

多植保无人机返航规划研究

杨 雯¹ 杨盛毅^{2*} 吴 亮¹ 尚建华¹

YANG Wen YANG Shengyi WU Liang SHANG Jianhua

摘 要

在山地环境下,为提高植保无人机工作效率,减少总作业时间,文章提出了一种基于改进部落竞争与成员合作优化算法(competition of tribes and cooperation of members algorithm, CTCM)的多植保无人机作业返航规划算法。先根据总作业区域的大小划分各架无人机各自的作业区域,利用栅格法生成各无人机的覆盖路径。以所有植保无人机总作业时间最小为目标函数,以各无人机各架次的飞行距离为寻优变量,考虑药量约束、电量约束,以及只有一个补给点的情况下其他无人机等待耗时,通过改进部落竞争与成员合作优化算法,实现了对各无人机返航点位置的寻优。

关键词

返航点;植保无人机;多机约束;部落竞争与成员合作

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.003

0 引言

随着科技的进步和农业现代化政策的推进,无人机技术广泛应用于军事、交通监控、救援等领域,并且在农业领域表现出了极大的潜力,植保无人机不仅能够有效降低农业生产成本,提高作业效率,还能在精准施药、减少农药使用等方面作出贡献^[1]。

多机研究在覆盖路径规划任务中具有极大的优势,由于整体工作量被分配,使用多个无人机可以明显减少完成任务的时间,Conesa等^[2-3]提出特性不同且作业容量有限条件下的多个农机的路线规划问题,为每辆作业农机分配了作业路径,并使用模拟退火优化算法求解。Deng等^[4]提出一种区域划分方法,针对大面积区域的多无人机协同作业问题,采用偏置路径进行覆盖作业。阚平等^[5]先确定作业路径,按照等面积作业划分区域,以各无人机作业距离作为优化变量,采用改进粒子群算法求得无人机返航顺序和返航点位置。Liu等^[6]改变编队策略实现并行搜索扫描覆盖。Zhao等^[7]研究了多障碍物区域无人机编队的最优飞行路径选择问题,设计了带领者和跟随者的协商一致算法。

在实际应用中,由于无人机的药剂箱容量和电池电量的限制,单次作业难以完成较大面积的植保任务,因此无人机需要多次返航补给,如何合理规划返航点以最大限度提高作业效率,减少能量浪费和时间消耗,徐博等^[8]以工作总耗能最小为目标,通过合理分配各架次无人机的喷药量和返航点,实现了田地的全覆盖路径规划与返航点位置的寻优。王宇等^[9]

提出了基于Grid-GSA算法的路径规划方法,针对不规则边界的田地规划出合理的返航点,以非植保作业耗时最短为目标函数,实现了对返航点数量与位置的寻优。

但以上研究均是针对单个无人机或是在平地环境进行的,而我国山地种植的总面积大,种植作物种类多,因此在山地环境下,对多无人机覆盖路径规划研究也显得尤为重要。本文基于改进的部落竞争与成员合作优化算法,提出了一种多植保无人机返航点规划研究方法,以提高植保作业的整体效率,减少总耗时。

1 模型建立

1.1 路径生成及区域划分

根据山地环境信息,采用栅格法将三维山地环境进行栅格化处理来建立环境模型,每个栅格边长为植保无人机作业幅宽,每个栅格包含栅格中心处的平面坐标和高度等信息,按照栅格法生成无人机的覆盖路径。平面栅格数为50×55,其中黑色区域为障碍物区域,按照等面积划分原则,根据作业栅格的数量按无人机的数量进行等量划分,以3机为例,如图1所示。

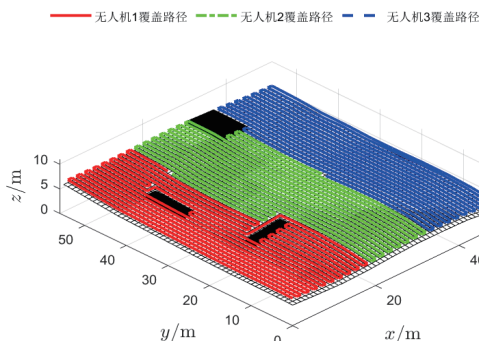


图1 各无人机覆盖路径

1. 贵州民族大学数据科学与信息工程学院 贵州贵阳 550000

2. 贵州民族大学物理与机电工程学院 贵州贵阳 550000

[基金项目] 贵州省数据科学与计算智能科技创新人才团队项目(黔科合人才 CXTD〔2025〕038)

1.2 问题提出

植保无人机返航补给包含药剂补充和电池更换,考虑成本问题,仅设置原点处第一个栅格位置的一个补给点,在同一时刻仅允许一架无人机进行补给,若同时有多架无人机返回补给点进行补给,先到补给点的无人机先进行补给,其余无人机在补给点等待。

根据生成的作业路径长度来安排架次数和返航点,返航点的选择要考虑尽可能少的返航次数,同时还要考虑返航过程的路径尽可能短。当各无人机在作业时携带的药剂消耗完时,无人机计划返航进行补给,此时为未规划情况。

由于各架无人机规格一样,未规划时会多次出现同时返回补给点补给的情况,这样会增加整个作业过程的等待耗时,降低作业效率,于是针对此种情况,采用改进部落竞争与成员合作优化算法(competition of tribes and cooperation of members algorithm, CTCM)来优化各架无人机各段飞行路径的长度,提高多机合作作业效率。

1.3 改进 CTCM 算法

部落竞争和成员合作优化算法(CTCM)是Chen等^[10]于2024年受古代部落之间竞争及其合作行为的启发,提出的一种智能优化算法,该算法描述了部落成员的合作及部落间竞争,提供了一种模拟原始人类社会资源分配与迁移的框架,其中每个个体都拥有自己的位置和一个速度矢量,根据这个速度矢量来决定个体下一步要去哪里。

成员之间的合作:部落成员的合作行为受酋长指示与个人经验影响,忠诚度波动呈现混乱特征,且随着部落数量增加,互动和波动性更加复杂,更新速度矩阵表示为:

$$V_{n,m,d}^{t+1} = \frac{3}{5} V_{n,m,d}^t + c_1 r_{1,n,m,d}^t (X_{n,m,d}^{\text{best}} - X_{n,m,d}^t) + c_2 r_{2,n,m,d}^t (X_{\text{tribe}}^{\text{best}} - X_{n,m,d}^t) \quad (1)$$

式中: $V_{n,m,d}^{t+1}$ 、 $V_{n,m,d}^t$ 表示 n 部落中 m 成员在 $t+1$ 、 t 时的速度; $3/5$ 表示惯性因子; $X_{n,m,d}^{\text{best}}$ 表示该成员在整个时期内找到的最佳适应度位置; $X_{n,m,d}^t$ 表示 t 时的位置; $X_{\text{tribe}}^{\text{best}}$ 表示该部落在整个时期内发现的最适合的位置; c_1 和 c_2 分别表示部落成员遵循自己的经验和服从酋长指示的参数; $r_{1,n,m,d}^t$ 和 $r_{2,n,m,d}^t$ 表示每个个体成员的混乱忠诚程度的参数。

部落之间的竞争:部落竞争由资源争夺引发,较弱部落在撤退过程中表现出混乱和不可预测性,且随着部落数量增加,撤退行为和位置更新变得更加复杂,随机选择对手并更新速度表示为:

$$R_{n,m,d}^t = c_3 r_{3,n,m,d}^t (X_{n,m,d}^t - X_{\text{rival}}^{\text{best}}) \quad (2)$$

$$V_{n,m,d}^{t+1} = \begin{cases} V_{n,m,d}^{t+1} - R_{n,m,d}^t & \text{if } F_n^{\text{best}} < F_{\text{rival}}^{\text{best}} \\ V_{n,m,d}^t & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$X_{n,m,d}^{t+1} = X_{n,m,d}^t + V_{n,m,d}^{t+1} \quad (4)$$

$$V_{n,m,d}^{t+1} = -V_{n,m,d}^{t+1} \quad (5)$$

式中: $X_{\text{rival}}^{\text{best}}$ 表示竞争对手找到的最佳位置; F_n^{best} 表示 n 部落的最佳适合度; $F_{\text{rival}}^{\text{best}}$ 表示竞争对手的最佳适合度; c_3 表示部落逃跑系数; $r_{3,n,m,d}^t$ 表示反映撤退速度的混乱随机因子; $X_{n,m,d}^{t+1}$ 表示更新后的部落成员位置,超过可行域范围 $[X_{\min}, X_{\max}]$, 将发生镜像,速度被反转,同时位置信息被更正。

在合作阶段,为了增强收敛速度,通过改变 c_1 和 c_2 的权重,使得个体对最佳位置的探索更积极,引入自适应惯性权重来更好地调整搜索的速度。在前期,加入扰动机制来增强探索能力,让个体在搜索空间中进行较大范围的活动,这有助于避免算法陷入局部最优解,防止收敛过早;在后期,引入全局最优的影响,为全局最优解提供一个参考方向,个体可以通过朝着全局最优的位置更新,避免在局部区域内无效的搜索,将速度矩阵更新改为:

$$w = 0.9 - 0.5(i / \text{Max}_i) \quad (6)$$

$$V_{n,m,d}^{t+1} = w V_{n,m,d}^t + c_1 r_{1,n,m,d}^t (X_{n,m,d}^{\text{best}} - X_{n,m,d}^t) + c_2 r_{2,n,m,d}^t (X_{\text{tribe}}^{\text{best}} - X_{n,m,d}^t) + c_3 r_{3,n,m,d}^t (\text{rand}(1, \text{dim}) - 0.5) \quad (7)$$

$$V_{n,m,d}^{t+1} = w V_{n,m,d}^t + c_1 r_{1,n,m,d}^t (X_{n,m,d}^{\text{best}} - X_{n,m,d}^t) + c_2 r_{2,n,m,d}^t (X_{\text{tribe}}^{\text{best}} - X_{n,m,d}^t) + c_3 r_{3,n,m,d}^t (X_{\text{global}}^{\text{best}} - X_{n,m,d}^t) \quad (8)$$

式中: w 为权重; i 为当前迭代次数; Max_i 为最大迭代次数; $\text{rand}(1, \text{dim})$ 为一个随机数,范围在 $[1, \text{dim}]$ 之间; $X_{\text{global}}^{\text{best}}$ 为所有部落所有个人在整个时期内发现的最适合的位置,其余参数与合作阶段参数一致。

随着迭代的进行,惯性权重逐渐减小,这让粒子在初期阶段进行更广泛的探索,避免过早收敛到局部最优解,而在后期阶段通过减小惯性权重,使得粒子的速度减缓,让粒子更精确地收敛到全局最优解或局部最优解附近,避免过大的跳跃导致错失最优解。

同时,通过随机变动个体的位置进行变异操作,每隔10代执行一次变异,每次执行变异时,以10%的概率对当前个体进行变异,在主循环中增加用公式表示为:

$$X_{n,m,d}^t = X_{n,m,d}^t + 0.1 \text{randn}(1, \text{dim}) \quad (9)$$

$$X_{n,m,d}^t = \max(X_{n,m,d}^t, l_b) \quad (10)$$

$$X_{n,m,d}^t = \min(X_{n,m,d}^t, u_b) \quad (11)$$

式中: $\text{randn}(1, \text{dim})$ 生成一个1行 dim 列的标准正态分布随

机数, $\dim$ 是解向量的维度, 与返航路径段数有关, 通过乘以 0.1 调整扰动的强度, 并且进行位置限制避免超出搜索区域, 搜索范围为 (l_b, u_b) , l_b 是范围的下界, u_b 是范围的上界。

1.4 建立多机寻优模型

本文寻优模型以各架无人机每次植保作业的飞行长度作为寻优变量, 用 k 架植保无人机进行协同作业, 用改进 CTCM 优化算法对变量进行寻优, 表示为:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_k \end{bmatrix}, S_i = [x_1, x_2, \dots, x_n], i = 1, 2, \dots, k \quad (12)$$

每架无人机完成 n 段路径, x 表示每段路径长度, 每段路径长度终点处栅格中心位置为返航点位置栅格。在多无人机协同大规模植保作业中, 各无人机多次返回补给点进行药剂补充和电池更换, 会产生返航补给时间消耗, 并且在补给点仅有一个同时有多架无人机需要补给的情况下, 一架无人机进行补给, 其余无人机会产生等待时间消耗。基于上述原因, 建立目标函数为:

$$\min T = \max(T_1, T_2, \dots, T_k) \quad (13)$$

$$T_i = \frac{S_i}{v_z} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{D_j}{v_f} + \sum_{j=1}^{n-1} \max(T_c, T_b) + \sum_{j=1}^{n-1} T_w \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, k$$

式中: T_i 为第 i 架无人机完成该无人机覆盖区域的总时间; S_i 为第 i 架无人机完成该机植保作业的路径长度; D_j 为每次返航的长度; v_z 和 v_f 分别为无人机植保的速度和非植保返航的速度; T_c 、 T_b 、 T_w 分别为换电池时间、药剂补充时间、无人机补给时多余的等待时间。

2 实验与结果分析

设置植保无人机农药容器容量 10 000 mL, 电池容量为 18 000 mAh, 有效喷幅 5 m, 栅格边长为 5 m, 植保作业状态下的飞行速度为 4 m/s, 非植保作业状态下的飞行速度为 6 m/s, 电池更换时间为 120 s, 植保无人机电池容量可支持的续航时间为 25 min, 单次药剂使用时间小于电量使用时间, 在补充药剂时更换无人机电池, 载药量所允许的单架次无人机最大植保作业距离根据药量使用情况计算。

采用 3 架无人机进行作业, 与未规划返航情况进行对比, 设置植保无人机的作业区域为 50×55 的栅格, 高度在 10 个栅格内, 划分各自需要完成的作业区域, 同时开始进行覆盖任务, 实验结果如图 2 所示。

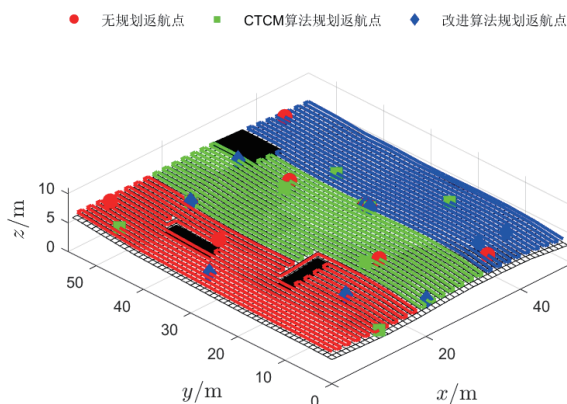


图 2 各无人机返航点

优化后 3 架无人机植保各段作业距离为 S_i :

$$S_i = \begin{bmatrix} 1249.26 & 1919.95 & 1277.77 \\ 768.02 & 1767.39 & 1914.51 \\ 1882.49 & 1802.19 & 767.02 \end{bmatrix} \quad (15)$$

具体参数如表 1 所示, 各无人机完成各自区域所有作业后最后返回补给点时的药剂补充时间、补给等待耗时不计入。

表 1 规划区域规划结果数据

无人机	参数	未规划	CTCM 算法	改进算法
1	返航点数量	3	3	3
	返航总长度 /m	1 167.96	539.45	499.79
	药剂补充总时间 /s	599.36	397.31	495.17
	等待总耗时 /s	320.84	0.09	47.08
	总耗时 /s	2 541	1 992	2 183
2	返航点数量	3	3	3
	返航总长度 /m	1 001.57	593.52	503.84
	药剂补充总时间 /s	599.78	512.86	395.39
	等待总耗时 /s	53.84	4.08	0
	总耗时 /s	2 421	2 175	1 983
3	返航点数量	3	3	3
	返航总长度 /m	748.57	719.02	790.76
	药剂补充总时间 /s	599.21	544.45	574.95
	等待总耗时 /s	596.15	155.01	38.76
	总耗时 /s	2661	2326	2304

表 1 中, 3 架无人机作业时, 改进算法得到的无人机 1 返航总路径长度比未规划返航总路径长度短 57.2%, 比原 CTCM 算法短 7.35%, 药剂补充时间比电池更换时间长, 补给时间按较长的药剂补充时间计算, 无人机 1 补给时间比未规划补给时间短 17.38%, 比原 CTCM 算法补给时间长 24.63%, 无人机 1 等待总耗时在 CTCM 算法规划时最短, 无人机 1 总耗时比未规划总耗时短 14%, 比原 CTCM 算法总耗时长 9.59%。

改进算法得到的无人机 2 返航总路径长度比未规划返

航总路径长度短 49.69%，比原 CTCM 算法短 15.1%，药剂补充时间比电池更换时间长，补给时间按较长的药剂补充时间计算，无人机 2 补给时间比未规划补给时间短 34.08%，比原 CTCM 算法补给时间短 22.92%，无人机 2 等待总耗时在改进算法规划时最短，无人机 2 总耗时比未规划总耗时短 18.09%，比原 CTCM 算法总耗时短 8.83%。

改进算法得到的无人机 3 返航总路径长度比未规划返航总路径长度长 5.6%，比原 CTCM 算法长 9.98%，药剂补充时间比电池更换时间长，补给时间按较长的药剂补充时间计算，无人机 3 补给时间比未规划补给时间短 4%，但比原 CTCM 算法补给时间长 5.6%，无人机 3 等待总耗时在改进算法规划时最短，无人机 3 总耗时比未规划总耗时短 13.42%，比原 CTCM 算法总耗时短 0.95%。

总作业时间按 3 架无人机中最后完成作业的一架无人机完成时间计算，则未规划路径总作业时间为 2 661 s，原 CTCM 算法规划路径总作业时间为 2 326 s，改进算法规划路径总作业时间为 2 304 s，则改进算法的总作业时间比未规划总作业时间短 13.42%，比原 CTCM 算法总作业时间短 0.95%，提高了作业效率。

3 总结

为提高植保无人机的植保作业效率，提出了基于改进 CTCM 算法的多机覆盖作业方法，将各个无人机作业区域进行划分，通过栅格法进行路径规划，考虑了无人机药量和电量的限制以及多无人机补给时的调度问题，通过改进算法对各无人机返航点位置进行寻优，使得整个作业过程的工作时间得到优化。通过实验验证算法的可行性，在作业前对整个覆盖路径进行规划，可以提高覆盖作业的效率，节省时间和人力成本，这将使无人机植保工作更加智能化，为推动农业植保向规模化、无人化、节能化方向发展提供支持。

参考文献:

- [1] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133-146.
- [2] CONESA-MUÑOZ J, BENGOCHEA-GUEVARA J M, ANDUJAR D, et al. Route planning for agricultural tasks: a general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications[J]. Computers and electronics in agriculture, 2016, 127: 204-220.
- [3] CONESA-MUÑOZ J, PAJARES G, RIBEIRO A. Mix-opt: a new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment[J]. Expert systems with

applications, 2016, 54: 364-378.

- [4] DENG D, JING W, FU Y H, et al. Constrained heterogeneous vehicle path planning for large-area coverage[C]// 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE, 2019: 4113-4120.
- [5] 阚平, 姜兆亮, 刘玉浩, 等. 多植保无人机协同路径规划[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 260-270.
- [6] LIU Z, LIU Y K. Agent-based simulation of Multi-UAV search-track for dynamic targets in sweep coverage[J]. Journal of physics: conference series, 2021, 1746(1): 012033.
- [7] ZHAO T F, ZHANG G, LIANG H, et al. Optimal path selection algorithm for UAV formation guided by a UV virtual fence[J]. Applied optics, 2022, 61(11): 3182-3189.
- [8] 徐博, 陈立平, 谭彧, 等. 多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 36-42.
- [9] 王宇, 陈海涛, 李煜, 等. 基于 Grid-GSA 算法的植保无人机路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 29-37.
- [10] CHEN Z Y, LI S, KHAN A T, et al. Competition of tribes and cooperation of members algorithm: an evolutionary computation approach for model free optimization[J]. Expert systems with applications, 2025, 265: 125908.

【作者简介】

杨雯(1997—), 女, 四川眉山人, 硕士研究生, 研究方向: 统计建模与模式识别。

杨盛毅(1986—), 通信作者(email: yangyishy@163.com), 男, 贵州黔南人, 博士, 教授, 研究方向: 无人飞行器总体设计、自主控制与决策、环境感知与目标识别。

(收稿日期: 2025-09-12 修回日期: 2026-03-13)