

基于改进人工势场方法的多无人机编队避障算法^①

刘云平^② 徐 泽 赵中原 蒋长胜

(南京信息工程大学自动化学院 南京 210044)

摘要 针对无人机(UAV)机群在编队飞行过程中可能受机群其他无人机或鸟类等障碍物的影响,基于传统人工势场(APF)的编队避障算法易陷入局部最优化解,进而导致无人机机群避障失败的问题,提出了一种基于改进三维人工势场(3D-APF)的编队避障算法。通过在势场函数中引入一致性理论的通信拓扑和权重等概念,实现无人机机群在分布式结构下的快速编队。然后将z轴势场引入二维势场,并引入与障碍物移动方向垂直的辅助势场以消除算法陷入局部最优化解的缺陷。最后,通过 Matlab 仿真实验验证了本文算法的有效性。

关键词 改进人工势场(APF)方法; 三维势场; 无人机(UAV)机群; 编队控制; 避障控制

0 引言

近年来,随着无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)的应用场景不断增加,应用形式从单架飞机转向了多无人机。无人机机群的灵活性和稳定性强、活动范围大且执行任务效率高,可以胜任物流运输、电力巡检、污染排查、战场侦察和打击等军事或民用领域的任务^[1-2]。机群通常采用编队飞行的方式来执行这些复杂任务,因此,针对多无人机编队问题展开研究具有重要理论和应用价值。

无人机机群编队的构型主要有两种,一种是集中式结构,机群各无人机均与中心节点通信,由中心节点统一进行任务规划和控制等;另一种是分布式结构,机群无需中心节点,各无人机仅与存在通信连接的其他无人机交互信息,且各无人机可实现自主控制^[3]。因此,分布式结构相比于集中式结构而言,实时性更好、稳定性和灵活性更高。

目前,常用的多无人机编队控制算法有跟随领航法、一致性法、基于行为法、虚拟结构法和人工势

场法(artificial potential field, APF)等^[4-7]。其中,人工势场法的思路为通过人为构建一种反映无人机周围其他无人机或障碍物的位置以及大小等信息的虚拟势场力,并根据该势场力决定无人机下一刻的操作。该方法最初由文献[8]提出,具有计算量小、实时性强且实现简单等特点,可以兼具编队和避障的能力,被广泛应用于工程实践中。但在使用人工势场法时,存在算法陷入局部最优化解的问题,且在改变机群的编队队形时需要调整原有势场函数的各参数,其灵活性低^[9]。

针对该问题,众多学者提出多种解决办法。如文献[10]通过引入优先级模型和方向变化权重改善了局部最优化解。文献[11]将人工势场法和基于捕食逃逸的鸽群优化法结合以改善局部最优化解。文献[12]通过设置多个虚拟目标点的方式来避免机群陷入局部最优化解的措施。但上述文献没有考虑无人机机群在三维环境下的避障。文献[13]引入了一组无人机与障碍物之间的相对速度。文献[14]将两个具有旋转矢量的平面势场复合为了三维人工势场(three-dimensional artificial potential

^① 国家重点研发计划(2018YFC1405703),国家自然科学基金(51875293)和电子信息控制重点实验室开放基金(6142105190308)资助项目。

^② 男,1979年生,博士,教授;研究方向:智能机器人,多体系统动力学,运动稳定性,气象仪器;联系人,E-mail: liuyunping@nuist.edu.cn
(收稿日期:2020-05-28)

field, 3D-APF)。文献[15]改进了斥力势场,使之垂直于航线方向。上述文献在三维人工势场基础上引入相对速度或改变势场方向等方式避免了算法局部最优化解的缺陷,但仍有改进空间。因为上述方法均没有考虑无人机之间的通信关系,仅针对三机编队做了优化。

因此,本文针对使用传统人工势场方法进行避障时存在算法陷入局部最优化解的问题,在传统二维人工势场方法上引入 z 轴势场以构建三维人工势场,并引入基于障碍物速度和角度的辅助势场以避免局部最优化解并提高对移动障碍物的避让速度。然后针对分布式通信结构,参考了一致性理论,将无人机之间的通信拓扑和权重等引入人工势场中,有效利用了无人机之间的通信关系。最后,本文提出了一种改进后的三维人工势场编队避障算法并利用 Matlab 进行仿真实验。

1 问题描述

本文研究无人机机群编队避障问题。机群采用“领航-跟随”编队控制结构,由 1 架领航者和 4 架跟随者组成。机群在飞行过程中,仅领航者可获知目标信息,其余跟随者均参考领航者的轨迹编队飞行。控制目标为:在飞行过程中,机群中各无人机间以及无人机与障碍物间均不发生碰撞。

无人机机群采用分布式通信结构,其通信拓扑用无向图表示为 $G = \{v, \varepsilon\}$ 。其中 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示 n 架无人机节点的集合; $\varepsilon \subseteq \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in v, v_i \neq v_j; i, j \in (1, 2, \dots, n)\}$ 表示节点对的集合。设有向图 G 的邻接矩阵为 $A = [a_{ij}]$, 表示机群中各无人机之间的通信关系。其中, $0 \leq a_{ij} \leq 1$ 表示节点 v_i 和 v_j 之间(即无人机 i 和 j 之间)的通信权重。

在无人机机群中,无人机 i 的动力学模型如下所示^[16]:

$$\mathbf{P}''_i = \frac{1}{m_i} (\mathbf{Q} + \mathbf{R}^T \mathbf{T} - \mathbf{K}_p \mathbf{P}') \quad (1)$$

$$\mathbf{J}\psi'' = \mathbf{K}_\psi L\psi' + \mathbf{M} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{P} = [x, y, z]^T$ 表示无人机位置, m_i 为无人机

质量; $\mathbf{Q} = [0, 0, -m_i g]^T$, g 为重力常数; $\mathbf{T} = [0, 0, T_i]^T$, T_i 为推力; $\mathbf{K}_p = [k_i^x, k_i^y, k_i^z]^T$ 和 $\mathbf{K}_\psi = [k_i^\theta, k_i^\varphi, k_i^\phi]^T$ 分别为空气阻尼系数; $\mathbf{J} = [J_i^\theta, J_i^\varphi, J_i^\phi]^T$ 为惯性力矩; $\psi = [\theta, \varphi, \phi]^T$ 表示无人机姿态; L 为机翼长度; $\mathbf{M} = [M_i^\theta, M_i^\varphi, M_i^\phi]^T$, M_i^θ, M_i^φ 和 M_i^ϕ 分别为俯仰力矩、翻滚力矩和偏航力矩, \mathbf{R}^T 为无人机的坐标系转换矩阵。

本文根据参考文献[17]建立无人机的坐标系转换矩阵。则第 i 架无人机从惯性坐标系 $Exyz$ 转换为机体坐标系 $B_ix_b y_b z_b$ 的转换矩阵为

$$\mathbf{R}^T = [\mathbf{A} \ \mathbf{B} \ \mathbf{C}] \quad (3)$$

$\mathbf{A} = [c\theta_i c\varphi_i, s\phi_i s\theta_i c\varphi_i - c\phi_i s\varphi_i, c\phi_i s\theta_i s\varphi_i + s\phi_i s\varphi_i]^T$ 、
 $\mathbf{B} = [c\theta_i s\varphi_i, s\phi_i s\theta_i s\varphi_i + c\phi_i c\varphi_i, c\phi_i s\theta_i s\varphi_i - s\phi_i c\varphi_i]^T$ 、
 $\mathbf{C} = [s\theta_i, s\phi_i c\theta_i, c\phi_i c\theta_i]^T$; $c = \cos$, $s = \sin$; θ_i, φ_i 和 ϕ_i 分别代表俯仰角、偏航角和翻滚角。

2 改进 3D-APF 编队避障控制算法

本文对传统人工势场方法进行改进,在传统二维平面势场上引入 z 轴势场以构建三维人工势场。考虑了无人机之间的通信结构,将一致性理论引入人工势场中,设计一种分布式三维人工势场算法。该三维势场由两个势场融合而成,可使无人机分别对水平面和 z 轴方向进行控制,使得各无人机优先到达同一平面,然后在同一平面执行编队或避障任务。本文分别从领航者和跟随者两部分具体阐述编队控制算法。

2.1 编队控制算法

基于分布式通信结构的无人机机群在编队飞行时,各无人机均仅可获知机群中部分无人机的信息。而在“领航-跟随”编队控制结构中,仅领航者对目标点进行跟踪。

本文先设计领航者编队控制算法。定义目标点和领航者的位置分别为 $\mathbf{p}_t = [x_t, y_t, z_t]^T$ 和 $\mathbf{p}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$ 。目标点对领航者的吸引势场 U_t^t 为

$$U_t^t = \frac{1}{2} [k_t^1 (\rho_{1t}^{xy})^2 + k_t^2 (\rho_{1t}^z)^2] \quad (4)$$

式中, $k_t^1 > 0, k_t^2 > 0$ 分别为水平势场和 z 轴势场的增益调节参数; ρ_{1t}^{xy} 表示领航者与目标点在水平面的相

对距离; ρ_{1t}^z 表示领航者与目标点在垂直方向上的距离。该势场可使得领航者迅速到达期望高度(目标点高度),然后在同一平面中跟踪目标点。

领航者受目标点的引力 F_l^t 由吸引势场 U_l^t 的负梯度计算而得:

$$\mathbf{F}_l^t = -\nabla U_l^t = -(k_l^1 \rho_{1t}^{xy} \mathbf{n}_{1t}^{xy} + k_l^2 \rho_{1t}^z \mathbf{n}_{1t}^z) \quad (5)$$

式中, \mathbf{n}_{1t}^{xy} 和 \mathbf{n}_{1t}^z 分别为无人机与目标点在水平面和垂直方向的单位向量。

然后设计跟随者编队控制算法。本文对传统人工势场方法的机间引力势场进行改进,通过引入无人机之间的期望相对位置以实现快速编队,并弥补机群在利用传统人工势场方法编队时不易改变队形的缺陷。定义无人机 i 的位置和期望位置分别为 $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 和 $\mathbf{p}_i^d = [d_i^x, d_i^y, d_i^z]^T$,则跟随者的机间引力势场 U_{ij}^a 设计为

$$U_{ij}^a = \frac{1}{2} [k_a^1 (e_{ij}^{xy})^2 + k_a^2 (e_{ij}^z)^2 + k_a^3 (ev_{ij})^2] \quad (6)$$

其中, k_a^1 、 k_a^2 和 k_a^3 为调节参数, e_{ij}^{xy} 和 e_{ij}^z 分别为跟随者 i 与 j 在水平平面和 z 轴的相对位置之差, ev_{ij} 为跟随者 i 与 j 的相对位置速度。其具体定义为

$$\begin{aligned} e_{ij}^{xy} &= p_i^{xy} - p_j^{xy} - (p_i^{dx} - p_j^{dx}) \\ e_{ij}^z &= p_i^z - p_j^z - (p_i^{dz} - p_j^{dz}) \\ ev_{ij} &= v_i - v_j \end{aligned} \quad (7)$$

最后考虑机群的通信拓扑和权重,定义无人机之间的通信权重为 a_{ij} ,跟随者 i 受与其由通信连接的其他无人机的机间平均引力势场 U_i^a 为

$$U_i^a = (1/N_i) \sum_{j=1}^n (a_{ij} U_{ij}^a) \quad (8)$$

其中, $N_i = \sum_{j=1}^n \text{sig}(a_{ij})$ 。

因此跟随者 i 的机间引力 \mathbf{F}_i^a 由机间平均引力势场 U_i^a 的负梯度计算而得:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_i^a = -\nabla U_i^a = -\left(1/N_i\right) \sum_{j=1}^n \{ a_{ij} [k_a^1 e_{ij}^{xy} \mathbf{n}_{ij}^{xy} \right. \\ \left. + k_a^2 e_{ij}^z \mathbf{n}_{ij}^z + k_a^3 ev_{ij} \mathbf{nv}_{ij}] \} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, \mathbf{n}_{ij}^{xy} 和 \mathbf{n}_{ij}^z 为跟随者 i 与 j 之间在水平面和垂直方向的单位向量, \mathbf{nv}_{ij} 为跟随者 i 与 j 相对速度的单位向量。

2.2 避障控制算法

为避免无人机机群编队飞行过程中发生碰撞,需分别设计无人机之间以及无人机与障碍物之间的避障控制算法。

首先设计无人机间斥力势场。视各无人机为球体,机间斥力势场均匀包围于球体外侧。与机间引力势场类似,在考虑无人机之间的通信权重后,机间平均斥力势场 U_i^r 设计为

$$U_i^r = \frac{1}{2N_i} \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} k_r^1 \left(\frac{1}{\rho_{ij}} - \frac{1}{\rho_d^d} \right)^2, \rho_{ij} \leq \rho_d^i \right) \quad (10)$$

其中, k_r^1 为斥力势场增益调节参数, ρ_{ij} 为无人机与 j 的相对距离, ρ_d^i 为斥力势场影响距离。

因此无人机 i 受其他无人机的机间斥力 \mathbf{F}_i^r 由机间斥力势场 U_i^r 的负梯度计算而得:

$$\mathbf{F}_i^r = -\nabla U_i^r = -\frac{k_r^1}{N_i} \sum_{j=1}^n \left[a_{ij} \left(\frac{1}{\rho_{ij}} - \frac{1}{\rho_d^d} \right) \frac{1}{(\rho_{ij})^2} \mathbf{n}_{ij} \right] \quad (11)$$

然后设计障碍物斥力势场。如图 1 所示,本文在传统人工势场法中引入一个额外的势场以消除该缺陷,该势场与障碍物的速度以及无人机与障碍物的相对角度有关。该势场可避免算法陷入局部最优化解。

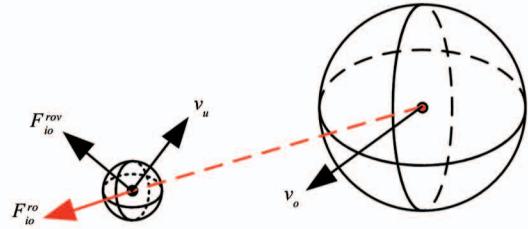


图 1 障碍物合势场示意图

本文构建了障碍物斥力势场,为了提高对移动障碍物的避障范围,在传统斥力势场基础上引入一个关于障碍物速度 v_o 的函数 g_o , $g_o = k_o^1 [1 + e^{-1/(1+v_o)}]$, 该函数的值与障碍物速度 v_o 正相关,随着 v_o 增大而增大。障碍物斥力势场 U_{oi}^{ro} 设计为

$$U_{oi}^r = \frac{1}{2} g_o \left(\frac{1}{\rho_{oi}} - \frac{1}{\rho_d^d} \right)^2, \rho_{oi} \leq \rho_d^o \quad (12)$$

其中, k_o^1 为障碍物斥力势场增益调节参数, ρ_{oi} 为无人机 i 与障碍物 o 的距离, ρ_d^o 为障碍物斥力势场影响范围。

最后本文构建了障碍物辅助势场。如图 2 所示,该辅助障碍物势场垂直于障碍物速度 v_o 方向,与无人机 i 和障碍物 o 之间的角度 θ_1 、障碍物速度 v_o 的大小 $|v_o|$ 以及其方向 θ_2 有关。

障碍物辅助势场 U_{io}^{rov} 设计为

$$U_i^r = \frac{1}{2} g_{ov} (1 + (1 + vo)^2 R_{io}^{rov}(\beta)), \rho_{io} \leq \rho_{io}^d \quad (13)$$

其中, $g_{ov} = k_o^2 (1 + r_n)$, 其为辅助势场随机增益调节函数; k_o^2 为增益调节系数, $0 \leq r_n \leq 1$ 为随机数; $R_{io}^{rov}(\beta) = [R_1 \ R_2]^T$ 为势场转换角度矩阵, $R_1 = [\cos(\beta) \ \sin(\beta)]^T$, $R_2 = [-\sin(\beta) \ \cos(\beta)]^T$ 。

β 为旋转角度, 与无人机和障碍物的相对角度以及障碍物速度方向有关。如图 2 所示, 此时 $0 < \theta_2 - \theta_1 < \pi/2$, 势场力方向为障碍物速度方向顺时针旋转 $\pi/2$ 。 β 具体定义为

$$\beta = \begin{cases} \theta_1 + \pi/2 & 0 < \theta_2 - \theta_1 \leq \pi/2 \\ \theta_1 - \pi/2 & -\pi/2 < \theta_2 - \theta_1 \leq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

因此无人机 i 受障碍物 o 的合力 F_{io}^{ro} 由障碍物斥力势场 U_{io}^{ro} 和辅助势场 U_{io}^{rov} 组成的合势场负梯度方向计算而得:

$$\begin{aligned} F_{io}^{ro} &= -\nabla U_{io}^{ro} - \nabla U_{io}^{rov} \\ &= -\frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^m \left[g_o \left(\frac{1}{\rho_{io}} - \frac{1}{\rho_{io}^d} \right) \frac{1}{(\rho_{io}^d)^2} \mathbf{n}_{io} \right. \\ &\quad \left. + g_{ov} (1 + v_o) R_{io}^{rov}(\beta) \mathbf{n}_{ov} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

其中 M_i 为无人机 i 受障碍物势场影响的数量, \mathbf{n}_{io} 为无人机 i 与障碍物 o 之间的单位向量, \mathbf{n}_{ov} 为障碍物 o 在速度方向的单位向量。

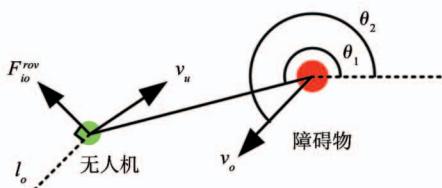


图 2 障碍物辅助势场示意图

2.3 无人机机群编队避障算法

本文所述的无人机机群主要分为领航者和跟随者。领航者的编队避障算法主要由式(5)目标点引力 \mathbf{F}_l^t 、式(11)机间斥力 \mathbf{F}_i^r 和式(15)障碍物合斥力 \mathbf{F}_{io}^{ro} 构成; 而跟随者的编队避障算法主要由式(9)机间引力 \mathbf{F}_i^a 、式(11)机间斥力 \mathbf{F}_i^r 和式(15)障碍物合斥力 \mathbf{F}_{io}^{ro} 构成, 具体如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{leader} &= \mathbf{F}_l^t + \mathbf{F}_1^r + \mathbf{F}_{io}^{ro} \\ \mathbf{F}_{follower}^i &= \mathbf{F}_l^t + \mathbf{F}_i^r + \mathbf{F}_{io}^{ro} \end{aligned} \quad (16)$$

综上, 机群中各无人机所受势场力的集合为: \mathbf{F}

$= [\mathbf{F}_{leader}, \mathbf{F}_{follower}^1, \dots, \mathbf{F}_{follower}^n]$ 。对式(1)和(3)进行改写并与无人机所受的合势场力进行融合, 则无人机的线运动方程为

$$\mathbf{P}''_i = \frac{1}{m_i} (\mathbf{Q} - \mathbf{K}_p \mathbf{P}') + \mathbf{u}_i + \mathbf{F}_i \quad (17)$$

其中 $\mathbf{F}_i = [F_i^x, F_i^y, F_i^z]^T$ 为合势场力 \mathbf{F}_i 在 x 、 y 和 z 轴的分量, 而 $\mathbf{u}_i = [u_i^x, u_i^y, u_i^z]^T$ 表示为

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{T}_i}{m_i} \mathbf{R}_i \quad (18)$$

其中, $\mathbf{R}_i = [A_i, B_i, C_i]^T$, $A_i = c\phi_i s\theta_i c\varphi_i + s\phi_i s\varphi_i$, $B_i = s\phi_i s\theta_i c\varphi_i - c\phi_i s\varphi_i$, $C_i = c\theta_i c\varphi_i$ 。

为使机群在编队飞行过程中更好地避障, 当机群检测到障碍物时, 系统将 $k_a^1 \sim k_a^3$ 的值调节为 $1/(1 + \mathbf{F}_i^r + \mathbf{F}_{io}^{ro})$ 倍以应对障碍物。

3 仿真实验与分析

本文采用由一架领航者(L)和4架跟随者(F1~F4)组成的机群进行仿真实验。机群的通信网络结构如图3所示, 图中虚线为单向数据传输链路, 实线为双向数据传输链路。各无人机的初始位置、初始速度以及相对位置如表1所示。各无人机的期望相对位置如表2所示。

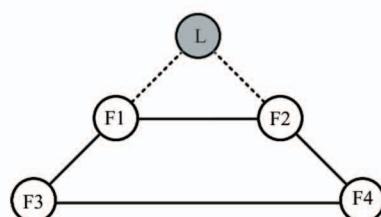


图 3 无人机机群编队通信网络拓扑

表 1 各无人机初始位置、速度

UAV	初始位置/m	速度/m/s
L	(50, 50, 20)	(4, 4, 0)
F1	(3, 37, 8)	(0.5, 1.2, 0)
F2	(38, 12, 36)	(0.5, 0.8, 0)
F3	(25, 15, 14)	(1, 1.1, 0)
F4	(23, 33, 22)	(0, 0, 0)

表2 各无人机期望相对位置

UAV	初始期望相对位置/m	变化后的期望相对位置/m
L	(10, 0, 0)	(20, 0, 0)
F1	(5, 5, 0)	(10, 10, 0)
F2	(5, -5, 0)	(10, -10, 0)
F3	(0, 10, 0)	(0, 20, 0)
F4	(0, -10, 0)	(0, -20, 0)

本文通过设置3个固定障碍物和1个移动障碍物以验证算法的避障能力。其中,固定障碍物1和移动障碍物处于可使传统人工势场法陷入局部最优化解的位置。同时,设置机群于90 s时将紧凑三角形更改为大三角形队形,以测试算法的队形变换能力。

障碍物的初始信息为固定障碍物1和2是圆柱体、3为圆球,其位置分别为(300 m, 305 m)、(325 m, 310 m)以及(335 m, 325 m, 28 m),半径均为5 m。移动障碍物的起始位置为(300 m, 300 m, 30 m),半径为1 m,其于55 s时以-10 m/s的速度朝领航者移动。

为贴合实际情况,假设所有障碍物的可被感知距离均限制为15 m,各无人机的最大速度均为10 m/s。经仿真后得到编队飞行轨迹的三维视图(见图4)以及机群速度(见图5)。

将图4数据平面化可得机群编队飞行轨迹的平面视图(见图6),以及机群高度(见图7)。其中,图6下侧4个小图分别为机群在初始状态下、第1次

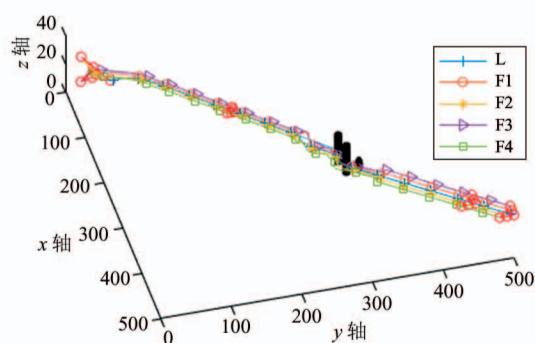


图4 编队飞行轨迹三维视图

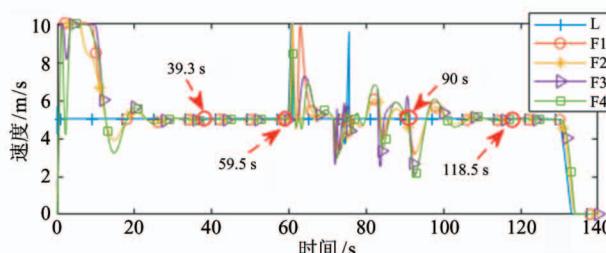


图5 机群速度

形成队形时、第2次形成队形时以及到达目标点时的机群状态。将图6与图5对比可知,无人机机群于 $t=39.3$ s时第1次形成编队(图6(b)),于 $t=59.5$ s时更改队形后直至 $t=118.5$ s时第2次形成编队(图6(c)),于 $t=133.1$ s时机群到达目标点(图6(d))。由图7可知于 $t=24.3$ s时机群已到达同一高度。由此可知,算法使机群各无人机优先到达同一水平面,然后执行编队和避障任务。

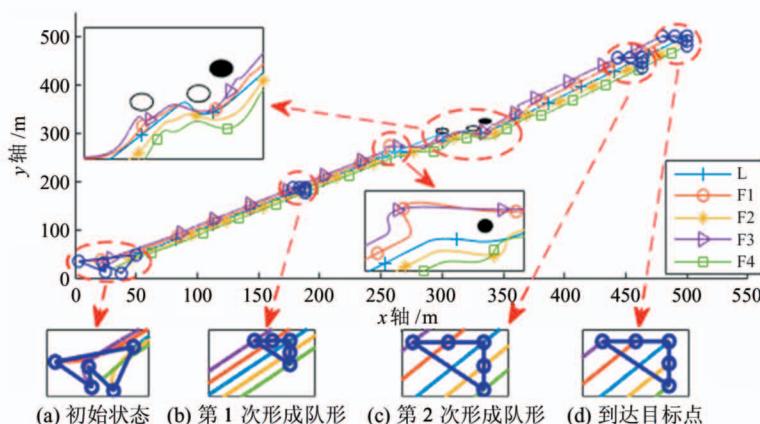


图6 机群编队飞行轨迹平面视图

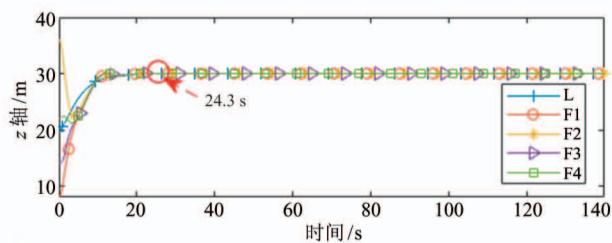


图 7 机群高度

然后绘制各无人机与障碍物的距离,如图 8 所示。将图中数据进一步分析可得无人机与障碍物距离最近的时刻,如表 3 所示。由图 8 和表 3 可知,机群各无人机对于圆柱或球形固定障碍物的规避过程中均未发生碰撞;对移动障碍物的规避过程中,机群避免了陷入局部最优化解而导致避障失败的问题,实现了成功避障。

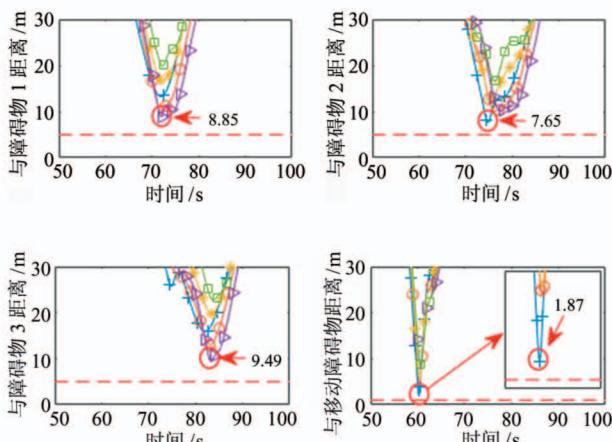


图 8 机群各无人机与障碍物距离

表 3 与障碍物距离最近的无人机

障碍物	最小距离/m	时间/s	UAV
固定 1	8.85	71.97	F3
固定 2	7.65	73.90	L
固定 3	9.49	83.26	F3
移动 1	1.87	60.29	L

最后绘制各无人机之间的相对距离,如图 9 和表 4 所示。由图表可知,各无人机在编队和避障过程中均未发生碰撞,且任意两无人机距离最近的时刻均为避障过程中。

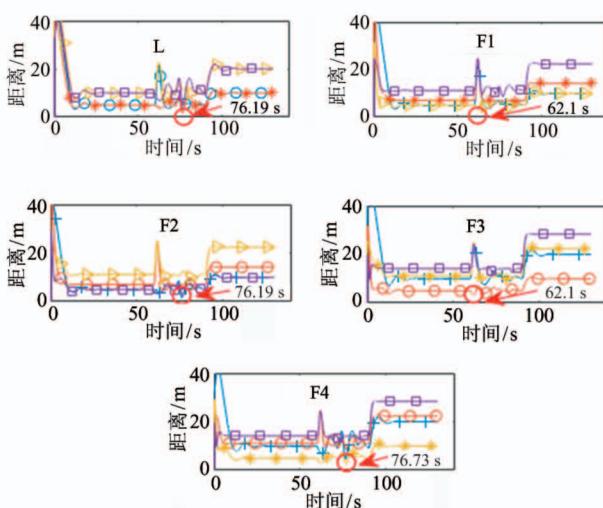


图 9 各无人机间距离

表 4 距离最近的两无人机及其时刻

UAV	最小距离/m	时间/s	对应 UAV
L	1.62	76.19	F2
F1	3.24	62.10	F3
F2	1.62	76.19	L
F3	3.24	62.10	F1
F4	2.26	76.73	F2

4 结论

本文对传统人工势场方法进行改进,通过将 z 轴势场引入传统二维人工势场中,并在势场中引入通信拓扑和权重等信息,构建了新的三维人工势场。然后在势场中引入垂直于障碍物速度方向的辅助势场,重新设计了障碍物势场,使算法克服了传统人工势场方法易陷入局部最优化解的缺陷。在此基础上,本文提出一种基于改进人工势场的无人机机群编队避障控制算法,其有效利用了无人机之间的通信关系,实现了机群在三维空间中快速编队和避障的能力。最后,本文通过 Matlab 仿真实验验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] Duan H B. Multiple UAV Formation Control [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2014: 43-181
- [2] 宗群,王丹丹,邵士凯,等.多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(3):1-14

- [3] 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, 25(4):5-11
- [4] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(11):1601-1613
- [5] 丁国华, 朱大奇. 多 AUV 主从式编队及避障控制方法[J]. 高技术通讯, 2014, 24(5):538-544
- [6] Tian B L, Zuo Z Y, Wang H. Leader-follower fixed-time consensus of multi-agent systems with high-order integrator dynamics[J]. *International Journal of Control*, 2016, 90(7): 1420-1427
- [7] Dong X W, Hua Y Z, Zhou Y, et al. Theory and experiment on formation-containment control of multiple multirotor unmanned aerial vehicle systems[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(1):229-240
- [8] Khatib O. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: the operational space formulation [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(1):43-53
- [9] Mabrouk M H, McInnes C R. Solving the potential field local minimum problem using internal agent states [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(12):1050-1060
- [10] Ruchti J, Senkbeil R, Carroll J, et al. Unmanned aerial system collision avoidance using artificial potential fields [J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2014, 11(3):140-144
- [11] 段海滨, 邱华鑫, 范彦铭. 基于捕食逃逸鸽群优化的无人机紧密编队协同控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(6):559-572
- [12] Hu Q L, Dong H Y, Zhang Y M, et al. Tracking control of spacecraft formation flying with collision avoidance[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 42:353-364
- [13] 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
- [14] Zhang J L, Yan J G, Zhang P. Fixed-wing UAV formation control design with collision avoidance based on an improved artificial potential field [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 78342-78351
- [15] 马娅婕, 刘国庆, 胡轶, 等. 基于改进人工势场的无人机预设航线避障研究[J]. 高技术通讯, 2020, 30(1):64-70
- [16] Zhao B, Xian B, Zhang Y, et al. Nonlinear robust adaptive tracking control of a quadrotor UAV via immersion and invariance methodology [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(5):2891-2902
- [17] Hull D G. *Fundamentals of Airplane Flight Mechanics* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 237-261

A formation and collision avoidance algorithm based on improved artificial potential field method for multi-UAV

Liu Yunping, Xu Ze, Zhao Zhongyuan, Jiang Changsheng

(School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract

The unmanned aerial vehicle(UAV) fleet may be disturbed by other UAVs or obstacles such as birds during formation flying, and the obstacle avoidance algorithm based on the traditional artificial potential field(APF) method is easily trapped in local optimal solution, which will lead to the failure of the UAV fleet to avoid obstacle. In order to overcome the disadvantages mentioned above, an obstacle avoidance method for the UAV fleet based on improved three-dimensional artificial potential field(3D-APF) is proposed in this paper. The concept of communication topology and weight of consensus theory is introduced into the potential field function to realize the rapid formation of UAV fleet in the distributed structure. Then the z-axis potential field is introduced into the two-dimensional potential field and the auxiliary potential field perpendicular to the moving direction of the obstacle is introduced to eliminate the defect of the algorithm falling into the local optimization solution. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by Matlab simulation experiment.

Key words: improved artificial potential field (APF) method, 3D potential field, unmanned aerial vehicle (UAV) fleet, formation control, collision avoidance control