

3-15-2024

UAV Swarm Obstacle Avoidance Algorithm Based on Visual Field and Velocity Guidance

Xueqi Gui

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China, gxq_qi@163.com

Chuntao Li

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China, lct13770925493@163.com

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

UAV Swarm Obstacle Avoidance Algorithm Based on Visual Field and Velocity Guidance

Abstract

Abstract: In the future aerial combat of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs), the safe flight of UAV swarm in unknown airspace is an important content of swarm research. In view of avoiding obstacles and maintaining behavior in the UAV swarm system, this paper presents a UAV swarm collision avoidance algorithm based on visual field and velocity guidance (VFVG). The swarm adaptive communication topology mechanism is designed based on the visual field method. Combined with the principle of far attraction and near repulsion and the consensus method, the mechanism can accelerate the transmission of obstacle avoidance information among UAV swarms while maintaining the behavior. On this basis, the limit cycle is combined with the artificial potential field method to construct the obstacle avoidance velocity guidance term, which solves problems such as the difficulty of swarm separation, obstacle avoidance hovering, and stagnation. To evaluate the obstacle avoidance efficiency of the proposed algorithm, an obstacle avoidance time index is introduced. The simulation results show that the proposed method can make multiple UAVs pass through complex obstacle areas safely, quickly, and smoothly with good swarm behavior and effectively improve the success rate and efficiency of swarm obstacle avoidance.

Keywords

UAV swarm, visual field method, artificial potential field, velocity guidance, local extremum

Recommended Citation

Gui Xueqi, Li Chuntao. UAV Swarm Obstacle Avoidance Algorithm Based on Visual Field and Velocity Guidance[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 545-554.

基于视野和速度引导的无人机集群避障算法

桂雪琪, 李春涛*

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 在未来的多无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)空中作战中, 无人机集群在未知空域中安全飞行是集群研究中的重要内容。针对无人机集群避障以及集群形态保持问题, 提出了一种基于视野和速度引导(visual field and velocity guidance, VFVG)的集群避障算法。基于视野法设计集群自适应通讯拓扑机制, 结合远吸引斥势力原则及一致性方法, 在保持集群形态的同时, 加速了集群无人机个体间的避障信息的传递。在此基础上, 提出将极限环与人工势场法相结合构造避障速度引导项, 解决了集群遇障分群困难、避障徘徊停滞等问题。引入避障时间指标, 验证了算法的避障效率。仿真结果表明, 该方法能够使多无人机以良好的集群形态安全快速平稳地通过复杂障碍区域, 有效提高了集群避障成功率和避障效率。

关键词: 无人机集群; 视野法; 人工势场; 速度引导; 局部极值

中图分类号: V279; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)03-0545-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1287

引用格式: 桂雪琪, 李春涛. 基于视野和速度引导的无人机集群避障算法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 545-554.

Reference format: Gui Xueqi, Li Chuntao. UAV Swarm Obstacle Avoidance Algorithm Based on Visual Field and Velocity Guidance[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 545-554.

UAV Swarm Obstacle Avoidance Algorithm Based on Visual Field and Velocity Guidance

Gui Xueqi, Li Chuntao*

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In the future aerial combat of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs), the safe flight of UAV swarm in unknown airspace is an important content of swarm research. In view of avoiding obstacles and maintaining behavior in the UAV swarm system, this paper presents a UAV swarm collision avoidance algorithm based on visual field and velocity guidance (VFVG). The swarm adaptive communication topology mechanism is designed based on the visual field method. Combined with the principle of far attraction and near repulsion and the consensus method, the mechanism can accelerate the transmission of obstacle avoidance information among UAV swarms while maintaining the behavior. On this basis, the limit cycle is combined with the artificial potential field method to construct the obstacle avoidance velocity guidance term, which solves problems such as the difficulty of swarm separation, obstacle avoidance hovering, and stagnation. To evaluate the obstacle avoidance efficiency of the proposed algorithm, an obstacle avoidance time index is introduced. The simulation results show that the proposed method can make multiple UAVs pass through complex obstacle areas safely, quickly, and smoothly with good swarm behavior and effectively improve the success rate and efficiency of swarm obstacle avoidance.

Keywords: UAV swarm; visual field method; artificial potential field; velocity guidance; local extremum

收稿日期: 2022-10-27

修回日期: 2023-02-16

第一作者: 桂雪琪(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为无人机集群。E-mail: gxq_qi@163.com

通讯作者: 李春涛(1975-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为智能无人机控制。E-mail: lct13770925493@163.com

0 引言

面对未来城市作战信息缺失且环境复杂多变的战场态势，无人机集群以其低成本、大规模的集群形态有效弥补了单架无人机活动范围有限、任务失败率高的劣势^[1]，成为城市制空作战中的重要手段。灵活、高效的避障飞行，就成为保证无人机集群安全的一项关键技术难题。

依据集群无人机间的信息交互方式可以将集群分为集中式和分布式^[2]，集中式集群避障原理简单，易求得全局最优，但其对通讯带宽要求高。分布式^[3-4]集群中每个无人机均可视为是相对独立的智能体^[5]。集群中无人机通过局部通讯网络与周围邻居进行信息交互，相互协同且独立的做出决策。对于分布式集群行为，遵循文献[6]提出的分离、聚集、对齐3条集群法则，在此基础上涌现了很多集群模型，如Vicsek模型，Couzin模型等。文献[7]建立了基于人工势场和一致性的集群模型的虚拟智能体避障算法，并给出了理论分析。文献[8]基于Olfati算法，提出将周围邻居等同于虚拟避障智能体，舍弃邻居的速度信息，缓解了通讯传输数据压力，但速度一致性效果较差。文献[9]提出将不规则障碍物填补成六边形晶体状，取晶体的点集作虚拟避障智能体的位置坐标，解决了Olfati算法中只能对凸形障碍避障的缺陷。

上述集群避障方法均是在Olfati的集群模型上进行部分改进完善，拓宽了算法的适用度，但依旧存在集群保持与避障行为间的矛盾^[10]。文献[11]提出无人机与周围邻居共享障碍物信息的方式来帮助个别无人机逃离局部极值区域，从而实现集群整体协同避障。文献[12]提出将虚拟子目标与边界力结合，兼顾了无人机避障过程中安全、保持队形、目标趋同的问题。文献[13]提出基于几何方式的局部信息交互机制，设计包含分离和聚集的自适应控制律，实现自主分群避障。文献[14]提出通过局部通讯拓扑改变，实现编队中无人机自由融合以及拆分，受液体球的启发通过设计虚拟力

实现了无人机编队像液体一样流过障碍物。文献[15]研究应用鸽群飞行中的切换机制，当群体中出现突然转弯或曲折时，鸽子会选择跟随头鸽，以此达到分群的目的。但是其在大规模集群中的使用情况还未得到验证。

因此，针对分布式集群避障行为中出现的分群决策困难以及易陷入避障徘徊、停滞等问题，本文设计了基于视野和速度引导的集群避障算法，实现以良好的集群形态安全快速平稳地通过障碍区域。本文主要创新工作如下：

(1) 提出基于视野的自适应通讯拓扑机制，克服个体理想速度取周围邻居“平均值”的限制，增强个体避障反应程度，使个体快速做出避障决策，同时间接加速避障信息在群体中的传播速度，缩短避障时间。

(2) 提出将人工势场法与极限环法相结合，依据无人机相对于障碍物的位置、速度信息，构造避障引导速度，解决势场法易陷入局部徘徊、停滞等问题。

(3) 建立了集群避障评价指标，对集群的避障效率进行衡量。进行仿真实验，验证本文算法有效提高了集群避障成功率和避障效率。

1 问题建模

1.1 集群无人机运动模型

假设旋翼无人机具备完整的加速度控制器，将旋翼无人机视为质量不变的刚体，此时集群中第*i*架无人机运动模型可以简化为二阶运动模型：

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

式中： $\boldsymbol{p}_i, \boldsymbol{v}_i, \boldsymbol{u}_i \in \mathbb{R}^m (m=2,3)$ ，无人机在二维平面中运动，取 $m=2$ ； $\boldsymbol{p}_i = [p_{ix}, p_{iy}]^T$ 为无人机*i*的二维空间位置向量； $\boldsymbol{v}_i = [v_{ix}, v_{iy}]^T$ 为无人机*i*的二维空间速度向量； $\boldsymbol{u}_i = [u_{ix}, u_{iy}]^T$ 为无人机*i*的控制输入。该模型速度与加速度满足：

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}_i &= \begin{cases} \mathbf{v}_i, & \|\mathbf{v}_i\| < \mathbf{v}_{\max} \\ \mathbf{v}_{\max} \frac{\mathbf{v}_i}{\|\mathbf{v}_i\|}, & \|\mathbf{v}_i\| \geq \mathbf{v}_{\max} \end{cases} \\
 \mathbf{u}_i &= \begin{cases} \mathbf{u}_i, & \|\mathbf{u}_i\| < \mathbf{u}_{\max} \\ \mathbf{u}_{\max} \frac{\mathbf{u}_i}{\|\mathbf{u}_i\|}, & \|\mathbf{u}_i\| \geq \mathbf{u}_{\max} \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

1.2 环境描述

本文考虑的空中威胁有防空雷达区域, 静止的障碍物(禁飞区)。假设无人机能探测到飞行环境中的障碍物, 遇到障碍物采取绕行的避障措施, 为了突出问题本质, 对障碍物直接进行凸化处理, 统一做最小外接圆, 如图 1 所示。

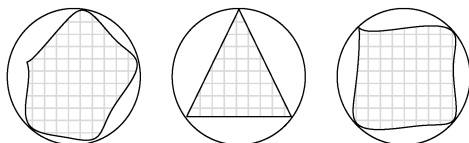


图 1 障碍物最小外接圆

Fig. 1 Minimum circumscribed circle of obstacles

本文设定 $\mathbf{o}=[x_o, y_o]^T$ 和 r_o 分别为最小外接圆的圆心和半径。障碍物可表示为

$$(x-x_o)^2+(y-y_o)^2=r_o^2$$

图 2 的阴影部分为障碍物影响范围, r_δ 为障碍物影响半径。

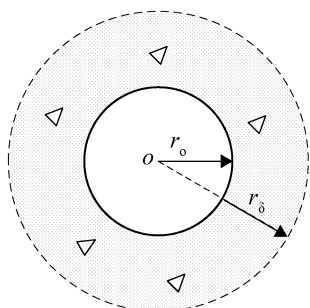


图 2 障碍物影响范围

Fig. 2 Area of influence of obstacle

1.3 集群碰撞威胁建模

在集群飞行过程中, 若发生如下情况则无人机存在碰撞的危险, 则需采取避障措施:

- (1) n 架无人机组成的集群, 在存有 k 个障碍物

障碍物区域中, 无人机与障碍物的距离小于等于 d_o , 则视为无人机与障碍物有发生碰撞威胁, 即

$$\|\mathbf{p}_i-\mathbf{o}_j\|-r_o \leq d_o, i=1,2, \dots, n, j=1,2, \dots, k \quad (3)$$

(2) 避障过程中, 集群中无人机之间的距离保持小于 d_p , 则视为无人机机间有碰撞威胁, 即

$$\|\mathbf{p}_i-\mathbf{p}_j\| \leq d_p, i, j=1,2, \dots, n \quad (4)$$

集群中确保每架无人机的无碰撞, 进而保证整个集群的无碰撞发生。

2 分布式集群避障算法设计

根据式(1)无人机运动模型, 设计避障算法:

$$\mathbf{u}_i=\mathbf{u}_i^{\text{group}}+\mathbf{u}_i^{\text{obs}} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}_i^{\text{group}}$ 为无人机集群行为运动控制项; $\mathbf{u}_i^{\text{obs}}$ 为躲避外界障碍物控制项。图 3 给出了集群避障算法的设计架构。

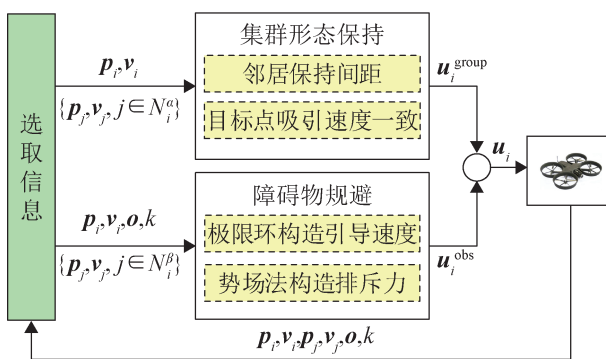


图 3 集群避障算法结构图

Fig. 3 Structure of swarm obstacle avoidance algorithm

2.1 集群内部运动协同

针对集群遇障分离困难问题提出了基于视野的自适应通讯拓扑设计, 构造光滑的通讯权重系数。在此基础之上, 利用势场法和一致性算法设计集群内部运动协同方法。

2.1.1 基于视野的自适应通讯拓扑机制

基于视野的自适应通讯拓扑机制, 使得个体及时从邻居中间获取空间障碍物信息, 提前避障预警, 提高集群的避障效率。

大多集群系统通过与周围邻居的平均速度保持一致来维持集群的稳定形态, 削弱了单个个体

受外部刺激时做出的应激反应，个体不能迅速做出正确的避障行为。因此，基于视野法设计集群自适应通讯拓扑机制，以同时兼顾避障分群和集群形态的要求。

定义 1: 以个体速度为基准，向两边区域扩散 ω 角度，定义该区域为无人机的视野范围。

当且仅当附近无人机处于该视野范围时，无人机才有可能与之进行通讯，图 4 为无人机视野范围示意图。

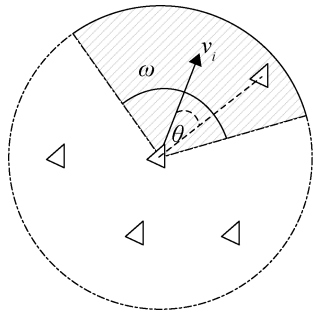


图 4 无人机视野范围
Fig. 4 UAV field of view

无人机运动区域位于自身速度方向上，因此，将个体速度方向周围区域视为个体即将有可能经过的区域，位于此区域的邻居获取的信息对本机而言具备一定的先验性。

当集群处于避障阶段时，优先与前方具备“先验”信息的个体进行交互，提高避障信息在集群中的传递速度，达到集群协同避障的效果，使无人机快速做出决策判断。选取无人机的感知视角为 $\omega \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。且锥形区域的视角感知更符合生物集群的特性。

判断邻居规则步骤如下：

(1) 计算无人机 j 相对无人机 i 运动方向的夹角 θ_{ij} ：

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \cdot \mathbf{v}_i}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| \cdot \|\mathbf{v}_i\|}$$

(2) 判断夹角 θ_{ij} 是否属于 ω 范围内：

$$|\theta_{ij}| \leq |\omega|$$

(3) 判断无人机 j 与无人机 i 之间距离是否小于通讯距离 r ， r 依据式(4)中的 d_p 确定， $l \in (0, 1)$ 为系数：

$$\begin{aligned} \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| &< r \\ r &= d_p / l \end{aligned}$$

即，邻居集合为

$$N_i^a = \left\{ j \in v, j \neq i: \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| < r, |\theta_{ij}| < |\omega| \right\} \quad (6)$$

仅依靠距离和视野来选择邻居会出现信息突变的情况，导致控制量抖动剧烈。所以选取平滑函数式(7)，对邻居距离和视野边界进行平滑过渡处理，函数曲线如图 5 所示。

$$\rho(z) = \begin{cases} 1, & z \in [0, h] \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{z-h}{1-h}\right) \right], & z \in [h, 1] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中： h 为平滑系数， $h \in (0, 1)$ 。

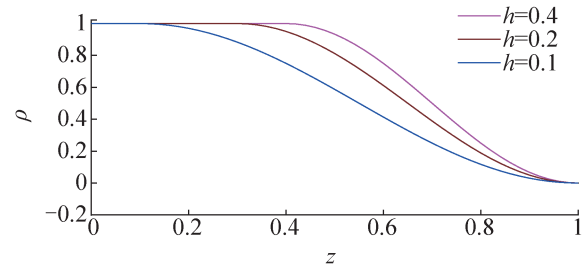


图 5 平滑函数图像
Fig. 5 Curve of smooth function

对于视野边界进行平滑处理，视野权重系数为 $s_{ij}(\theta) = \rho(\theta_{ij}/\omega)$ ，越靠近本体速度延长线上的邻居，个体受其影响越大。同理对距离边界进行平滑处理，距离权重系数为 $d_{ij}(p) = \rho(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|/r)$ 。无人机 j 对无人机 i 的影响可量化为 a_{ij} ，表示为

$$a_{ij} = s_{ij}(\theta) d_{ij}(p)$$

2.1.2 基于势场和一致性的集群形态保持

假设集群中所有无人机均执行同一任务，前往统一目标地点，群体理想运动速度一致。

集群运动控制输入分为两个部分：

$$\mathbf{u}_i^{\text{group}} = \mathbf{u}_i^{\text{inter}} + \mathbf{u}_i^{\text{goal}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^{\text{inter}} = & c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} a_{ij} \phi(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|) \mathbf{n}_{ij} + \\ & c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} a_{ij} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{n}_{ij} = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) / \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|$, 表示无人机*i*指向无人机*j*的单位向量; c_1^α 、 c_2^α 为非负可调系数; ϕ 为势力函数:

$$\begin{aligned} \phi(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|) = & \frac{1}{2} [(a+b) \frac{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| + c}{\sqrt{1 + (\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| + c)^2}} + (a-b)] \end{aligned} \quad (10)$$

无人机均向目标点和理想速度看齐, 表示为

$$\mathbf{u}_i^{\text{goal}} = -c_1^\gamma (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_\gamma) - c_2^\gamma (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_\gamma) \quad (11)$$

$$\mathbf{v}_\gamma = \dot{\mathbf{p}}_\gamma \quad (12)$$

式中: c_1^γ 、 c_2^γ 为非负可调系数; \mathbf{p}_γ 为目标点位置; \mathbf{v}_γ 为集群的理想运动速度。

无人机与式(6)获得的邻居之间遵循“近斥远吸”势力法则^[16], 保证集群内部无碰撞和有序形态, 通过一致性实现速度匹配, 如式(9)所示。

2.2 集群外部避障

当集群无人机进入到障碍物影响区域时如图2所示, 每个无人机受到障碍物的斥力以及速度引导, 帮助无人机脱离障碍危险区。

2.2.1 基于势场的避障算法

集群无人机进入到障碍物威胁范围内时, 会受到障碍物的排斥力, 结合式(10)中目标点对无人机的吸引, 引导无人机避开障碍物。

计算无人机距离第*k*个障碍物最近位置 \mathbf{p}_i^k , 通过投影的方式来确定, \mathbf{p}_o 为障碍物圆心, R_k 为第*k*个障碍物的半径, 表达式为

$$\mathbf{p}_i^k = \mu \mathbf{p}_i + (1 - \mu) \mathbf{p}_o$$

$$\mu = R_k / \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_o\|$$

集群个体受斥力避障控制输入为

$$\mathbf{u}_i^{\text{obs}} = c_1^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} b_{ik} \phi_\beta(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^k\|) \mathbf{n}_{ik} \quad (13)$$

$$N_i^\beta = \{k: \|\mathbf{p}_i^k - \mathbf{p}_i\| < r_s\} \quad (14)$$

$$\phi_\beta(p) = (p / \sqrt{1 + \|p\|^2}) - 1 \quad (15)$$

式中: c_1^β 为非负可调系数; ϕ_β 为斥力函数。

同理, 为防止避障输入突变造成不必要的抖动, 设计权重系数 $b_{ik} = \rho(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^k\| / r_s)$ 对斥力作用范围进行平滑处理, r_s 为障碍物的碰撞威胁半径; $\mathbf{n}_{ik} = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^k) / \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^k\|$ 为避障矢量方向。

但是仅有人工势场法极易陷入局部极值的困境之中, 无人机机间又相互协同作用, 最终导致整个集群都陷入困境之中, 所以需要引入速度引导项帮助无人机脱离困境。

2.2.2 基于极限环的外部避障速度引导

本小节在障碍物圆心位置构造极限环, 引导个体脱离局部停滞、徘徊区域(局部极值点)。以障碍物的碰撞威胁半径 r_s 作为极限环的收敛半径。按照个体速度方向相对障碍物圆心的位置选择避障的方向即极限环的旋转方向。计算得到障碍物影响范围内各位置的极限环矢量方向, 并以此方向作为自身避障速度引导方向, 引导个体脱离局部极值点。

极限环使其作用域内点均收敛到单位圆^[17], 如图6所示, 因此可以灵活设计障碍物作用边界, 二维平面的标准极限环方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y + x(r^2 - x^2 - y^2) \\ \dot{y} &= -x + y(r^2 - x^2 - y^2) \end{aligned} \quad (16)$$

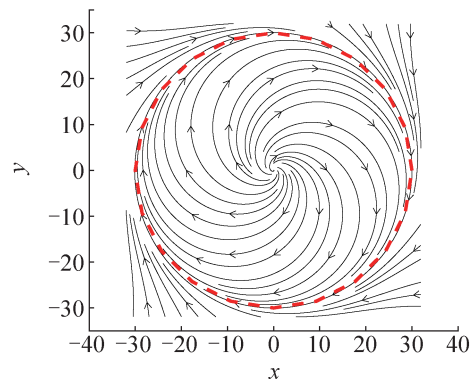


图6 极限环
Fig. 6 Limit cycle

极限环构造避障引导速度的方法为

(1) 建立以障碍物圆心为原点的坐标系，描述无人机位置和速度信息，坐标系如图7所示，障碍物坐标系 O_{xy} 与大地坐标系 G_{xy} 间转换关系为

$$O_{xy} = G_{xy} - R \quad (17)$$

式中: $R = [x_o, y_o]^T$ 。

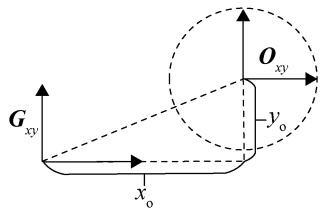


图7 障碍物坐标系与大地坐标系相对位置

Fig. 7 Relative position of obstacle coordinate system and geodetic coordinate system

(2) 依据无人机的速度方向构造直线方程，将其简化为直线标准式:

$$ax + by + c = 0$$

(3) 计算直线 l 与圆心最近距离:

$$d = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

(4) 将 d 代入极限环方程式(16)中，得出引导速度方向 $v_o = [\dot{x}, \dot{y}]^T$:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{d}{|d|} y + \alpha x (r_s^2 - x^2 - y^2) \\ \dot{y} &= -\frac{d}{|d|} x + \alpha y (r_s^2 - x^2 - y^2) \\ \alpha &= 1/r_s^2 \\ r_s &= r_o + d. \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中，渐近因子 α 决定了旋转的程度。 d 决定了避障方向，当 d 为正数时，则极限环为顺时针旋转方向，当 d 为负数时，则极限环为逆时针旋转方向。

(5) 将理想速度转化到大地坐标系下，并将无人机 i 的速度旋转到该理想速度方向，得出避障引导速度为

$$v_i^k = \frac{v_o}{\|v_o\|} \cdot \|v_i\| \quad (19)$$

因此，在式(13)的基础上，集群个体避障控制输入更新为

$$u_i^{\text{obs}} = c_1^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} b_{ik} \phi_\beta(\|p_i^k - p_i\|) n_{ik} + c_2^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} b_{ik} (v_i^k - v_i) \quad (20)$$

式中: c_2^β 为非负可调系数。

2.3 集群避障效果评价

为评估本文集群避障算法的好坏，设计避障评价指标对集群避障行为进行评判。

定义2: 集群中90%的无人机与障碍物的直线距离在障碍物中心与目标点连线投影距离 d_{eva} 均大于5 m，定义为集群避障成功。

图8为 d_{eva} 计算示意图。

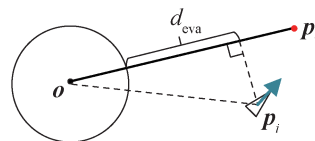


图8 d_{eva} 计算示意图
Fig. 8 d_{eva} calculation

定义3: 集群里第一个无人机进入到障碍物威胁范围中到集群避障成功的时间，定义为避障时耗 t_{con} 。

选取90%的无人机表示集群中大部分无人机均已成功脱困，集群评价指标不因个别掉队无人机而发生改变。判断无人机集群脱离避障的指标，不仅仅需要远离障碍物同时还需要朝着目标点的方向前行，所以采用 d_{eva} 的大小来衡量避障的完成性。避障时耗 t_{con} 体现避障的的快速性， t_{con} 越小表示集群避障时发生停滞减速的时间越短，避障效率越高。

3 仿真与分析

考虑由10架无人机组成集群，假设避障前所有无人机已处于稳定的集群形态，仿真集群前行途中遇突发未知静态障碍物的场景。设置无人机

集群的初始位置与速度如表1所示, 设置无人机参数如表2所示。以 Intel(R) Core(TM) i5-7500 CPU @ 3.40 GHz 内存为8 G的计算机作为仿真平台, 验证算法功能和性能。

表1 无人机初始状态
Table 1 Initial state of UAV

无人机序列	位置/m	速度/(m/s)
UAV0	[2.9,0.7]	[3.4,-0.3]
UAV1	[16.7,-4.6]	[3.3,-0.4]
UAV2	[7.5,-1.1]	[3.5,-0.2]
UAV3	[10.4,7.2]	[3.3,-0.27]
UAV4	[8.3,-6.1]	[3.6,0.05]
UAV5	[6.6,4.0]	[3.5,-0.26]
UAV6	[3.6,-4.3]	[3.3,-0.2]
UAV7	[11.3,2.2]	[3.6,-0.2]
UAV8	[12,-2.8]	[2.5,-0.1]
UAV9	[15.9,0.4]	[3.5,-0.34]

表2 无人机参数设置
Table 2 UAV parameter setting

参数	数值	参数	数值
v_{\max} /(m/s)	5	u_{\max} /(m/s ²)	10
$[d_p, d_o]$	[5,10]	r_δ /m	10
ω	$[-\pi/2, \pi/2]$	v_γ /(m/s)	[5,0]
p_γ /m	[80,0]	$[c_1^\gamma, c_2^\gamma]$	[0.05,0.3]
$[c_1^\alpha, c_2^\alpha]$	[0.8,1.4]	$[c_1^\beta, c_2^\beta]$	[0.5,0.7]

3.1 避障性能测试

为测试本文避障方法脱离局部极值的能力以及集群避障的快速性, 设置障碍物相对于集群至目标点连线的不同位置, 分析2种具有代表性的障碍物场景, 将 VFVG(visual field and velocity guidance) 算法与 Flocking 算法^[7]进行对比。

仿真场景1: 为验证本文算法是否能成功脱离局部极值区域。障碍物处于集群与目标点连线的中心部位, 此时稳定集群形态的无人机速度方向与障碍物切平面垂直, 集群极易陷入局部极值区域中, 是集群障碍物场景中避障最困难的情况。图9为无人机集群障碍物在 x - y 平面的运动轨迹。图9(b)给出该场景 Flocking 算法遇障后运动轨迹, 因 Flocking 算法中正前方无人机会陷入局部极值区

域, 速度停滞。侧方无人机因速度平均原则, 无法脱离大集群转向避障, 整个集群以原状态继续直行, 避障失败。而 VFVG 算法利用极限环对无人机进行速度引导, 使得无人机脱离局部极值, 且采用视野通讯拓扑机制, 使得集群前方无人机对于外界避障刺激信息十分敏感, 迅速采取避障措施, 引领无人机集群分群避障, 轨迹如图9(a)所示。

仿真场景2: 为验证集群避障效率问题, 障碍物位于集群行进道路的侧方, 此时不易出现局部极值问题, 比较算法间的避障速度。如图9(c)、(d)所示, 此时2种算法均可成功通过障碍区。VFVG 算法集群避障轨迹更加平滑, 避障后集群位置更接近目标点。Flocking 算法虽集群结构较为稳固, 这也是制约其避障动作的原因。表3中也给出了避障时耗, 本算法避障时间为10.48 s, Flocking 算法需要15.6 s, 时间缩短了32.8%, 有效提高了集群的避障效率。

表3给出了4种场景障碍物位于相对集群不同位置时, VFVG 算法与 Flocking 算法的所需避障时间, 可以看出, 本文算法避障成功率更高以及避障耗时更短。

3.2 复杂障碍环境下避障验证

为验证集群在复杂障碍物环境中连续避障的能力, 设置多个相对集群不同位置和大小障碍物在原定的行驶路径中, 障碍物稀疏分布确保每个障碍物的威胁范围不重叠。障碍物圆心位置分别为[40,0; 60,15; 85,-5; 120,10] m, 半径为[8; 5; 6; 5] m。

如图10所示, 无人机集群成功避开途中所有障碍物。图11给出最终互为邻居的无人机的机间距离变化曲线, 可看出避障过程中, 集群中互为邻居的无人机间距均能维持在理想距离5 m附近, 保证集群的基本形态, 邻机间最小间距为2.732 m, 大于机间最小安全距离2 m, 机间没有碰撞威胁。

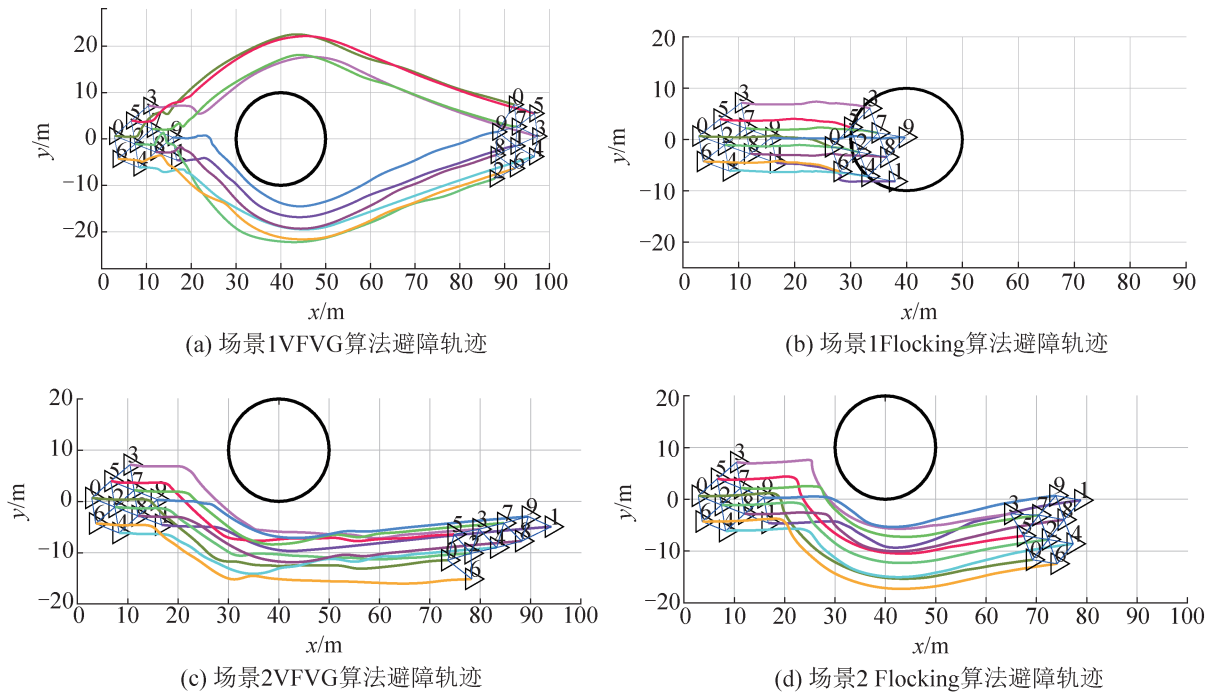


图9 VFVG算法与Flocking算法避障轨迹

Fig. 9 Obstacle avoidance trajectories by VFVG algorithm and Flocking algorithm

表3 避障耗时测试结果对比

Table 3 Comparison of obstacle avoidance time test results

障碍物坐标/m	算法	避障耗时/s
[40,0]	VFVG	13.8
	Flocking	避障失败
[40,-5]	VFVG	12.18
	Flocking	避障失败
[40,10]	VFVG	10.48
	Flocking	15.60
[40,-10]	VFVG	11.23
	Flocking	14.95

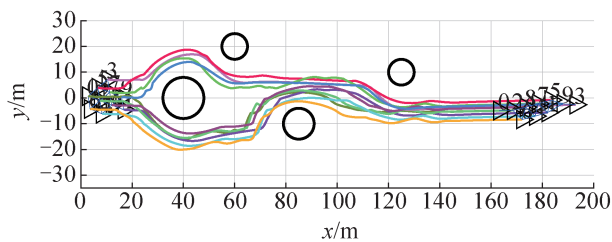


图10 复杂环境下避障轨迹

Fig. 10 Obstacle avoidance trajectories in complex environments

图12给出了无人机飞行途中速度变化曲线，速度变化均在 $[-5,5]$ m/s有限范围内，未超出无人机的承受能力之外。避障期间无人机分群速度变化趋势一致，避障完成之后速度逐渐收敛一致。如此，应用本文算法无人机集群可以实现连续避障，安全通过复杂障碍环境。

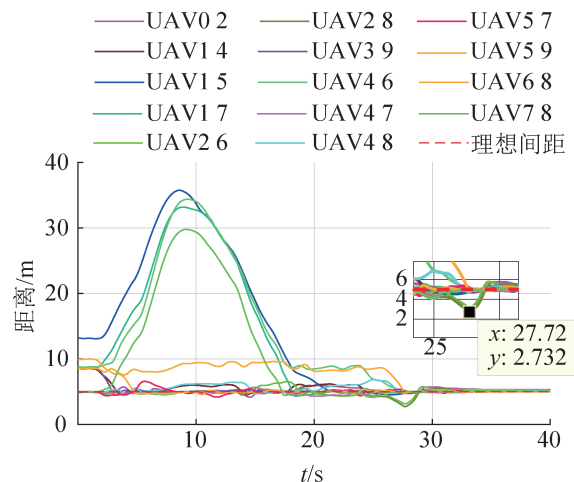


图11 集群邻机间距

Fig. 11 Distance between neighbors in a swarm

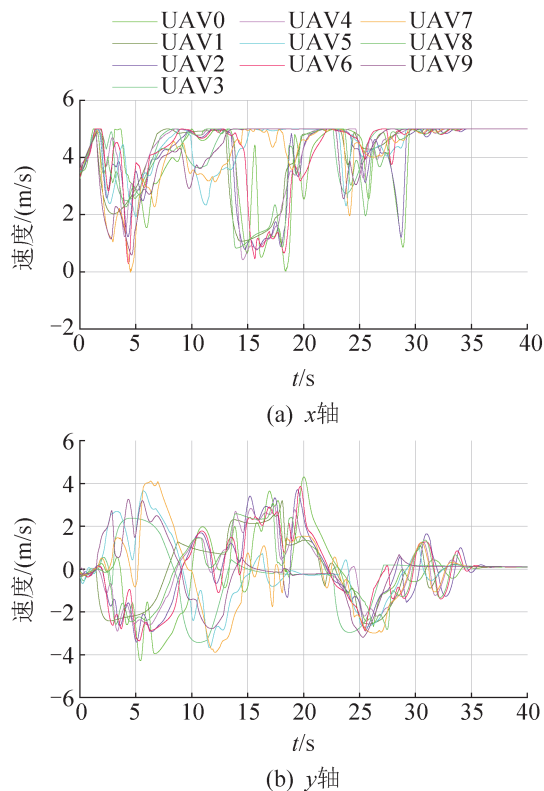


图12 无人机速度变化趋势
Fig. 12 UAV velocity trend

4 结论

本文主要通过构建极限环确定个体避障引导速度, 解决无人机遇障徘徊停滞问题。采用视野法动态切换集群中无人机间的通讯交互拓扑, 使得无人机迅速采取机动措施实现避障。通过仿真实验得出, 本文算法使得集群解除遇障时的徘徊停滞状态, 迅速平稳地通过障碍区域。接下来的工作还需要对算法中的控制权重系数进行优化, 提高系统在复杂障碍物环境中的适应性, 以及在实物中进行验证。

参考文献:

- [1] 向锦武, 董希旺, 丁文锐, 等. 复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 325-357.
Xiang Jinwu, Dong Xiwang, Ding Wenrui, et al. Key Technologies for Autonomous Cooperation of Unmanned Swarm Systems in Complex Environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10):

- 325-357.
[2] 魏瑞轩, 王树磊. 先进无人机系统制导与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 153-155.
[3] 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 Zhengping, Xian Bin. Robust Distributed Formation Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles Based on Virtual Structure[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(11): 2423-2431.
[4] 费思远, 鲜斌, 王岭. 基于群集行为的分布式多无人机编队动态避障控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(1): 1-11.
Fei Siyuan, Xian Bin, Wang Ling. Distributed Formation Control for Multiple Unmanned Aerial Vehicles with Dynamic Obstacle Avoidance Based on the Flocking Behavior[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(1): 1-11.
[5] 张栋, 马苏慧, 吕石, 等. 多智能体系统事件触发一致性研究综述[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(10): 1059-1072.
Zhang Dong, Ma Suhui, Lü Shi, et al. Overview on Event-Triggered Consensus of Multi-agent Systems[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(10): 1059-1072.
[6] Reynolds C W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
[7] Olfati-Saber R. Flocking for Multi-agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
[8] Daito Sakai, Hiroaki Fukushima, Fumitoshi Matsuno. Flocking for Multirobots Without Distinguishing Robots and Obstacles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(3): 1019-1027.
[9] Li Jiaojie, Zhang Wei, Su Housheng, et al. Flocking of Partially-informed Multi-agent Systems Avoiding Obstacles with Arbitrary Shape[J]. Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 2015, 29(5): 943-972.
[10] 杨盼盼, 刘明雍, 雷小康, 等. 群集系统分群行为建模与控制研究进展[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 193-206.
Yang Panpan, Liu Mingyong, Lei Xiaokang, et al. Progress in Modeling and Control of Fission Behavior for Flocking System[J]. Control and Decision, 2016, 31(2): 193-206.
[11] Zhao Weiwei, Chu Hairong, Zhang Mingyue, et al. Flocking Control of Fixed-wing UAVs with Cooperative Obstacle Avoidance Capability[J]. IEEE Access, 2019, 7: 17798-17808.

- [12] 王曼, 李大鹏, 丁良辉, 等. 基于虚拟子目标联合边界力的编队避障算法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(9): 1918-1930.
Wang Man, Li Dapeng, Ding Lianghai, et al. Formation Obstacle Avoidance Algorithm Based on Joint Virtual Sub-target and Boundary Force[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(9): 1918-1930.
- [13] Nabil M Hewahi, Abed Alkader A Almobayed. Swarm Robotics with Circular Formation Motion Including Obstacles Avoidance[J]. Brain Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience, 2017, 8(2): 125-143.
- [14] Wang Xun, Wang Xiangke, Zhang Daibing, et al. A Liquid Sphere-inspired Physicomimetics Approach for Multiagent Formation Control[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(15): 4565-4583.
- [15] Zhang Haitao, Chen Zhiyong, Vicsek T, et al. Route-Dependent Switch Between Hierarchical and Egalitarian Strategies in Pigeon Flocks[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 5805.
- [16] 王庆禄, 吴冯国, 郑成辰, 等. 基于优化人工势场法的无人机航迹规划[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(5): 1461-1468.
Wang Qinglu, Wu Fengguo, Zheng Chengchen, et al. UAV Path Planning Based on Optimized Artificial Potential Field Method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(5): 1461-1468.
- [17] Dong Han Kim, Jong Hwan Kim. A Real-time Limit-cycle Navigation Method for Fast Mobile Robots and Its Application to Robot Soccer[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 42(1): 17-30.