

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.020

基于向心力启发的多层次无人机编队避障

蔡莹盈, 王 伟, 王长城, 樊 鹏

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司系统总体部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对传统人工势场方法(traditional artificial potential field, tAPF)极易出现局部极小值而导致编队目标不可达和避障轨迹出现大幅震荡的问题, 提出基于向心力启发的多层次无人机编队避障方法。将障碍物的影响范围分为普通避障区和强制避障区, 无人机实时分析所处区域, 并按对应区域调整避障算法, 实现编队整体灵活避障。仿真试验结果表明, 该避障策略具有安全性和可行性, 为多无人机编队避障提供了一种思路。

关键词: 编队避障; 向心力; 人工势场; 主从式

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Centripetal-force Inspired Obstacle Avoidance for Multi-level UAV Formation

Cai Yingying, Wang Wei, Wang Changcheng, Fan Peng

(System General Department, Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional artificial potential field (tAPF) method is prone to local minima, which leads to the unreachable formation target and the large oscillation of obstacle avoidance trajectory, a multi-level UAV formation obstacle avoidance method based on centripetal force heuristic is proposed. The influence range of obstacles is divided into ordinary obstacle avoidance area and compulsory obstacle avoidance area, and the UAV analyzes the area in real time, and adjusts the obstacle avoidance algorithm according to the corresponding area to realize the overall flexible obstacle avoidance of the formation. The simulation results show that the obstacle avoidance strategy is safe and feasible, which provides an idea for multi-UAV formation obstacle avoidance.

Keywords: formation obstacle avoidance; centripetal force; artificial potential field; master-slave mode

0 引言

因目标任务环境的复杂性和多变性, 单个无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)有限载荷能力(如续航时间、传感器等)会制约其执行任务的能力^[1], 而多无人机编队可以解决上述问题。多无人机编队有广泛的研究场景和重要的工程应用价值。

在无人机编队的各项应用中, 编队避障是需要解决的重难点问题。目前在防碰撞的问题上, 研究者提出了很多方法, 主要分为: 几何法^[2]、人工势场法(artificial potential field, APF)^[3]、基于优化的方法^[4]以及感知和躲避方法^[5] 4 类。考虑到机载计算机有限的处理能力, 需要建立空间信息模型且需要大量处理时间的防碰撞方法不易满足实时避障的要求。APF 对于计算方面的要求较低, 可以满足实时性和工程实践应用的需求, 因此笔者使用 APF 来处理无人机编队在实际飞行中编队避障的问题。

APF 由 Khatib^[6]首次提出, 这种方法将运动空

间抽象成势场空间, 无人机在空间内同时受到引力和斥力的影响。APF 将斥力和引力反映在所处环境相应的虚拟势场值当中, 由势场值的大小来决定无人机的运动方向和速度。虽然 APF 运算量小、实时性强、高效且易于实施, 但是传统人工势场方法(tAPF)存在一些局限性, 比如陷入局部极小、出现不可达点等。为了解决上述问题, 国内外学者对其进行改进。Wu 等^[7]基于领导者跟随法, 利用事件触发和 APF 实现了低通讯负担下的编队避障。袁佳乐等^[8]提出了一种改进人工势场的无人机通用避障机动算法, 利用障碍机动角设计斥力系数并加入速度控制改进了 tAPF。林立雄等^[9]结合激光雷达数据, 重新构造人工势场模型, 并设立了斥力矢量, 构造斥力因子和切换函数对障碍物的威胁程度进行评估, 实现了动态实时避障。

tAPF 在避障过程中, 飞行轨迹存在大幅震荡和狭小地形中极易陷入局部极小值的情况, 并且在编队以较快速度飞行过程中, 基于传统的向心力启发

的编队避障存在与障碍物的距离过小甚至出现撞上障碍物的情况, 因此, 笔者基于主从式控制策略, 提出基于向心力的多层次无人机编队避障方法, 并通过仿真验证其有效性和安全性。

1 无人机避障策略

1.1 传统人工势场法

tAPF 定义是基于物理学中的势能场演变而来, 无人机在整个环境内受到目标位置的引力势场作用以及障碍物对其的斥力势场作用, 而后无人机将在所受势场产生的合力作用下向目标位置移动, 其原理如图 1 所示。

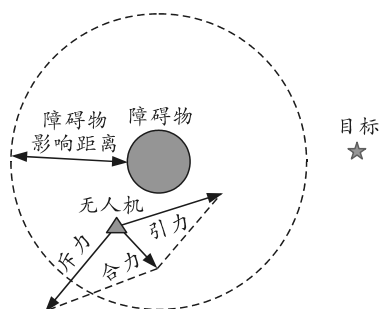


图 1 传统人工势场受力

当无人机航迹附近有规律排布的障碍物时, 极易因所受的合力势场作用变为 0 而陷入局部极小点, 造成停滞飞行的情况; 无人机在即将抵达目标位置时, 若目标附近存在一定的障碍物布置, 则此时的无人机所受斥力势场极有可能大于引力势场, 造成不能到达目标位置的可能。

1.2 基于向心力启发的多层次人工势场法

受到万有引力和天体运动的启发, 天体引力方向和自身速度方向垂直, 做圆周运动, 由此, 提出了基于向心力的多层次人工势场法。该算法将障碍物的避障范围分为普通避障区和强制避障区, 普通避障区内, 当无人机靠近障碍物到限定距离时, 无人机受到合力 F_{rep} , 改变合力方向与速度方向垂直, 假设第 i 无人机质心坐标向量为 $\mathbf{a}_i (i=1, 2, \dots, m)$, 假设障碍物是个圆柱体, 第 i 个障碍物圆心坐标向量为 $\mathbf{b}_i (i=1, 2, \dots, l)$, 第 i 个目标坐标向量为 $\mathbf{g}_i (i=1, 2, \dots, k)$, 设无人机到障碍物的向量 $\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i$ 和无人机到目标点的向量 $\mathbf{a}_i - \mathbf{g}_i$ 之间的角度为 $\theta_i (\theta_i \in (0, \pi))$, 同时, 在飞行过程中, 领航者会判断目标集合中的每个点是否在障碍物内部, 如果在障碍物内部和强制避障区, 则会从目标集中删去此目标点。普通避障区的人工势场函数如式(1)~(7)所示:

$$F_{rep1} = \begin{cases} \frac{-2 * d_1^2 * (\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{b}}_i) * d_3^{2n}}{(d_2 - r)^2} = (f_x, f_y, f_z), & d_2 - r < d_{obs} \\ 0, & d_2 - r \geq d_{obs} \end{cases}; \quad (1)$$

$$d_1 = k (k \in R); \quad (2)$$

$$d_2 = \|\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{b}}_i\|; \quad (3)$$

$$d_3 = \|\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{g}}_i\|. \quad (4)$$

式中: r 为障碍物半径; d_1 为缓冲距离; d_2 为无人机距障碍物同高度圆心的距离; d_3 是无人机距自身期望位置的距离。领航者的期望位置是目标坐标集, 而跟随者的期望位置是领航者的期望位置加上期望队形中相对于领航者的坐标, d_{obs_force} 为强制避障区的影响范围, d_{obs} 为避障斥力影响范围, n 为幂指数; F_{rep} 为人工势场函数的合力方向, 五角星代表无人机当前位置, 虚线为无人机运动轨迹, 当无人机进入普通避障区, 人工势场合力方向与速度方向垂直。如图 2 所示, 当无人机进入普通避障区, 人工势场合力方向与速度方向垂直。

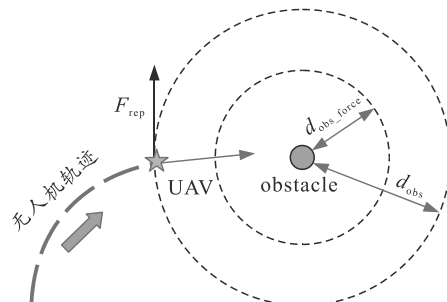


图 2 普通避障区无人机避障受力

对于 XOY 面当中, 当 $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 时, 无人机顺时针旋转; 当 $\theta_i \in (\pi/2, \pi)$ 时, 无人机逆时针旋转:

$$F_{rep2} = \begin{cases} (f_y, -f_x, f_z), & \theta_i \in (0, \pi/2) \\ (-f_y, f_x, f_z), & \theta_i \in (\pi/2, \pi) \end{cases}. \quad (5)$$

判断无人机旋转方向的表达式:

$$\left. \begin{aligned} (\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{b}}_i) \cdot (\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{g}}_i) &> 0, & \theta_i &\in (0, \pi/2) \\ (\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{b}}_i) \cdot (\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{g}}_i) &\leq 0, & \theta_i &\in (\pi/2, \pi) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

无人机在普通避障区势场函数值如下式:

$$F_{rep_normal} = F_{rep2} (K > 0). \quad (7)$$

当无人机飞行到强制避障区内, 无人机受到合力 F_{rep_normal} , K 是增益系数, 强制远离障碍物, 避免与障碍物相撞, 势场函数如式(8)~(11):

$$F_{rep1} = 2d_1^2 \cdot (\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{b}}_i) \cdot d_3^{2n} / (d_2 - r)^2, \quad d_2 - r < d_{obs}; \quad (8)$$

$$F_{rep2} = \frac{2n \cdot (\bar{\mathbf{g}}_i - \bar{\mathbf{a}}_i)}{\|\bar{\mathbf{a}}_i - \bar{\mathbf{g}}_i\|^{2-2n}} \cdot \frac{2d_1^2}{d_2 - r}, \quad d_2 - r < d_{obs_force}; \quad (9)$$

$$d_{\text{obs_force}} < d_{\text{obs}}; \quad (10)$$

$$F_{\text{rep_force}} = F_{\text{rep1}} + F_{\text{rep2}}. \quad (11)$$

在强制避障区内, 避障合力由 F_{rep1} 和 F_{rep2} 相加构成, 该合力使无人机强制避开障碍物, 避免与障碍物相撞。如图 3 所示, 当无人机进入强制避障区, 人工势场合力方向由 F_{rep1} 和 F_{rep2} 决定, 使无人机强制远离障碍物。

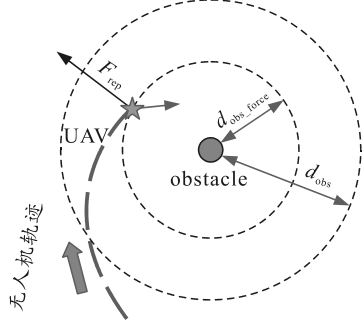


图 3 强制避障区无人机避障受力

式(7)和(11)仅仅针对无人机 i 对障碍 j 产生的防碰撞斥力, 追随者无人机 i 所受到的斥力为无人机所有障碍物产生斥力的矢量和, 其表达式为:

$$F_{\text{rep_sum}} = \begin{cases} \sum_{j=1}^l F_{\text{rep}}(\vec{a}_i, \vec{b}_j), & d_2 - r \leq d_{\text{obs}} \\ 0, & d_2 - r > d_{\text{obs}} \end{cases}. \quad (12)$$

在初步得到斥力后, 无人机将自适应调整系数 $K_{\text{self_adapt}}$, 自适应调整系数的规则如下, 将地图现有的障碍物标志位 flag_{obs} 为 1, d 是一个常量, 将所有标志位相加得到 sum_{flag} , 设置 $K_{\text{self_adapt}}$ 的变化范 ($K_{\text{min-leader}}$, $K_{\text{max-leader}}$) 和 ($K_{\text{min-follower}}$, $K_{\text{max-follower}}$), 算法开始将令 $K_{\text{self_adapt}} = K_{\text{min}}$ ($K_{\text{min}} = K_{\text{min-leader}}$, or $K_{\text{min}} = K_{\text{min-follower}}$), 则自适应系数规则如下所示变化:

$$\text{predict}_{\text{sum1}} = (\vec{g}_i - \vec{a}_i) + \frac{K_{\text{min}} F_{\text{rep_sum}}}{\text{norm}(F_{\text{rep_sum}})}; \quad (13)$$

$$\text{predict}_{\text{sum2}} = \text{predict}_{\text{sum1}} / \text{norm}(\text{predict}_{\text{sum1}}); \quad (14)$$

$$\text{predict}_{\text{sum}} = (vt + 0.5 \cdot vt^2) \cdot \text{predict}_{\text{sum2}}; \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{flag}_{\text{obs_leader}} &= 0, & \text{predict}_{\text{sum}} \\ \text{flag}_{\text{obs_follower}} &= 0, & \text{predict}_{\text{sum}} > r + 0.5d \\ \text{flag}_{\text{obs}} &= 1, & \text{else} \end{aligned} \right\}; \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{self_adapt}} &= k_{\text{min}} + \Delta, & \text{sum}_{\text{flag}} \neq 0 \text{ and } K_{\text{self_adapt}} \neq K_{\text{max}} \\ K_{\text{final}} &= K_{\text{self_adapt}}, & \text{sum}_{\text{flag}} = 0 \text{ or } K_{\text{self_adapt}} = K_{\text{max}} \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

按照式(13)–(17)的顺序对 $K_{\text{self_adapt}}$ 进行调整, 式(17)是判断条件, 当 $K_{\text{self_adapt}}$ 满足式(17)第一行时, 则跳转到式(13)重复这个过程, 直到满足式(17)最后一行的条件跳出循环。

将 $K_{\text{self_adapt}}$ 和 $F_{\text{rep_sum}}$ 相乘得到最终的人工势场函数值, 如下式:

$$F_{\text{rep}} = K_{\text{self_adapt}} \cdot F_{\text{rep_sum}} (K > 0). \quad (18)$$

在主从结构的无人机编队中, 只可能让领航者的避障轨迹尽可能圆滑, 从而减小对编队飞行的影响。在实验中, 有意将障碍物设置在领航者的期望轨迹中, 从而展示算法设计的有效性, 以应对复杂的任务环境。

2 仿真结果与分析

为了验证上述编队个体避障算法的有效性, 笔者在 Ubuntu20.04 环境下基于 C++ 编程语言设计不同障碍物场景, 并对该算法进行仿真验证, 通过可视化仿真平台 (robot visualization, RVIZ) 直观展示编队避障轨迹, 记录各个无人机位置, 展示和具体分析编队整体轨迹。本实验具体的软硬件开发环境如表 1 所示。

表 1 软硬件开发环境

名称	信息
处理器/GHz	AMD Ryzen 7 6800H with Radeon Graphics 3.20
内存/GB	16.0
编程语言	C++, Matlab
操作系统	Ubuntu20.04, Windows10

算法将每个编队成员视为一个对象, 将控制函数、避障函数等集成在这个对象中, 通过 ros 的协议实现了编队一体化通信, 使 launch 同一个功能包下不同编号的编队对象可以相互通信并按照已经规划好的位置目标集飞行。

为了模拟接收的规划路径, 生成目标结点集 goal, 为了验证本文中避障算法的可行性和可靠性, 将障碍物设置在目标集的附近或者障碍物就在目标结点附近。仿真各个参数具体含义和数值如表 2 所示。在 RVIZ 中, 编队无人机简化为小正方形, 小正方形的长宽高都为 1 m, 障碍物模型设置为半透明的圆柱, 障碍物位置如表 3 和 4 所示, 各个无人机位置与 RVIZ 小正方形的位置实时对应。

2.1 仿真实验 1

障碍物位置如表 3 所示, 其中的障碍物分布有如下特点: 目标集中都是编队可达点, 存在 2 个距离较近的障碍物, 障碍物在跟随者飞行轨迹上。编队初始位置为 $z=0$ 的 XOY 平面内的随机点 (地面随机位置), 首先飞行到离地面 5 m 的高空处, 再按照起点为 (0, 0, 5) 和终点为 (50, 50, 5) 飞行一个半圆, 编队队形为三角形 (表 5), 然后变换队形为矩

形(表 6),直至飞行到最后目标集中最后一个点(-50, 30, 10)。无人机通过同一个话题接收领航者和其他无人机的实时位置,同时也会广播自身的实时位置。因为所有无人机用的是同一个话题,所以也会收到自身发出的数据,但对自身数据不做处理。从图 4—5 中的飞行轨迹和 RVIZ 编队避障实时位置可以看出:本文中的避障策略能够通过较为狭小的飞行区域,且避障轨迹较为平滑,达到期望的避障效果。

表 2 编队整体避障仿真实验相关参数

参数名称	具体数值
最大偏航角 yaw/rad	1.57
最大俯仰角 pitch/rad	1.57
最小速度 $V_{\min}/(\text{m/s})$	1.00
领航者飞行基本速度 $V_{\text{leader}}/(\text{m/s})$	8.00
队形矩阵 F	$F_n \times 3$
障碍物与无人机安全距离 d_{safe}/m	0.50
无人机间安全距离 d_{safe}/m	0.50
相对位置基本距离/m	5.00
时间间隔 $\Delta T/\text{ms}$	100.00

表 3 障碍物基本信息 1

障碍物	位置/m	半径/m	高度/m
1	(12, 12, 0)	2	10
2	(36, 11, 0)	2	10
3	(21, 38, 0)	2	10
4	(16, 32, 0)	2	10

表 4 障碍物基本信息 2

障碍物	位置/m	半径/m	高度/m
1	(8, 30, 0)	2	10
2	(10, 40, 0)	2	10
3	(3, 52, 0)	2	10
4	(9, 31, 0)	2	10

表 5 编队队形保持矩阵 F_1 (相对领航者)三角形

跟随者	相对位置	跟随者	相对位置
1	(-1, -1, 0)	5	(2*1, -2*1, 0)
2	(1, -1, 0)	6	(-3*1, -3*1, 0)
3	(-2*1, -2*1, 0)	7	(0, -3*1, 0)
4	(0, -2*1, 0)	8	(3*1, -3*1, 0)

表 6 编队队形保持矩阵 F_2 (相对领航者)矩形

跟随者	相对位置	跟随者	相对位置
1	(-1, -1, 0)	5	(2*1, -2*1, 0)
2	(1, -1, 0)	6	(-2*1, 2*1, 0)
3	(-2*1, -2*1, 0)	7	(0, 2*1, 0)
4	(0, -2*1, 0)	8	(2*1, 2*1, 0)

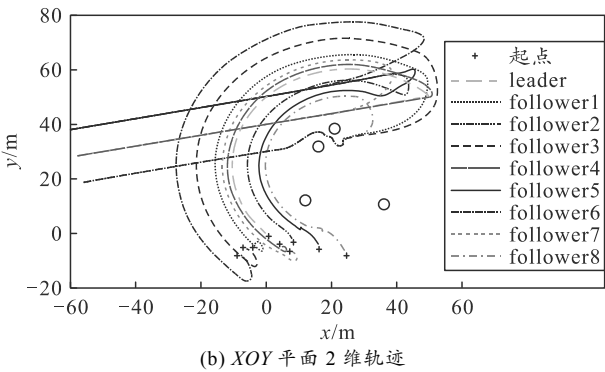
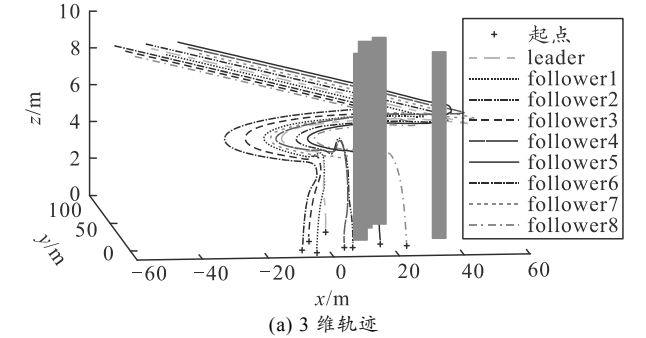


图 4 无人机基于向心力启发的多层次编队避障轨迹

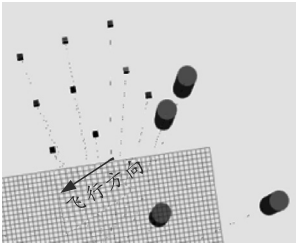
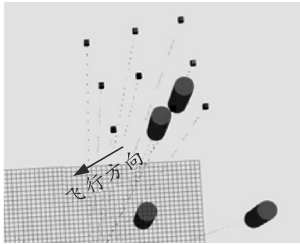
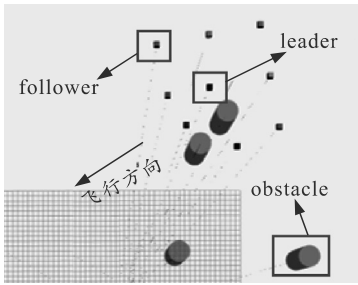


图 5 无人机避障实时位置(RVIZ)

2.2 仿真实验 2

障碍物位置如表 4 所示, 其中的障碍物分布有如下特点: 目标集中出现了编队不可达的点, 障碍物分布较为紧凑。仿真实验条件(编队飞行目标点集、编队初始位置、编队成员个数、编队队形保持、编队队形变换、障碍物数量和编队通信拓扑)与仿真实验 1 相同。各个无人机飞行轨迹和 RVIZ 中各个无人机实时位置如图 6—7 所示。

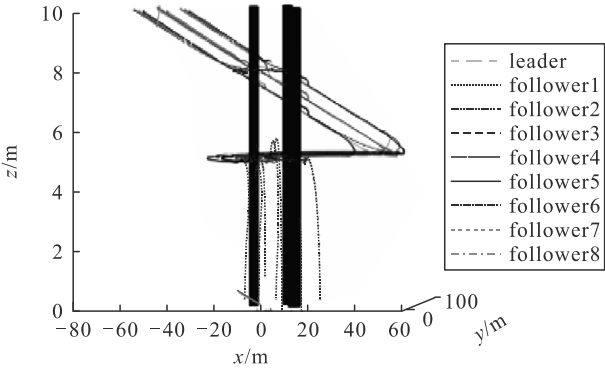


图 6 无人机基于向心力启发的多层次编队避障轨迹

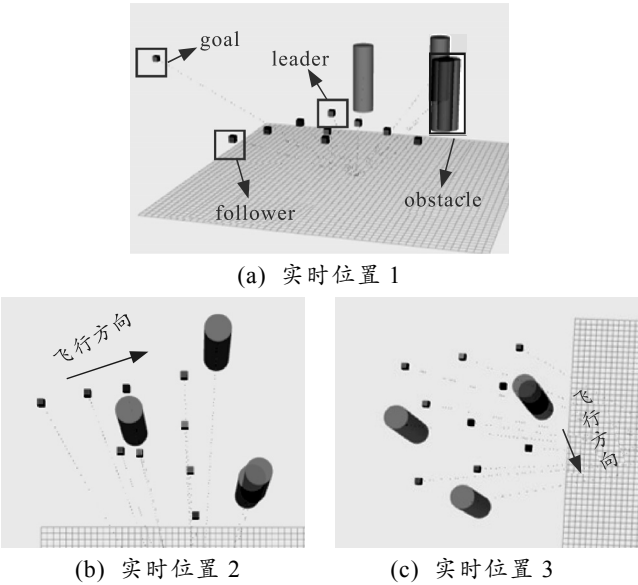


图 7 无人机避障实时位置 (RVIZ)

从图 6—7 中可以看出：编队成功按照目标点集飞行并避开障碍物，领航无人机圆滑的绕行障碍物，相对于传统的人工势场算法的避障轨迹，避障轨迹更加圆滑，且领航无人机没有出现陷入死循环的情况。为了分析和验证算法的避障情况，将障碍物与编队个体之间的最小距离记录在表 7 中，编队成员间最短距离如表 8 所示。从表中数据可得：各个障碍物与各个无人机之间保持了安全距离，并且在领航者在相对较快的速度下，如果距离障碍物过近，不会出现碰撞障碍物的情况，说明在规划的目标集中出现障碍物的情况下，该算法能够使整个编队成功避开障碍物飞行，完成期望的避障目标。

表 7 静态障碍物与编队个体之间的最小距离

无人机	最小距离/m	无人机	最小距离/m
0	0.508 169	5	0.571 180
1	0.563 380	6	0.571 180
2	0.571 180	7	0.571 180
3	0.571 180	8	0.571 180
4	0.571 180		

表 8 编队成员间最短距离

编队成员	最短距离/m	编队成员	最短距离/m
2	1.885 86	6	1.796 34
3	0.942 03	7	1.487 75
4	1.411 57	8	1.423 84
5	0.942 03	9	2.706 17

3 结束语

本文中的避障算法能够有效减小避障过程中轨

迹的震荡，保障编队避障过程中无人机始终与障碍物保持安全距离，使编队有效穿过狭小地形，在规划的目标集中出现编队不可达的目标点时，编队迅速剔除不可达点，领航无人机能够平滑的绕过障碍物，且编队成员与障碍物始终保持了安全距离。实验结果表明：该算法能使编队有效绕行障碍物，并达到了期望的避障效果。

虽然笔者提出的避障算法已经具备较好的避障效果，但是为了进一步体现编队避障的智能性和灵活性，可以加入感知动态障碍物等做进一步研究。

参考文献：

[1] 陈博琛, 唐文兵, 黄鸿云, 等. 基于改进人工势场的未知障碍物无人机编队避障[J]. 计算机科学, 2022, 49(201): 686-693.

[2] SEO J, KIM Y, KIM S, et al. Collision Avoidance Strategies for Unmanned Aerial Vehicles in Formation Flight[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2718-2734.

[3] 陈骏岭, 秦小麟, 李星罗, 等. 基于人工势场法的多机器人协同避障[J]. 计算机科学, 2020, 47(11): 220-225.

[4] BISWAS S, ANAVATTI S G, GARRATT M A. A Particle Swarm Optimization Based Path Planning Method for Autonomous Systems in Unknown Terrain[C]//2019 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT). Indonesia: Bali, 2019: 57-63.

[5] YANG Y, WANG T T, CHEN L, et al. Stereo vision based obstacle avoidance strategy for quadcopter UAV. [C]//2018 Chinese Control And Decision Conference(CCDC). China: Shenyang, 2018: 491-495.

[6] KHATIB O. An 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.

[7] WU T, WANG J, TIAN B. Periodic event-triggered formation control for multi-UAV systems with collision avoidance[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(8): 193-203.

[8] 袁佳乐, 刘蓉, 王闯. 改进人工势场的无人机避障机动策略[J]. 电光与控制, 2022, 29(7): 74-80.

[9] 林立雄, 何洪钦, 何炳蔚, 等. 基于改进人工势场模型的无人机局部避障方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 86-91.