

基于领航-跟随的无人机编队避碰飞行控制

鲁军^a, 杨杰^a, 郝永平^b, 杨丽圆^b, 王俊杰^b

(沈阳理工大学 a. 自动化与电气工程学院, b. 装备与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 为实现多无人机之间队形的动态保持, 针对从机对主机轨迹的实时追踪和主从机之间航向角的准确同步问题, 设计一种以无人机之间距离和角度为变量的领航-跟随算法, 在此基础上设计一种误差比例控制器以实现编队队形动态保持; 在解决无人机内部避碰的问题上, 建立一种球类避碰算法, 避免无人机之间因碰撞而影响队形。通过 Matlab 仿真平台验证无人机集群编队算法, 实验结果表明: 改进的领航-跟随算法能够稳定地操控多架无人机, 实现编队飞行; 改进的无人机避碰算法能够有效维持编队的队形, 并确保编队成员之间有足够的安全间距; 算法的改进不仅提高了无人机编队控制的稳定性, 而且能够应对更加复杂的环境条件。

关键词: 领航-跟随法; 误差比例控制器; 球类避碰算法; 无人机编队

中图分类号: V249.1 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.04.007

Control Research on Formation of UAVs in Flight without Collision Based on Leader-follower

LU Jun, YANG Jie, HAO Yongping, YANG Liyuan, WANG Junjie

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: For the dynamic formation of multiple UAVs, a pilot-following algorithm based on the distance and angle between UAVs is designed to realize the real-time tracking of the main aircraft trajectory and the accurate synchronization of the heading angle between the master and slave aircraft. To avoid UAV collision, a ball-type obstacle avoidance algorithm is established to prevent alteration of the formation of UAV caused by collision. The experimental results of UAV clustering algorithm verified by Matlab simulation platform show that the improved pilot-following algorithm can stably control multiple UAVs and realize formation in flight. The improved UAV collision avoidance algorithm can effectively maintain the formation and ensure that there is enough safe distance between the formation members, indicating that the improved algorithm not only improves the stability of the UAV formation control, but also can cope with more complex environmental conditions.

Key words: leader-follower method; error proportional controller; ball-type collision avoidance algorithm; drone formation

目前无人机技术已经广泛应用于军事和民用领域。单无人机由于续航时间短、载荷量少以及

其在军事协同作战能力的局限性,已经逐渐被多无人机取代^[1]。多无人机的协同作战能在战场上更迅速地发现敌人,有效地完成各项复杂任务。多无人机协同作战能力的核心在于编队的协同控制,即通过某些条件的约束,把分散的多架无人机编成一定顺序或某种特定的形状。目前多无人机编队主要的控制方法有领航-跟随法(leader-follower)、虚拟结构法(virtual structure)、基于行为法(behavior-based)和一致性理论等^[2]。领航-跟随法应用广泛,是以一架无人机作为编队的“首领”,其他无人机作为跟随者共同组成一个队形。该方法中一旦领航机出现问题,整个编队系统就会陷入瘫痪^[3]。为此,研究者们提出了虚拟结构法,通过让领航机虚拟化,把整个编队队形看成一个虚拟的刚体结构,编队中的每架无人机作为刚体结构中的一个节点,通过与虚拟领航机保持相对距离,便可以实现多机协同编队。相对于前一种方法,虚拟结构法可靠性强,但对数据传输的实时性和同步性要求较高,计算量大,会存在通信延迟、丢包的情况。文献[4]提出了一种基于一致性算法的反馈控制律完成无人机编队相关任务。尽管在多智能体系统中,利用一致性理论解决协同控制方面的研究已经较为成熟,但随着时代的不断发展,仍需要进一步扩展一致性理论在多机协同领域的应用研究。

文献[5]中提出了一种基于一致性理论的无人机分布式编队控制方法,即在领航者、跟随者组成的多无人机系统中引入分布式结构,并设计了一种基于一致性算法的协同编队控制器。本文在此基础上提出一种改进基于一致性算法的领航-跟随编队控制器,即误差比例控制器,并在无人机之间加入避碰模块,在相同条件下与文献[6]中提出的一种改进人工势场法的无人机避障算法进行比较。

1 多无人机编队建模

本文采用四架无人机参与实验,其中一架作为领航者,三架作为跟随者,共同组成四架无人机的领航-跟随者模式。由于采用分布式的控制方法,三架从机分别与主机组成两机编队。因此,可以先研究两无人机编队模型,然后再扩展到多机编队中,且为了降低计算难度,本文仅考虑无人机的位置、速度以及偏航角速度(文中简称角速度)。本文提出的无人机运动学模型^[7]为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta \\ \dot{\varphi}_i = \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{x}_i, \dot{y}_i 表示无人机*i*的位置信息; v_i 表示无人机*i*的速度信息; $\dot{\varphi}_i$ 表示无人机*i*的偏航角速度; ω_i 表示无人机*i*的角速度; θ 表示无人机*i*与水平方向的夹角。

假设 UAV1 为领航者, UAV2 为跟随者,将两架无人机的期望队形看成一个刚体, UAV2 随着 UAV1 运动,选领航者的方向为正方向,图 1 为二维环境下的领航-跟随运动模型示意图。图中: v_1, v_2 分别表示领航者与跟随者的实际速度; v_1^*, v_2^* 分别表示领航者与跟随者的期望速度; ω_1, ω_2 分别表示领航者与跟随者的角速度; (x_1, y_1) 表示领航者的位置; (x_2, y_2) 表示跟随者的实际位置; (x_2', y_2') 表示跟随者的期望位置; l^*, φ 分别表示跟随者的期望距离以及偏航角; e_x, e_y 表示在世界坐标系下跟随者当前坐标与期望坐标的横向误差与纵向误差; δ 表示领航者与跟随者的偏航角误差; d 为跟随者预瞄点。

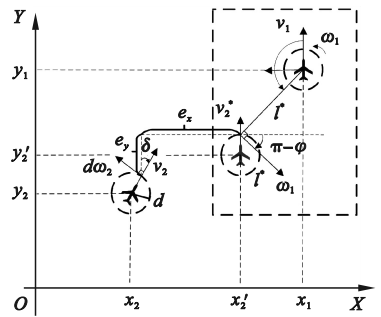


图 1 二维环境下领航-跟随模型

Fig. 1 Leader-follower model in two-dimensional environment

由图 1 可知,跟随者期望速度与实际速度在 x 轴的分量分别为

$$\begin{cases} v_2^* |_x = -l^* \omega_1 \cos(\pi - \varphi) + \omega_2 e_x \\ v_2 |_x = -v_2 \sin \delta + d\omega_2 \cos \delta \end{cases} \quad (2)$$

式中: $l^* \omega_1$ 表示跟随者在期望点随刚体运动产生的转动惯量; $\omega_2 e_x$ 表示跟随者在期望点处因偏航产生的转动惯量; $d\omega_2$ 表示跟随者在当前位置运动产生的转动惯量。

同理可得跟随者期望速度与实际速度在 y 轴的分量分别为

$$\begin{cases} v_2^* |_y = v_1 - l^* \omega_1 \sin \varphi - \omega_2 e_y \\ v_2 |_y = -v_2 \cos \delta + d\omega_2 \sin \delta \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得跟随者的期望速度与实

际速度之间的关系为

$$\begin{cases} v_2^* l_x = v_2 l_x + k e_x \\ v_2^* l_y = v_2 l_y + k e_y \end{cases} \quad (4)$$

将 $e_x \rightarrow 0, e_y \rightarrow 0$ 代入上述公式可以解出跟随者的线速度以及角速度,详见式(11)、式(12)。

2 多无人机协同编队控制算法

2.1 领航-跟随编队算法

领航-跟随算法模型如图2所示。图中: (x_i, y_i) 表示领航者 i 当前位置; θ_i 表示领航者 i 与水平方向的夹角; (x_j, y_j) 表示跟随者 j 当前位置; θ_j 表示跟随者 j 与水平方向的夹角; l^* 表示领航者 i 与跟随者 j 的期望距离; l 表示领航者 i 与跟随者 j 的实际距离; φ^* 表示领航者 i 的期望偏航角; φ 表示领航者 i 的实际偏航角; ω_i 表示领航者的当前角速度; ω_j 表示跟随者的期望角速度。

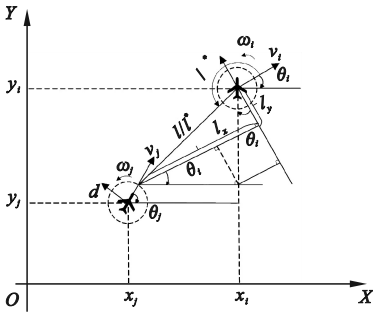


图2 领航-跟随算法模型

Fig.2 Leader-follower algorithm model

领航者在跟随者预瞄点处的横纵坐标差为

$$\begin{cases} \Delta x = x_i - x_j - d \cos \theta_j \\ \Delta y = y_i - y_j - d \sin \theta_j \end{cases} \quad (5)$$

跟随者在领航者坐标系下的相对坐标 (l_x, l_y) 为

$$\begin{cases} l_x = -(x_i - x_j - d \cos \theta_j) \cos \theta_i - (y_i - y_j - d \sin \theta_j) \sin \theta_i \\ l_y = (x_i - x_j - d \cos \theta_j) \sin \theta_i - (y_i - y_j - d \sin \theta_j) \cos \theta_i \end{cases} \quad (6)$$

设误差比例控制器为

$$\dot{e} = -k e \quad (7)$$

式中: e 表示跟随者的期望位置与实际位置的相对距离误差; k 表示比例系数。

利用领航-跟随算法可获得无人机间的相对距离和相对角度,通过调整无人机间距离和角度的大小可以实现无人机集群编队,无人机之间的相对距离误差 e 定义为

$$e = \begin{bmatrix} l_x^* - l_x \\ l_y^* - l_y \end{bmatrix}, l_x^* = l \cos \varphi, l_y^* = l \sin \varphi \quad (8)$$

式中 l_x^*, l_y^* 分别表示跟随者在领航者坐标系下期望的横向距离和纵向距离。

由式(7)、式(8)得

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -\dot{l}_x \\ -\dot{l}_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} e \quad (9)$$

式中: \dot{l}_x, \dot{l}_y 分别表示领航者与跟随者在 X 轴、 Y 轴上的相对距离的导数; k_1, k_2 均表示常数。

令 $\tau = \theta_j - \theta_i$, 得

$$\begin{cases} \dot{l}_x = -v_i + v_j \cos \tau - d \omega_j \sin \tau + \omega_i l_y \\ \dot{l}_y = v_j \sin \tau + d \omega_j \cos \tau - \omega_i l_x \end{cases} \quad (10)$$

代入式(9)得

$$\begin{cases} \dot{e}_x = e_y \omega_i - v_j \cos \tau + d \omega_j \sin \tau - l^* \omega_i \sin(\varphi^*) + v_i \\ \dot{e}_y = -e_x \omega_i - v_j \sin \tau + d \omega_j \cos \tau + l^* \omega_i \cos(\varphi^*) \end{cases} \quad (11)$$

求得跟随者的线速度和角速度为

$$\begin{cases} v_j = (k_1 e_x - l_y \omega_i + v_i) \cos \tau + (k_2 e_y \sin \tau + l_x \omega_i) \sin \tau \\ \omega_j = [(-k_1 e_x + l_y \omega_i - v_i) \sin \tau + (k_2 e_y + l_x \omega_i) \cos \tau] / d \end{cases} \quad (12)$$

图3为领航-跟随算法的流程图。

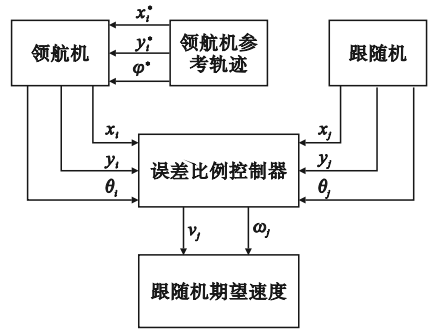


图3 领航-跟随算法流程图

Fig.3 The flow chart of leader-follower algorithm

领航-跟随算法通过控制指令发布领航机的参考轨迹,其中包括领航机的期望位置和期望速度,领航机接收到指令之后进行运动,同时领航机和跟随机会把当前位置发送到误差比例算法模型中,通过计算得出跟随机的期望线速度和角速度。

2.2 无人机避碰算法

多无人机进行编队时,防碰撞问题是一个难点。在高速运动中,无人机可能会和其他无人机路线相交叉,一些无人机采取将本机的路线广播出去,其他无人机再针对每一架无人机做出机间避障路径,该方法会增加路径规划算法的复杂度,并且增加无人机算力消耗和编队网络中的数据传

输量,出现延迟高、控制不灵敏等缺点^[8]。目前,针对防碰撞问题大致有四种解决方案:几何法、人工势场法(artificial potential field, APF)、基于优化的方法以及感知和躲避的方法^[9]。APF算法对于算力的要求不高,符合实时性要求。机载算法搭载基于球形几何体的编队避障算法,每个无人机只需将本机实时目标位置广播出去,其他无人机进入主体无人机球形几何体就会触发避障算法,避障算法会在两架无人机之间施加一个弹性力^[10],将两架无人机分离,再结合原始规划路径实现高灵敏避障。

假设无人机编队在二维空间中飞行,考虑到计算简便以及工程实现,把无人机当作质点,以 XOY 平面为例,通过检测和比较无人机之间的相对距离和相对角度,从而判断位置关系并采取相应的避碰措施,避碰算法模型如图4所示。

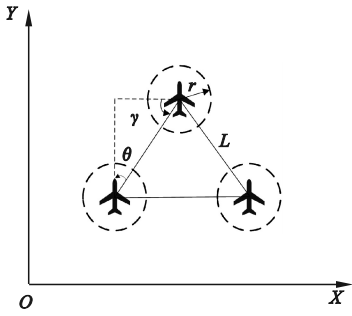


图4 避碰算法模型

Fig. 4 Collision avoidance algorithm model

图4中以无人机质心为圆心、 r 为半径的区域称为碰撞区域, r 称为躲避半径; L 为两架无人机之间的距离; θ 与 γ 分别为跟随者在领航者坐标系下与 X 方向、 Y 方向的夹角。领航机在三维空间下的坐标为 $P_i = (x_i, y_i, z_i)$,跟随机在三维空间下的坐标 $P_j = (x_j, y_j, z_j)$,规定以 P_{ij} 作为两架无人机之间的相对位置矢量,矢量三角关系表示为

$$P_{ij} = P_i - P_j \quad (13)$$

对 P_{ij} 取范数可得到无人机之间的直线距离为

$$L = \|P_{ij}\| \quad (14)$$

令 $\eta = 1 - L/r$, η 称为避碰因子。当 $\eta > 0$ 时证明无人机处在危险区域。以 XOY 坐标系为例分析判断跟随者与领航者在 X 轴与 Y 轴的接近程度,如果跟随者更接近于领航者的 X 方向,系统会优先给无人机施加一个远离 X 方向的作用力,相反,如果跟随者更接近于领航者的 Y 方向,系统也会给无人机施加一个远离 Y 方向的作用力,通过比较两者的接近程度就可以让领航者与跟随者保

持动态平衡。

$$\begin{cases} \cos \theta = [P_{ij} \cdot [1 \ 0 \ 0]] / \|P_{ij}\|^2 \\ \cos \gamma = [P_{ij} \cdot [0 \ 1 \ 0]] / \|P_{ij}\|^2 \end{cases} \quad (15)$$

判断 $\cos \theta$ 与 $\cos \gamma$ 绝对值的大小,如果 $|\cos \theta| > |\cos \gamma|$,说明 $\theta < \gamma$,表示跟随者更接近领航者的 Y 轴。反之,如果 $|\cos \theta| < |\cos \gamma|$ 则表示跟随者更接近领航者的 X 轴。令 P_q 为归一化之后的位置误差,可表示为

$$P_q = \begin{cases} [kP_{ij} \cdot [1 \ 0 \ 0]] / \|P_{ij} \cdot [1 \ 0 \ 0]\|^2, \theta < \gamma \\ [\eta P_{ij} \cdot [0 \ 1 \ 0]] / \|P_{ij} \cdot [0 \ 1 \ 0]\|^2, \theta > \gamma \end{cases} \quad (16)$$

由式(13)、式(15)、式(16)可得

$$\begin{cases} P_i^* = P_i + P_q \\ P_j^* = P_j - P_q \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_i^* 表示领航者的期望位置; P_j^* 表示跟随者的期望位置。

图5为避碰算法的流程图。

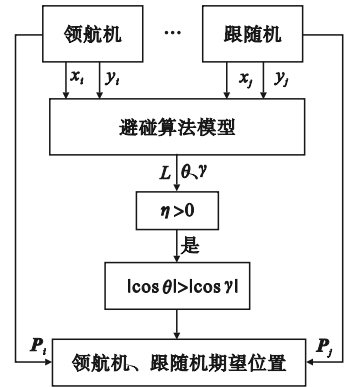


图5 避碰算法流程图

Fig. 5 Collision avoidance algorithm flow chart

避碰算法通过接收两架无人机的位置计算出二者的相对距离 L 和各自的相对角度 θ 和 γ ,通过比较相对距离 L 和躲避半径 r 的大小判断是否存在避碰,再通过计算 $\cos \theta$ 和 $\cos \gamma$ 的值决定领航机和跟随机的期望位置,最后通过领航机和跟随机各自到达期望位置实现避碰。通过此避碰算法可以实现相邻的两架无人机向相反的方向移动,避免触碰。同理,如果考虑到跟随者距离领航者 Z 轴的接近程度则可以实现两架无人机在三维场景下的动态避碰。

3 仿真对比与分析

本文通过搭建多无人机软件于环仿真应用平

台 (software in the loop simulation, SITL)^[11], 验证无人机集群和编队算法的可行性以及避碰算法的有效性。构建了以机器人操作系统 ROS 为分布式控制系统的通信平台、PX4 为飞行控制核心以及 Gazebo 为仿真器的多无人机软件测试平台, 通过无人机分布式通信平台得到各架无人机的位置、高度、速度、偏航角等命令^[12-13], 将命令移植到无人机领航-跟随算法中, 实现多无人机协同编队, 最后再通过 Matlab 仿真验证算法的可靠性。

图 6、图 7 分别表示四架无人机一字形编队和固定三角形编队绕圈实验的 Matlab 仿真界面, 由仿真结果可以看出, 无人机集群在不同的编队队形下, 整体同步性较好且跟随机相对于领航机的轨迹跟踪效果良好。

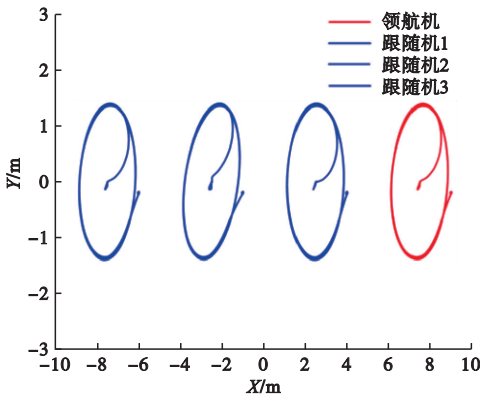


图 6 一字型编队仿真

Fig. 6 One-line shaped formation simulation

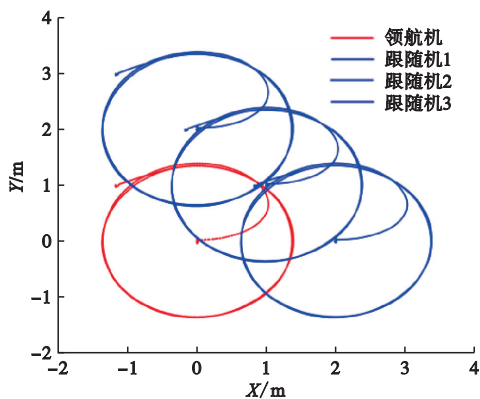
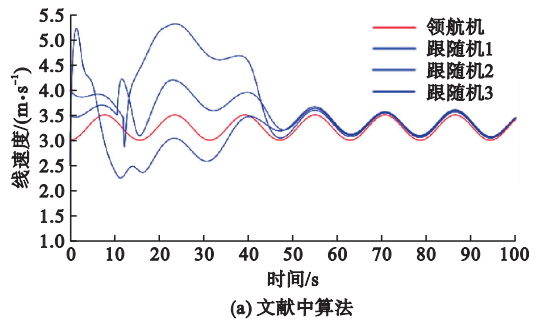


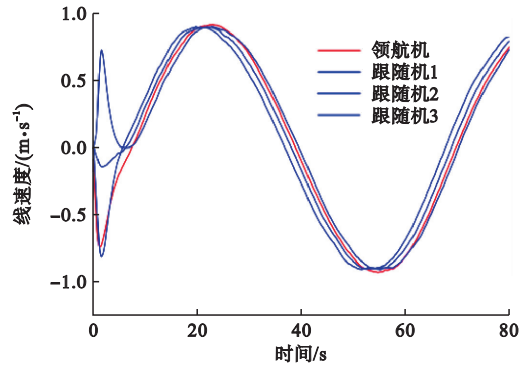
图 7 三角形编队仿真

Fig. 7 Triangle formation simulation

图 8、图 9 分别表示无人机在做绕圈飞行实验过程中的线速度一致性编队仿真结果和角速度一致性编队仿真结果。图 8(a)、9(a) 表示文献中算法的仿真结果, 图 8(b)、9(b) 是本文编队协同算法的仿真结果。通过对比可以看出: 采用文献中算法, 领航机和跟随机的速度、角速度趋于一致的



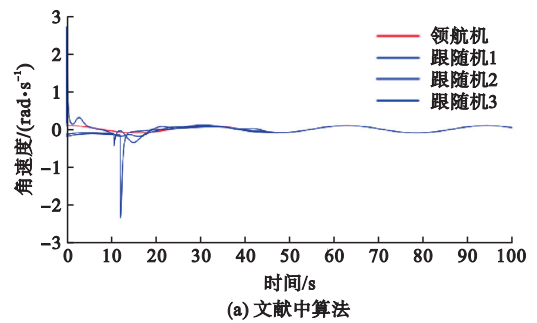
(a) 文献中算法



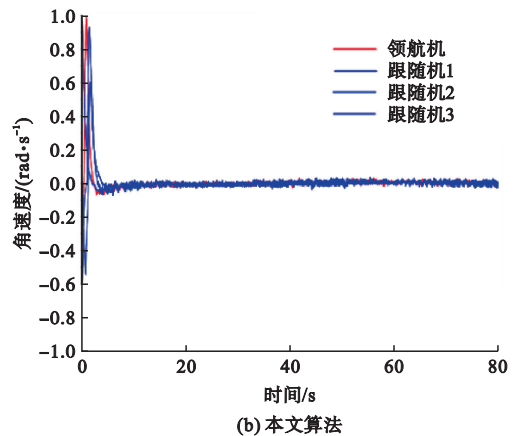
(b) 本文算法

图 8 线速度一致性编队仿真

Fig. 8 Linear velocity consistency formation simulation



(a) 文献中算法



(b) 本文算法

图 9 角速度一致性编队仿真

Fig. 9 Angular velocity consistency formation simulation

时间大致在 40 ~ 50 s 之间; 采用本文算法, 领航机和跟随机速度达成一致的时间大致在 5 ~ 10 s 之

间;采用本文算法无人机集群的响应速度会更加迅速。

图 10、图 11 分别表示避碰算法在不同飞行编队中的应用。图 10 表示无人机一字形编队仿真,无人机起始点相隔 3 m,终止点相距 1.5 m,当无人机之间的距离接近 2 m 时,避碰程序将会被触发。图 12 表示无人机在进行三角形编队避碰实验时的速度一致性编队仿真结果。通过对比可以看出,本文算法相对于传统算法不仅可以确保无人机之间有足够的安全间距,避免碰撞的潜在风险,而且在队形稳定保持方面也存在优势。

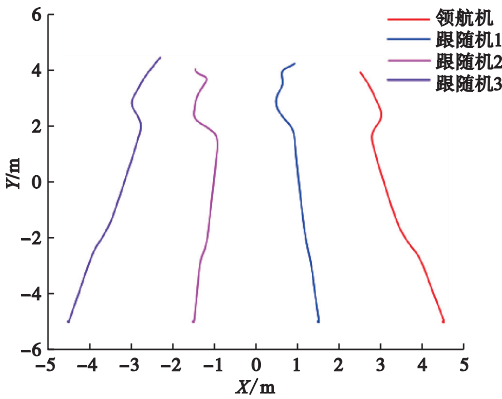
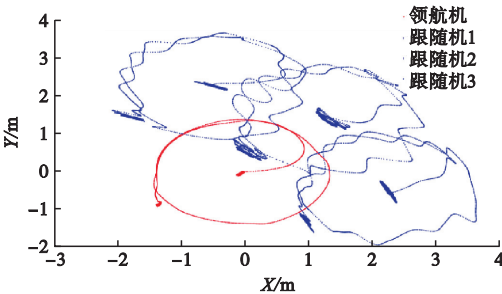
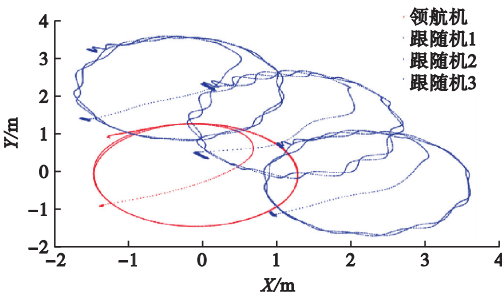


图 10 一字形无人机编队避碰仿真

Fig. 10 Collision avoidance simulation of one-line shaped UAV formation



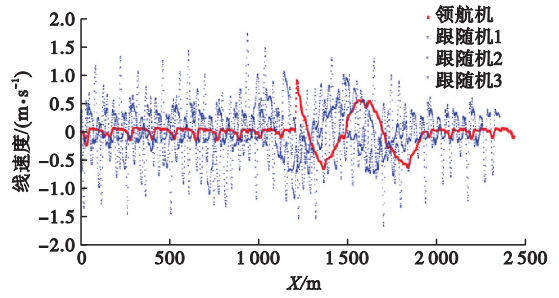
(a) 文献中算法



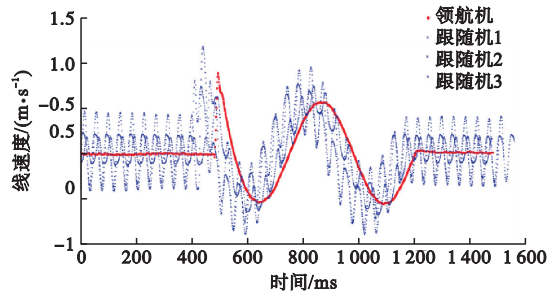
(b) 本文算法

图 11 三角形编队避碰仿真

Fig. 11 Collision avoidance simulation of triangular formation



(a) 文献中算法



(b) 本文算法

图 12 三角形编队线速度一致性编队仿真

Fig. 12 Linear velocity consistency formation simulation of triangular formation

4 结论

本文针对多无人机协同编队控制问题,分析了多无人机的协同机制,并基于传统的领航-跟随结构设计了一种误差比例控制器,提出一种基于一致性理论的编队控制算法,有效提高了编队的整体同步性;为了避免无人机发生碰撞,提出了一种基于人工势场法的球类避障算法,并通过无人机编队组成不同编队队形的仿真试验证实了本文多机协同控制算法的有效性。

参考文献 (References):

[1] 陈龚. 无人机协同路径规划三维实时可视化仿真平台[D]. 南京:南京理工大学,2017.

[2] 林倩玉. 多无人机协同编队控制算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[3] LI J C, LIU J M, HUANGFU S Q, et al. Leader-follower formation of light-weight UAVs with novel active disturbance rejection control [J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 117:577 - 591.

[4] 李正平, 鲜斌. 基于虚拟结构法的分布式多无人机鲁棒编队控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(11):2423 - 2431.

LI Z P, XIAN B. Robust distributed formation control of multiple unmanned aerial vehicles based on virtual structure [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(11):2423 - 2431. (in Chinese)