述 1.2 节的图论知识, 可将上式改写为矩阵形式

$$\zeta_e = \mathbf{D} - \frac{1}{n} \mathbf{A} \mathbf{W} \zeta \quad (16)$$

式中, ζ_e 为无人机编队误差矩阵; \mathbf{D} 为无人机位置

矩阵; \mathbf{A} 为通信拓扑图的邻接矩阵; \mathbf{W} 为权重系数矩阵; $\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n]^T$, 为当前无人机 i 相对于其余飞机的期望位置矩阵。

无人机的运动模型采用了上述 1.1 节的二阶积分模型。这里, 将二阶积分模型具体细化为加速度与速度。为使编队误差趋近于零, 可将路径协同控制器分为两部分: 单机基于路径跟随完成对上述 2.2 节规划的路径的跟踪, 以及多机路径协调。其中, 在路径跟踪中采用上述 1.1 节的二阶加速度作为控制量, 利用 L1 算法实现路径的稳定跟踪^[16], 而路径协调则采用了速度控制量。

由 L1 算法实现路径跟踪而生成的横向加速度控制量 \mathbf{a}_{cmd} 为

$$\mathbf{a}_{\text{cmd}} = \frac{2\sin\eta}{\|\mathbf{L}_1\|} \mathbf{v}^2 \quad (17)$$

式中, \mathbf{L}_1 为从无人机当前位置到期望路径上参考点的向量, 其长度大小为一个预设的定值。 η 是 \mathbf{L}_1 向量到无人机预设期望飞行速度向量 \mathbf{v} 的夹角。考虑到无人机的速度限制, 设计在采用 L1 算法跟踪路径时限制路径跟踪的分速度 \mathbf{V}_d 为

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{v} + \int \mathbf{a}_{\text{cmd}} dt$$

$$\|\mathbf{V}_d\| \in (v_{\min} + \Delta v, v_{\max} - \Delta v) \quad (18)$$

式中, v_{\min} 、 v_{\max} 和 Δv 分别是无人机最小、最大飞行速度和路径协调控制器的可调速度, 可设计如下的路径协调控制器

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{V}_d - \Delta v f(\zeta_e)$$

$$f(x) = 2/(1 + e^{-x}) - 1$$

$$f(x) \in (-1, 1), x \in R \quad (19)$$

式中, \mathbf{V}_r 为结合路径跟踪与路径协调的速度控制量。结合式 (18) 和式 (19) 可知, 无人机飞行速度控制量满足 $\|\mathbf{V}_r\| \in (v_{\min}, v_{\max})$, 即路径协同控制器输出的协同速度满足无人机的速度限制。

3.2 动态障碍避障控制器设计

考虑跟随无人机与无人机以及无人机与外部之间的动态障碍避障, 可采用结合路径预测的人工势场法进行避障。

人工势场法的目的是构造包含斥力与引力的合势能函数, 使得无人机在势力引导下改变飞行路径^[17]。其中, 引力可引导无人机前往目标点,

而斥力可使无人机避开障碍物。3.1 节已经完成了对目标编队的引导, 这里只需考虑斥力的避障。

在构造斥力场函数时, 为保证无人机与无人机或无人机与其他障碍之间在距离较近时能够快速分离, 以无人机之间的避障为例, 无人机 i 对无人机 j 的斥力可采用如下的斥力场函数

$$\mathbf{J}_{ij} = \begin{cases} \frac{b}{\tanh\left(\frac{\mathbf{d}_{ij} - R_{\min}}{c}\right)}, & \|\mathbf{d}_{ij}\| \in (R_{\min}, R_{\max}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

式中, b 、 c 是斥力调节常数, R_{\min} 和 R_{\max} 分别表示无人机间最小的安全距离和斥力最大作用距离。距离小于安全距离时, 无人机将发生碰撞; 距离超过 R_{\max} 后, 斥力将不起作用。由式 (20) 可得无人机 i 对无人机 j 的斥力为

$$\mathbf{F}_{ij} = \nabla \mathbf{J}_{ij} = \frac{1}{\tanh^2\left(\frac{\mathbf{d}_{ij} - R_{\min}}{c}\right)} \cdot \left(1 - \tanh^2\left(\frac{\mathbf{d}_{ij} - R_{\min}}{c}\right)\right) \frac{b\mathbf{d}_{ij}}{c\|\mathbf{d}_{ij}\|} \quad (21)$$

无人机 i 所受的合斥力为

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j=0}^n a_{ij} \mathbf{F}_{ij} \quad (22)$$

由式 (22) 可得斥力矩阵为 $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_1, \dots, \mathbf{F}_n]^T$ 。考虑在动态障碍情况下的避障轨迹优化。无人机在进入碰撞半径后, 动态的障碍运动轨迹与无人机避障后的合成运动轨迹可能仍然存在碰撞的可能, 或产生的避障控制量大于无人机运动学限制, 因此动态障碍下的轨迹优化过程如下。

将障碍点在一定时间内的运动等效为匀速直线运动。无人机在进入碰撞半径时, 将无人机所处的碰撞半径位置划分为多个区域, 如图 7 所示。当无人机位于红色扇形区域 \widehat{OAB} 内时, 斥力方向使得避障运动轨迹与障碍运动轨迹存在重合的可能; 当无人机位于此区域内时, 通过调整斥力的方向可使无人机向远离障碍的方向运动。在图 7 (a)、图 7 (b) 情形下, 无人机在斥力作用下逆时针旋转 90 度; 在图 7 (c)、图 7 (d) 情形下, 无人机在斥力作用下顺时针旋转 90 度。

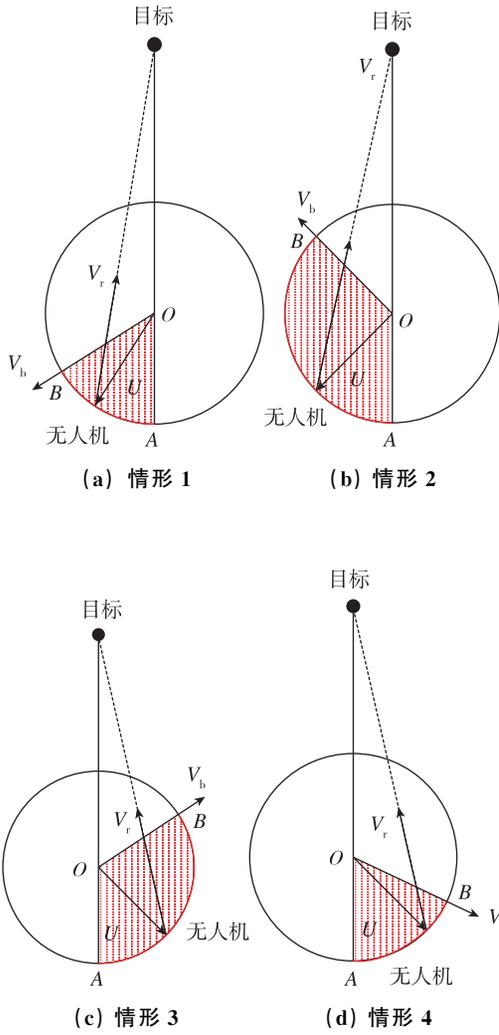


图 7 动态障碍避障示意图

Fig. 7 Dynamic obstacle avoidance diagram

当无人机位于红色扇形 \widehat{OAB} 内时满足

$$\begin{cases} c_1 = \mathbf{V}_r \otimes \mathbf{U} \\ c_2 = \mathbf{U} \otimes \mathbf{V}_b \\ \|c_1 c_2\| + \|c_1\| \|c_2\| = 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中, \mathbf{U} 为障碍对无人机的斥力, \mathbf{V}_b 为障碍运动速度, c_1 、 c_2 分别为表征两者速度方向的中间矢量。当满足上述条件时, 新的斥力 \mathbf{U}_n 为

$$\mathbf{U}_n = \begin{cases} \mathbf{R}(90)\mathbf{U}, & \langle \mathbf{V}_r, \mathbf{V}_b \rangle \in (0, 180) \\ \mathbf{R}(-90)\mathbf{U}, & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

式中, \mathbf{V}_r 为障碍圆心 O 指向目标的单位速度向量。 $\mathbf{R}(90)$ 和 $\mathbf{R}(-90)$ 分别表示绕上述 NED 地理坐标系 z 轴转动正负 90 度方向的方向余弦矩阵。将式 (21) 的各分斥力按照式 (23) 和式 (24) 处理后, 再由式 (22) 可得加入动态避障的新合斥力矩阵 \mathbf{F}_n 。

综上, 将上述 3.1 节所述的路径协同控制器结合动态避障控制器后, 可得到最终避开障碍情况下编队协同控制器的速度量输出 \mathbf{V}_{out}

$$\mathbf{V}_{out} = \mathbf{V}_r + \int \frac{1}{f_m} \mathbf{F}_n dt$$

$$\|\mathbf{V}_{out}\| \in (v_{min}, v_{max}) \quad (25)$$

式中, f_m 为无人机的质量系数。

4 仿真验证

通过三架无人机的典型的协同编队队形保持与避障, 对上述方法进行了验证, 并给出了仿真结果。

首先, 期望的编队路径由第 2 节所述的路径规划方法生成。将 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的区域划分为 $80\text{m} \times 80\text{m}$ 的网格, 并随机设置 5 个固定障碍, 生成各障碍的威胁代价色度图。传统 A* 最短路径与改进 A* 路径规划方法的对比如图 8 所示。由图 8 可知, 传统 A* 方法在没有障碍阻挡的前提下, 选择了前往终点的最短直线路径, 而本文的改进 A* 方法在生成的威胁代价地图基础上, 考虑了威胁的代价, 进而降低了规划路径上的平均威胁。仿真结果对比如表 1 所示。

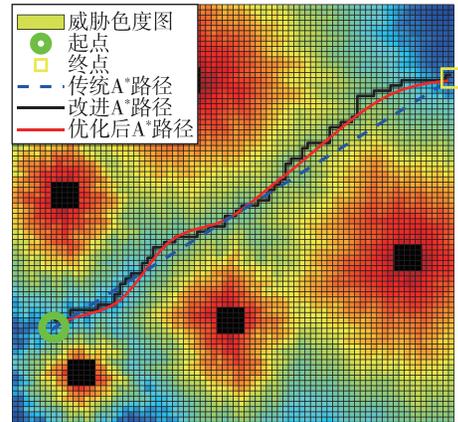


图 8 障碍威胁环境下的编队路径规划方法对比

Fig. 8 Comparison of formation path planning methods under obstacle threat environment

表 1 路径规划方法仿真对比

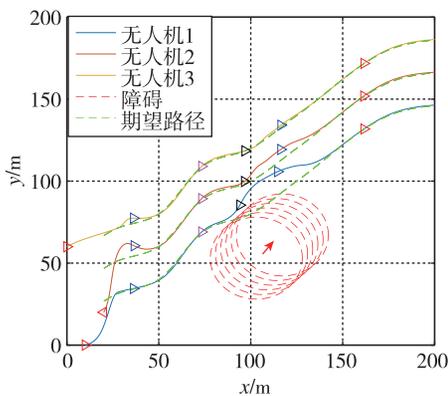
Tab. 1 Comparison of path planning methods simulation

对比项	传统 A* 算法	改进 A* 算法
路径长度/m	86.39	101.62
威胁代价	109.23	78.59

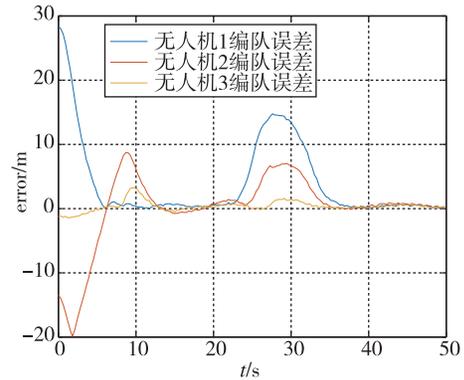
其次, 为无人机设定初始仿真条件。无人机 1、2、3 的初始位置分别为 (10, 0)、(20, 20)、(0, 60), 单位为 m, 对应的初始速度分别为 (5, 1)、(2, 3)、(4, 2), 单位为 m/s。其中, 2 号为领航无人机, 1、3 号为跟随无人机。静态障碍的起始坐标为 (113m, 53m), 移动速度为 4m/s, 移动航向角为 45°, 障碍影响半径为 40m, 最小安全半径为 25m。无人机的期望速度为 5m/s, 最大速度为 10m/s, 最大加速度为 5m/s²。跟随无人机按照编队间隔 y 向各 20m 的队形, 参照领航无人机路径飞行。速度量标准差为 0.1m/s, 位置量标准差为 0.2m。设置采样周期 1ms, 仿真时间 50s。

在考虑动态障碍的前提下, 采用本文的改进领航-跟随方法的编队飞行轨迹与编队误差如图 9 所示。由图 9 可以看出, 各无人机均能在避开动态障碍的情况下按照规划的全局路径飞行。在飞行过程中, 无人机从初始位置起逼近队形, 编队误差减小并趋近于零; 在遇到障碍时, 通过改变速度调整队形避障, 编队误差增大; 穿过障碍后, 编队误差再次减小, 各无人机开始稳定跟踪期望路径并保持了队形。

图 10 是传统领航-跟随法与采用路径跟随的改进领航-跟随法的编队误差对比图。图 10 (a)、图 10 (b) 是两架跟随无人机的编队误差, 图 10 (c) 是领航无人机的编队误差。由图 10 可以看出, 领航无人机的编队误差区别不大, 但跟随无人机在采用了基于路径跟随的改进领航-跟随协同编队方法后, 通过路径参数的预先同步与路径跟随协同, 编队误差低于传统的领航-跟随方法。因此, 采用本文的基于路径跟随的改进领航-跟随方法, 可以实现更高的集群无人机编队精度。



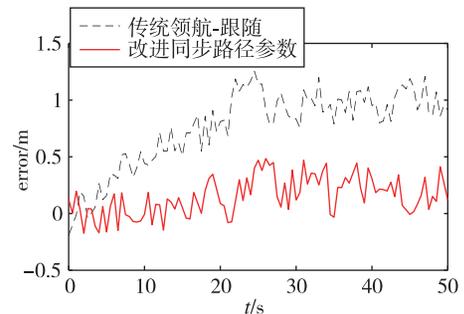
(a) 编队飞行队形



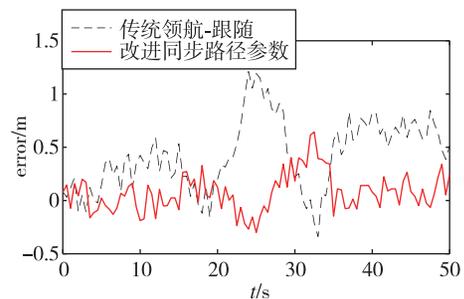
(b) 编队队形误差

图 9 障碍环境下协同编队队形与误差

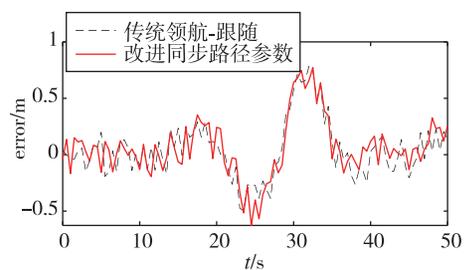
Fig. 9 Coordination formation and error under obstacle environment



(a) 无人机 1 的编队队形误差



(b) 无人机 3 的编队队形误差



(c) 领航无人机的编队队形误差

图 10 传统领航-跟随与改进路径跟随协同编队误差曲线对比

Fig. 10 Comparison of error curves of traditional leader-follower and improved path following coordinated formation

5 结 论

本文研究了领航-跟随法无人机的编队路径最优规划, 以及动态障碍环境下路径跟随与协同编队队形保持问题。通过改进 A* 算法与 Hermite 多项式, 分别完成了全局安全路径最优规划与编队路径参数化表示, 并利用一致性原理与改进的人工势场法实现了动态障碍环境下的编队协同控制。仿真结果表明, 与传统的领航-跟随方法相比, 本方法可以获得更优的全局路径, 以及更高的协同编队精度。此外, 本方法采用了路径参数协调同步, 可以降低对通信系统的要求, 选取的 Hermite 多项式路径参数可以获得光滑的二阶动力学控制量, 使编队的飞行过程更为平稳, 因此具有一定的工程应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 杨晨, 张少卿, 孟光磊. 多无人机协同任务规划研究 [J]. 指挥与控制学报, 2018, 4 (3): 234-248.
YANG C, ZHANG S Q, MENG G L. Multi-UAV cooperative mission planning [J]. Journal of Command and Control, 2018, 4 (3): 234-248 (in Chinese).
- [2] GUERRERO J, OLIVER G. Multi-robot coalition formation in real-time scenarios [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60 (10): 1295-1307.
- [3] CAI X, QUEIROZ M D. Adaptive rigidity-based formation control for multi-robotic vehicles with dynamics [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23 (1): 389-396.
- [4] 王帅, 周乐来, 李贻斌, 等. 多移动机器人编队领航跟随方法研究进展 [J]. 无人系统技术, 2019, 2 (5): 1-8.
WANG S, ZHOU L L, LI Y B, et al. Research progress of multi mobile robot leader-follower formation [J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2 (5): 1-8 (in Chinese).
- [5] UTTENDORF S, EILERT B, OVERMEYER L. Combining a fuzzy inference system with an A* algorithm for the automated generation of roadmaps for Automated Guided Vehicles [J]. AT-Automatisierungstechnik, 2017, 65 (3): 189-197.
- [6] PENG J, HUANG Y, LUO G. Robot path planning based on improved A* algorithm [J]. Cybernetics and Information Technologies, 2015, 15 (2): 171-180.
- [7] 胡蕃, 高立娥, 刘卫东, 等. 基于 Dubins 曲线和改进 A* 算法的 AUV 路径规划方法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 259-262.
HU Q, GAO L E, LIU W D, et al. AUV path planning method based on improved A* search and Dubins curve [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24 (8): 259-262 (in Chinese).
- [8] 师五喜, 王健. 多移动机器人的协同编队控制 [J]. 天津工业大学学报, 2020, 39 (1): 63-68.
SHI W X, WANG J. Cooperative formation control of multiple mobile robots [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2020, 39 (1): 63-68 (in Chinese).
- [9] 王银涛, 黄越, 李俊兵. 基于路径参数协同的多移动机器人编队控制 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (6): 193-197.
WANG Y T, HUANG Y, LI J B. Formation control of mobile robots based on path variables coordinate [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 28 (6): 193-197 (in Chinese).
- [10] HE W, ZHANG B, HAN Q L, et al. Leader-following consensus of nonlinear multiagent systems with stochastic sampling [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47 (2): 327-338.
- [11] 朱旭, 闫茂德, 张昌利, 等. 基于改进人工势场的无人机编队防碰撞控制方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38 (6): 961-968.
ZHU X, YAN M D, ZHANG C L, et al. UAV formation collision avoidance control method based on improved artificial potential field [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38 (6): 961-968 (in Chinese).
- [12] 徐扬, 罗德林, 周路鹏, 等. 基于增益矩阵的二阶集群系统鲁棒分布式立体编队控制 [J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50 (4): 461-474.
XU Y, LUO D L, ZHOU L P, et al. A gain matrix approach for robust distributed 3D formation control with second order swarm systems [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2020, 50 (4): 461-474 (in Chinese).
- [13] 赖云晖, 李瑞, 史莹晶, 等. 基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35 (10): 1530-1537.
LAI Y H, LI R, SHI Y J, et al. On the study of a multi-quadrotor formation control with triangular structure based on graph theory [J]. Control Theory & Applications, 2018, 35 (10): 1530-1537 (in Chinese).
- [14] 高保禄, 高锐军, 王倩, 等. 基于埃尔米特运动预测的地形实时绘制 [J]. 计算机工程与设计, 2017, 38 (2): 483-487.
GAO B L, GAO R J, WANG Q, et al. Real time rendering of terrain based on Hermite prediction [J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38 (2): 483-487 (in Chinese).
- [15] 赵宁宁, 徐德民, 高剑, 等. 基于 Serret-Frenet 坐标系的多 AUV 编队路径跟踪控制 [J]. 鱼雷技术, 2015, 23 (1): 35-39.
ZHAO N N, XU D M, GAO J, et al. Formation path following control of multiple AUVs based on Serret-Frenet coordinate system [J]. Torpedo Technology, 2015, 23 (1): 35-39 (in Chinese).

- [16] PARK S, DEYST J, HOW J. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking [C] //AIAA guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2004: 4900.
- [17] 张化锴, 张曦文, 王清礼. 基于路径预测人工势场法的自动跟随小车路径规划 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 237-240.
- ZHANG H K, ZHANG X W, WANG Q L. Path planning based on path prediction artificial potential field method for automatic following trolley [J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27 (1): 237-240 (in Chinese).