

引用格式：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): 323610. KAN P, JIANG Z L, LIU Y H, et al. Cooperative path planning for multi-sprayer-UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 323610 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23610

多植保无人机协同路径规划

阚平^{1, 2}, 姜兆亮^{1, 2,*}, 刘玉浩^{1, 2}, 王振武^{1, 2}

1. 山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061

2. 山东大学 日照智能制造研究院, 日照 276800

摘要：为实现多植保无人机(UAVs)协同作业，并提高作业效率，提出了一种基于改进粒子群优化(PSO)的多植保无人机协同路径规划算法。根据作业区域的形状面积和植保 UAV 的作业参数划分各架 UAV 作业区域，采用栅格法生成各区域全覆盖作业航线。以各架植保 UAV 各架次植保作业距离为算法寻优变量，在确保各架 UAV 补给时间满足间隔分布约束条件下，综合考虑补给总次数、返航补给总时间、总耗时和最小补给时间间隔 4 项因素，并构成目标函数，通过采用改进 PSO 算法，实现了对各 UAV 返航顺序和返航点位置的寻优。仿真分析结果表明，相较于最大作业距离规划和最小返航距离规划，本文提出的规划算法表现出了较优的性能和较好的作业区域适应性，证实了其有效性和实用性。

关键词：路径规划；多植保无人机；补给点；粒子群优化 (PSO)；返航点

中图分类号：V279; S252

文献标识码：A

文章编号：1000-6893(2020)04-323610-11

近年来，无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)已经发展成为航空学中最具挑战性和高潜力的技术之一，路径规划任务作为一项无人机的关键技术，已被世界各地的学者广泛研究^[1]。无人机在民用和军事环境中的应用已经引起了学术界和工业界的极大兴趣，广泛应用于监视、人流控制、边境巡逻、交通监控、消防、农业、导航、搜索和救援等领域^[2-4]。无人机路径规划就是按照一定的工作要求，在满足各个约束的条件下，规划出能耗最优或次优的作业航线^[5]。针对无人机路径规划问题，国内外学者已开展了大量研究。文献[6]针对未知空域中无人机路径规划方法实时性和适用性不足的问题，提出了一种基于 skinner 操作条件反射理论框架的学习系统，通过遗传算法搜索最优行为进而得到最优路径。文献[7]提出了一种基于采样的无人机路径规划方法，该方法可

避免无人机与各种移动障碍物发生碰撞。

植保无人机选用小型旋翼无人机作为载体，在其上搭载农药喷雾设备进行作业，具有作业速度快、药剂漂移少、对作物穿透性强、防控效果好、作业效益高等特点，近年来得到了快速发展^[8-9]。植保无人机路径规划为全覆盖路径规划，多植保无人机协同路径规划可定义为：多架植保无人机在约束条件下，通过相互协调，共同对待覆盖区域（作业区域）进行遍历作业，使得总体性能指标最优^[10-11]。在单架植保无人机路径规划方面，学者已经开展了一些研究。文献[12]研究了一种植保无人机返航路线规划算法，通过合理分配各架次无人机的喷药量和返航点，使无人机的工作总能耗最小，从而提高作业效率。文献[13]提出了一种基于 Grid-GSA(Gravitational Search Algorithm)的植保无人机路径规划算法，以每架次无人机植保作业距

收稿日期：2019-10-25；退修日期：2019-11-22；录用日期：2019-12-19；网络出版时间：2019-12-30 11:08

网络出版地址：<http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200422.html>

基金项目：山东省自然科学基金(ZR2017MEE052)；日照市科技创新专项(2019CXZX1110)

* 通信作者。E-mail: jiangzhaoliang@sdu.edu.cn

离为寻优变量,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。

植保无人机在实际作业过程中,若作业区域面积较大,单次植保作业无法满足作业要求,需要中途多次返航至补给点进行药剂装填或电池更换等补给作业^[13]。这就要求对无人机的作业路线进行合理规划,从而达到提高作业效率的目的。随着中国城镇化率的进一步提高,对于转变农业发展方式,支撑现代农业发展,增强农业综合生产能力,发展高作业效率的农机装备是大势所趋^[14]。若仅采用1架植保无人机进行作业,作业总时间较长,效率有限。针对这种情况,本文基于改进粒子群算法,提出了一种多植保无人机协同路径规划解决方案,采用多架无人机协同作业,提高劳动效率。

1 简单路径规划方法

1.1 多植保无人机作业

设作业区域为一矩形,以采用4架无人机进行作业为例。为适应植保无人机自动化作业,提高作业效率、减少成本,因而只设置一个补给点。将作业区域按等面积划分为4块矩形,对应4架植保无人机分别进行作业,从左至右依次将无人机编为UAV-1~UAV-4号,如图1所示。为便于各植保无人机进行返航补给,将补给点设置于作业区域宽边中点沿长边方向向外距离为l处。为避免无人机返航途中发生碰撞,处于两边作业的无人机返航时的飞行高度应大于处于中间作业

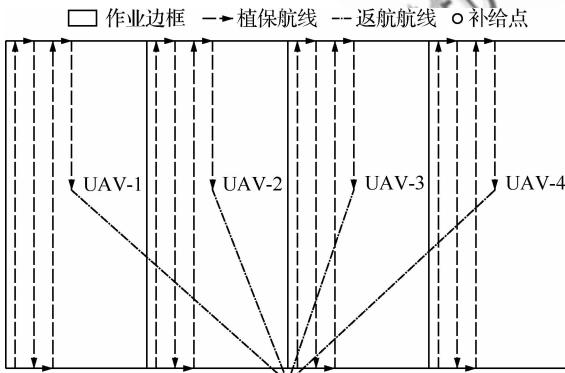


图1 多植保无人机协同作业示例

Fig. 1 Instance of cooperative path planning for multi-sprayer-UAVs

的无人机植保施药作业时的飞行高度和返航时的飞行高度。返航时的飞行高度大于等于植保作业高度,取两边作业的无人机与中间作业的无人机之间的返航高度差为 h 。为确保植保无人机协同作业时的航行安全,无人机飞行时应满足安全空间间距的要求,取各无人机之间的最小水平安全空间间距为 D_s 。

1.2 最大作业距离规划和最小返航距离规划

设植保无人机最大载药量为10 L,满载情况下续航时间为15 min,空载情况下的续航时间为25 min,载药量所允许的最大植保作业时间为12 min,非植保作业状态下的最大飞行速度为8 m/s,植保作业飞行速度为4 m/s,作业幅宽为2 m,单架次无人机最大植保作业距离为2880 m。

各架无人机在植保作业时,仅当所携带的药剂消耗殆尽时才进行返航补给,此时得到的作业路线定义为最大作业距离规划的作业路线;在保证所有返航点位置都位于补给点一侧作业区域边界上,且返航点数量最少所得到的作业路线定义为最小返航距离规划的作业路线^[13]。设作业区域为500 m×240 m的矩形,采用4架无人机进行作业,最大作业距离规划和最小返航距离规划情况下各架无人机返航点位置分布如图2所示。

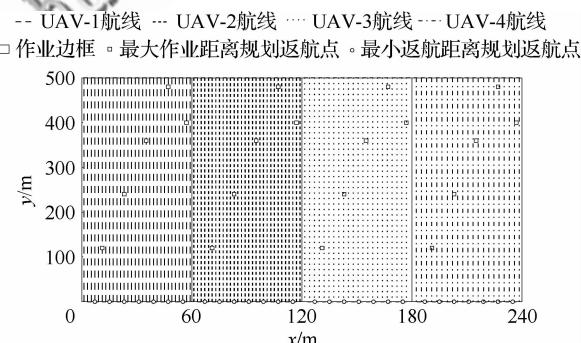


图2 4架无人机规则作业区域下返航点分布图

Fig. 2 Distribution of return points of four UAVs under regular operation area

2 改进 PSO 算法

2.1 PSO 算法描述

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO) 算法是 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年受

鸟群和鱼群社会行为的启发,提出的一种全体智能仿生算法^[15-16]。基本 PSO 算法的数学描述为

粒子群优化算法初始种群规模为 N , 粒子维数为 D , 第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个粒子在 t 时刻的飞行速度和在搜索空间中的位置分别为

$$\mathbf{v}_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iD}(t)]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iD}(t)]^T \quad (2)$$

粒子 i 在第 j ($j=1, 2, \dots, d$) 维的速度和位置更新公式为

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 r_2 (g_j - x_{ij}(t)) \quad (3)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4)$$

式中: ω 为惯性权值; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为(0,1)之间的随机数; p_{ij} 为粒子 i 自身搜索过程中的个体极值; g_j 为所有粒子的全体极值。

基本 PSO 算法的流程可以描述为:①生成初始搜索群体;②计算群体中各个粒子的适应度值。每个粒子的个体极值坐标设置为其当前位置,所有粒子中的最好粒子设置为群体的全体极值;③根据式(3)和式(4)更新每个粒子的速度和位置;④计算粒子的适应度值,如果好于该粒子当前的个体极值,则将个体极值设置为该粒子的位置,然后再更新群体的全局极值;⑤判断是否满足终止条件。若满足,停止搜索,输出最优解,否则,转到③继续搜索。

PSO 算法具有易实现、收敛快、鲁棒性好等优点,但收敛效率低^[17-18]。多年来,不少学者对 PSO 算法进行了各种改进。惯性权值是 PSO 算法中的一个重要参数,体现了粒子对之前速度的继承。文献[19]指出,前期全局搜索时取较大的惯性权值,有利于粒子跳出局部收敛;后期局部搜索时取较小的惯性权值,有利于粒子进行精细搜索,使得算法收敛。文献[20]提出了一种动态惯性权重 PSO 算法的迭代公式,其动态惯性权重随着迭代的增加而减小。PSO 属于典型的智能优化算法,本文研究的多植保无人机协同路径规划问题属于多目标优化问题,变量为每架无人机各架次植保作业的飞行距离,目标为无人机的补给总次数、返航补给总时间、总耗时和最小补给时间间隔都尽量取小值,变量与目标函数之间不存在明显的线性关系,适于用智能优化算法求解。本文采用改进 PSO 算法,对惯性权值采用“阶梯式”

调整策略,在迭代过程中,惯性权值阶梯式减小,有利于减少算法优化时间,并且有效兼顾算法全局搜索能力和精细搜索能力^[21]。

2.2 协同路径规划建模

设采用 M 架植保无人机进行协同作业,基于改进 PSO 算法的协同路径规划建模如下:

1) 算法寻优变量为每架无人机各架次植保作业的飞行距离,表示为

$$\mathbf{X}_{M \times n} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{Mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M$ 分别代表 1~ M 号无人机的各架次植保作业飞行距离。

2) 在植保作业过程中,由于补给点需要为 M 架无人机进行补给,为减少电池更换次数,应尽量减少每架无人机的补给次数。作业区域面积固定导致植保作业时间一定,为提高效率,应尽量降低无人机返航补给时间消耗,同时应尽量使整个植保作业时间最短。补给时间间隔为上一架次无人机结束补给至下一架次无人机开始补给之间的时长。为降低作业时间偏差对整个作业过程带来的影响,应使作业过程中的最小补给时间间隔尽量大。考虑到以上因素,构建包含以上各要素的目标函数,表示为

$$\min G = \omega_1 z_1 \sum_{i=1}^M C_i + \omega_2 z_2 \sum_{i=1}^M L_i + \omega_3 z_3 T + \omega_4 t_{\min} \quad (6)$$

式中: C_i 为 i 号无人机的补给总次数; L_i 为 i 号无人机的返航补给总时间,即 i 号无人机各架次返航往返飞行时间和补给时间之和(不包括刚开始作业时无人机飞行至作业区域时间,以及所对应作业区域全部作业完毕后的返航时间); T 为总耗时,即从第一架无人机起航作业到最后一架无人机完成对应作业区域植保作业的时长; t_{\min} 为作业过程中的最小补给时间间隔; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为权重因子,分别用于表征补给总次数、返航补给总时间、总耗时和最小补给时间间隔 4 项因素的重要程度,取 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 之和为 1, 其具体数值根据实际需要确定; z_1, z_2, z_3 为补给总次数、返

航补给总时间和总耗时的比例缩放因子,目的是使补给总次数、返航补给总时间、总耗时和最小补给时间间隔数值保持在同一量级。

3) 各架次无人机返航飞行时间为

$$f_{ij} = \frac{2|P_{ij}, P_0|}{v_{\max}} + t_i \quad i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots \quad (7)$$

式中: f_{ij} 为 i 号无人机进行第 j 次补给时的返航飞行时间; P_{ij} 为 i 号无人机进行第 j 次补给时的返航点位置坐标,其具体数值与无人机每次植保作业距离存在对应关系,可通过计算求出; P_0 为补给点位置坐标; v_{\max} 为非植保作业状态下的最大飞行速度; t_i 为 i 号无人机每次返航过程中在返航初始和结束阶段的额外时间消耗。

4) 补给过程包括药剂装填和电池更换,单次补给需要的总时间为 t_r 。多架无人机在协同作业时,由于补给点在同一时刻只能满足一架无人机进行补给,因而同一时刻仅允许一架无人机处于补给状态。为便于补给时间间隔分布,开始作业时各植保无人机依次延时起航,延时时间为 t_d 。处于两边作业的无人机距补给点相对较远,应先起航进行作业,位于中间作业的无人机后起航作业。初始起航点位于补给点附近。

5) 设各架无人机补给时间中点时刻按时间先后顺序构成向量 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k]$ 。为确保各架无人机补给时间间隔分布,应满足

$$\alpha_{i+1} - \alpha_i \geq t_r + t_s \quad 1 \leq i \leq k-1 \quad (8)$$

式中: t_s 为安全间隔时间,目的是避免各无人机飞行时间误差导致的补给时间发生冲突,并确保无人机飞行时满足最小空间间距。

根据以上基本思路,本文提出了一种基于改进 PSO 的多植保无人机协同路径规划算法,其基本流程如图 3 所示。

3 仿真分析

本文建立多植保无人机路径规划模型,针对不同架数植保无人机和不同作业区域,采用栅格法划分作业区域,生成全覆盖作业航线,采用改进粒子群优化算法,实现无人机路径规划的仿真分析,并将仿真结果与最大作业距离规划和最小返航距离规划 2 种情况进行对比。

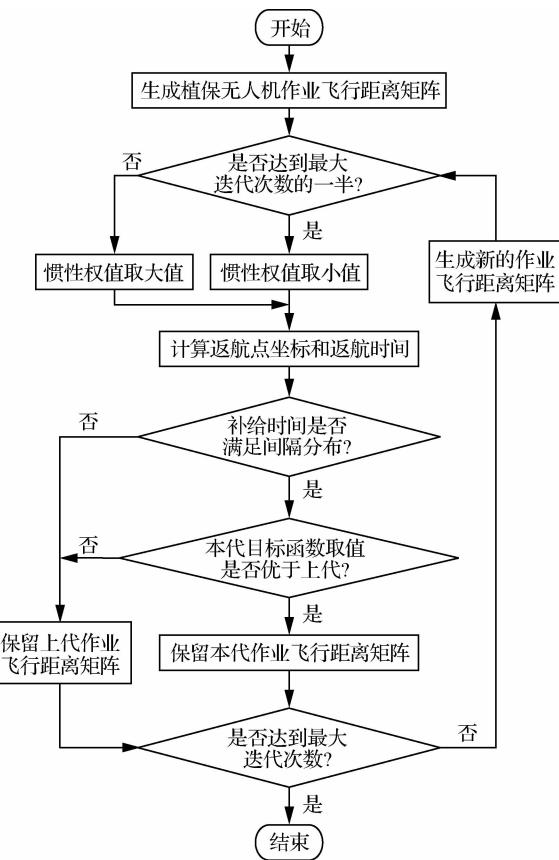


图 3 多植保无人机协同路径规划流程

Fig. 3 Flowchart of cooperative path planning for multi-sprayer-UAVs

3.1 全覆盖作业航线生成

植保无人机路径规划属于全覆盖路径规划的范畴,作业环境为已知状态,适宜采用栅格法对作业区域进行划分。以采用 4 架无人机作业为例,对于规则矩形的作业区域,如图 4 所示,待作业区域宽度为 $4b$,作业幅宽为 d ,在确保每架无人机作业区域宽度为作业幅宽的偶数倍的情况下,将待作业区域按等面积从左至右划分为 4 块矩形,则每架无人机待作业区域应设置 $2b/d$ 个航点。若无法满足上述条件,由于 UAV-2 作业区域右上角顶点相比于其他无人机作业区域右上角顶点而言与补给点相距最近,因而在先满足 UAV-1、UAV-3、UAV-4 号作业区域宽度为作业幅宽的偶数倍后,再使各无人机作业区域面积尽量平均。

对于不规则的作业区域,需将航点根据实际作业区域边缘进行相应调整,以不规则梯形为例,各无人机作业航线如图 5 所示。

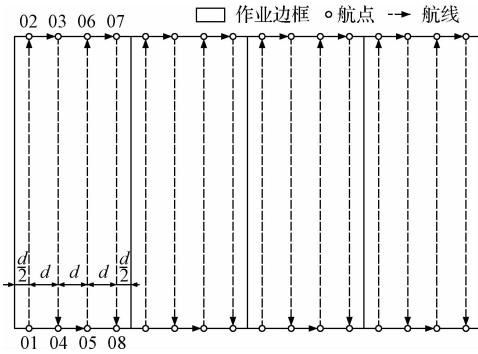


图 4 规则作业区域全覆盖植保航线生成

Fig. 4 Full coverage route generation in regular operation area

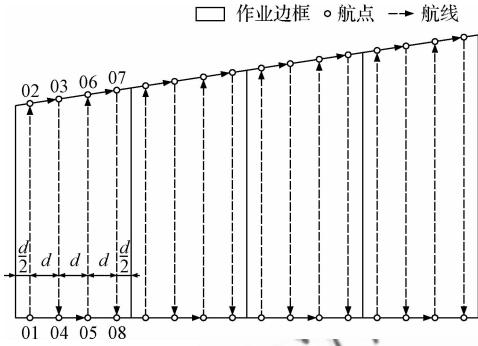


图 5 非规则作业区域全覆盖植保航线生成

Fig. 5 Full coverage route generation in irregular operation area

3.2 4架无人机规则作业区域下最大作业和最小返航距离规划仿真

设植保无人机续航时间为 15 min(满载),载药量所允许的最大植保作业时间为 12 min,非植保作业状态下最大飞行速度 $v_{\max} = 8$ m/s,植保作业飞行速度 $v_o = 4$ m/s,作业幅宽 $d = 2$ m,单架次无人机最大植保作业距离 $x_{\max} = 2880$ m,单次补给需要的总时间 $t_r = 60$ s,取每架无人机延时起航时间 $t_d = 150$ s,返航高度差 $h = 7$ m,最小水平安全空间间距 $D_s = 5$ m。取 UAV-2 和 UAV-3 返航初始和结束阶段的额外时间消耗 $t_2 = t_3 = 2$ s,由于 UAV-1 和 UAV-4 返航高度大于 UAV-2 和 UAV-3,返航时需要爬升高度,取 $t_1 = t_4 = 6$ s。

设作业区域为长 500 m,宽 240 m 的矩形,采用 4 架无人机进行作业,单架无人机的作业区域宽度为 60 m。补给点设置于作业区域宽边中点沿长边方向往外距离 $l = 5$ m 处。在非等比坐标系下,最大作业距离规划和最小返航距离规划情

况下各架无人机返航点位置分布如图 2 所示。

在最大作业距离规划情况下,UAV-1 在零时刻起航作业,UAV-2、UAV-3、UAV-4 分别延时 300、450、150 s 起航作业,各无人机工作状态和补给时间分布如图 6 所示。

在最小返航距离规划情况下,若各无人机仍按照原来 150 s 的延时起航作业,则无法满足补给时间间隔分布要求。为确保各架无人机补给时间间隔分布,UAV-1 在零时刻起航作业,UAV-2、UAV-3、UAV-4 分别延时 340、450、150 s 起航作业,各无人机工作状态和补给时间分布如图 7 所示。

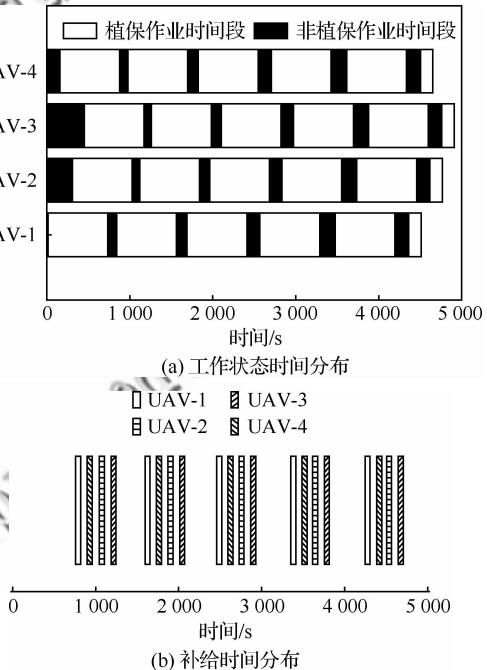
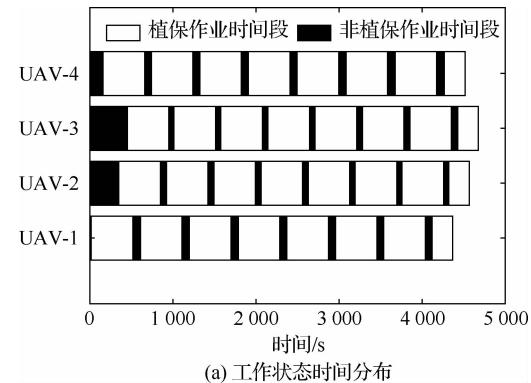


图 6 规则作业区域下最大作业距离规划仿真结果

Fig. 6 Simulation results of maximum operating distance planning under regular operation area



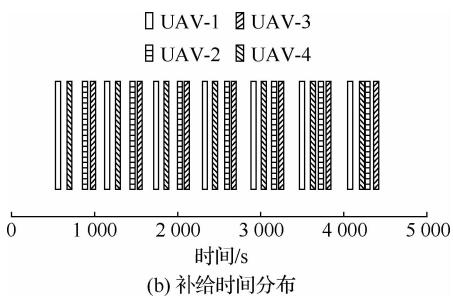


图 7 规则作业区域下最小返航距离规划仿真结果

Fig. 7 Simulation results of minimum return distance planning under regular operation area

3.3 改进 PSO 算法规划仿真

3.3.1 4架无人机规则作业区域下规划仿真

设植保无人机作业飞行时的最小水平安全空间间距为 5 m, 取安全间隔时间 t_s 为 40 s, 将此作为算法的约束条件, 此时各植保无人机进行补给时的最小空间间距将远大于预设的最小水平安全空间间距。设作业区域为 500 m × 240 m 的矩形, 采用 4 架植保无人机进行协同作业, UAV-1 在零时刻起航作业, UAV-2~UAV-4 分别延时 300、450、150 s 起航作业。在非等比坐标系下, 采用改进 PSO 算法得到的 4 架无人机路径规划如图 8 所示, 工作状态和补给时间分布如图 9 所示, 各架无人机植保作业距离数值分布为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \\ \mathbf{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2106 & 2874 & 2147 & 2880 & 2880 & 2113 \\ 2870 & 2217 & 2880 & 2831 & 2238 & 1964 \\ 2880 & 2235 & 2876 & 2853 & 2188 & 1968 \\ 2144 & 2850 & 2880 & 2223 & 2859 & 2044 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.3.2 4架无人机非规则边界作业区域下规划仿真

设作业区域长为 500 m, 宽为 240 m, 非规则边界由矩形区域去掉左上角边长 100 m 的等腰直角三角形形成。采用 4 架植保无人机进行协同作业, 运用栅格法划分作业区域, 并生成全覆盖作

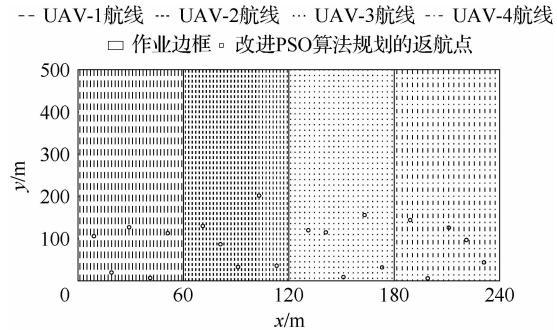


图 8 4架无人机规则作业区域下路径规划

Fig. 8 Path planning of four UAVs under regular operation area

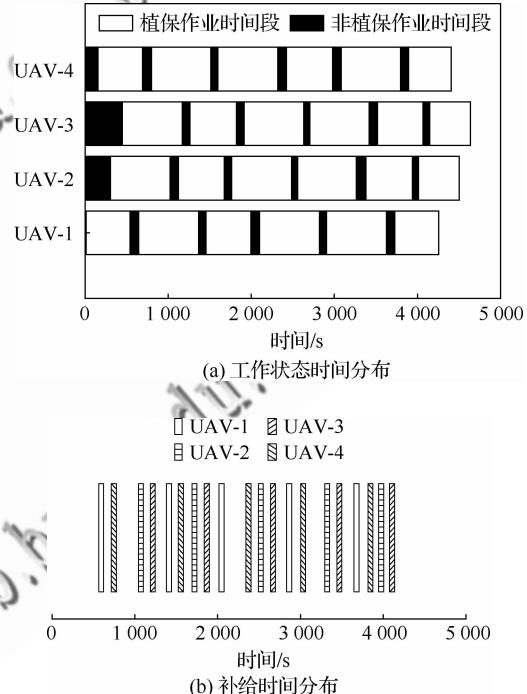


图 9 规则作业区域下改进 PSO 算法规划仿真结果
Fig. 9 Simulation results of improved PSO algorithm under regular operation area

业航线。UAV-1~UAV-4 的作业区域宽度分别为 64、60、60、56 m, 对应作业面积分别为 27 648、29 352、30 000、28 000 m²。补给点设置于作业区域宽边上 UAV-2 和 UAV-3 作业区域交点沿长边方向往外距离 $l = 5$ m 处。对应作业面积较大的无人机应先起航作业, UAV-3 在零时刻起航作业, UAV-1、UAV-2、UAV-4 分别延时 450、150、300 s 起航作业。在非等比坐标系下, 采用改进 PSO 算法得到的 4 架无人机路径规划如图 10 所示。各架无人机植保作业距离数值分布为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \\ \mathbf{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2258 & 2671 & 2627 & 2572 & 2687 & 1009 \\ 2142 & 2513 & 2160 & 2865 & 2873 & 2123 \\ 2028 & 2874 & 2260 & 2833 & 2858 & 2147 \\ 2180 & 2501 & 2320 & 2823 & 2258 & 1918 \end{bmatrix} \quad (10)$$

采用最大作业距离规划和最小返航距离规划得到的返航点分布如图 11 所示。若采用最小返航距离规划, 则难以满足补给时间间隔分布要求。采用最大作业距离规划时, 若沿用改进 PSO 算法所使用的起航延时方案, 将难以满足补给时间间隔分布的要求。

-- UAV-1航线 --- UAV-2航线 … UAV-3航线 --- UAV-4航线
□ 作业边框。改进PSO算法规划的返航点

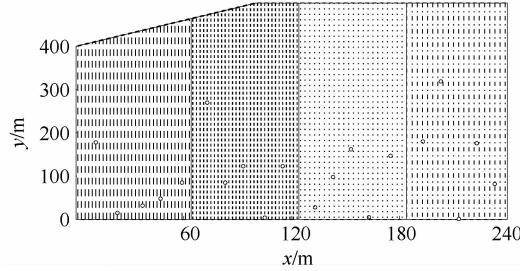


图 10 4 架无人机非规则作业区域下路径规划

Fig. 10 Path planning of four UAVs under irregular operation area

-- UAV-1航线 --- UAV-2航线 … UAV-3航线 --- UAV-4航线
□ 作业边框。最大作业距离规划返航点。最小返航距离规划返航点

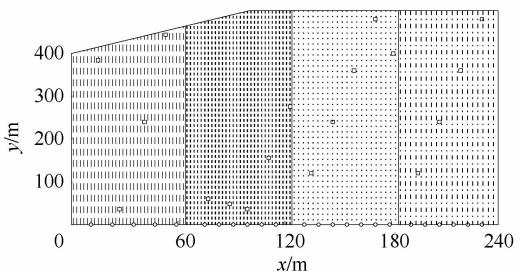


图 11 4 架无人机非规则作业区域下返航点分布

Fig. 11 Distribution of return points of four UAVs under irregular operation area

隔分布的要求。为使补给时间间隔分布, UAV-3 在零时刻起航作业, UAV-1、UAV-2、UAV-4 分别延时 500、450、150 s 起航作业。

3.3.3 2 架和 3 架无人机路径规划仿真

取作业区域为 500 m × 240 m 的矩形, 补给点设置于作业区域宽边中点沿长边方向往外距离 $l=5$ m 处。采用 2 架植保无人机进行协同作业时, 单架无人机的作业区域宽度为 120 m。UAV-1 在零时刻起航作业, UAV-2 延时 300 s 起航作业。由于 2 架无人机在同一高度返航, 取无人机返航初始和结束阶段的额外时间消耗 t_1, t_2 为 2 s。在非等比坐标系下, 采用最大作业距离规划和最小返航距离规划得到的返航点位置分布如图 12 所示。采用改进 PSO 算法得到的 2 架无人机返航点位置分布如图 13 所示, 2 架无人机植保作业距离数值分布如图 14 所示。

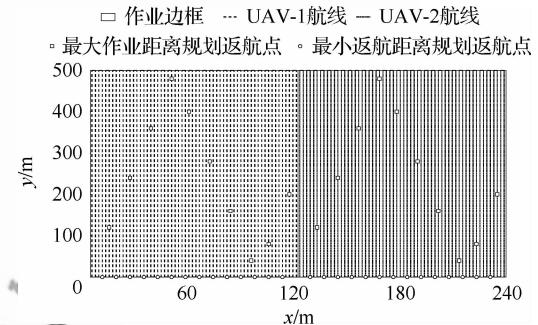


图 12 2 架无人机返航点分布

Fig. 12 Distribution of return points of two UAVs

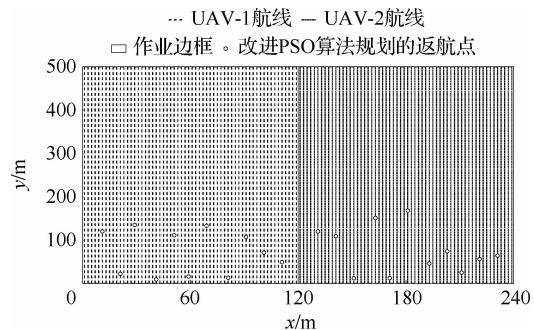


图 13 2 架无人机路径规划

Fig. 13 Path planning of two UAVs

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2880 & 2142 & 2113 & 2874 & 2880 & 2095 & 2149 & 2880 & 2880 & 2178 & 2880 & 2049 \\ 2880 & 2229 & 2879 & 2861 & 2139 & 2180 & 2878 & 2880 & 2049 & 2081 & 2880 & 2064 \end{bmatrix} \quad (11)$$

采用3架植保无人机进行协同作业时,单架无人机的作业区域宽度为80 m。UAV-1在0 s时刻起航作业,UAV-2和UAV-3分别延时400 s和200 s起航作业。由于处于两边作业的2架无人机的返航高度大于处于中间作业的无人机,取UAV-2返航初始和结束阶段的额外时间消耗 $t_2=2$ s,UAV-1和UAV-3为 $t_1=t_3=6$ s。在非等比坐标系下,采用改进PSO算法得到的3架无人机返航点位置分布如图14所示,3架无人机植保作业距离数值分布为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2079 & 2827 & 2234 & 2875 & 2878 & 2154 & 2874 & 2079 \\ 2880 & 2242 & 2880 & 2876 & 2226 & 2880 & 2880 & 1136 \\ 2848 & 2247 & 2827 & 2228 & 2758 & 2181 & 2869 & 2042 \end{bmatrix}$$

(12)

采用最大作业距离规划和最小返航距离规划得到的返航点分布如图15所示。最大作业距离

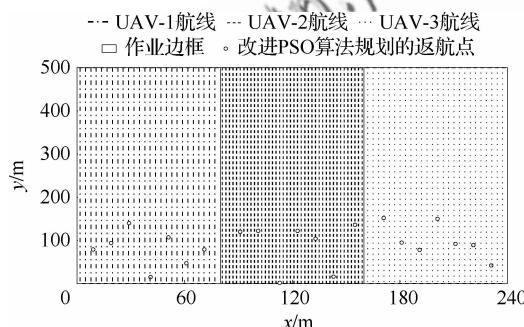


图14 3架无人机路径规划

Fig. 14 Path planning of three UAVs

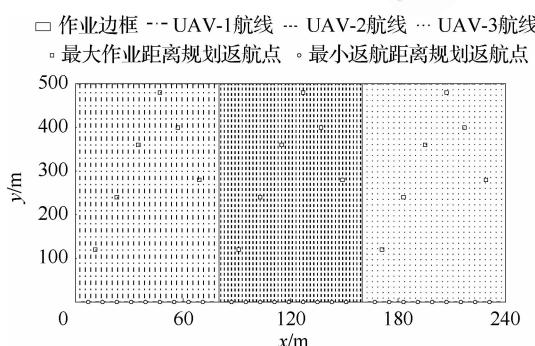


图15 3架无人机返航点分布

Fig. 15 Distribution of return points of three UAVs

规划沿用改进PSO算法起航延时方案。采用最小返航距离规划时,为使补给时间间隔分布,UAV-1在零时刻起航作业,UAV-2和UAV-3分别延时500 s和200 s起航作业。

4 结果分析

采用不同架数植保无人机在不同作业区域下,基于改进粒子群优化算法规划,最大作业距离规划和最小返航距离规划的结果数据对比如表1和表2所示。

表1中,采用4架植保无人机进行作业,当作业区域为规则矩形时,基于改进PSO算法得到的总返航点数量和最大作业距离规划情况持平,较最小返航距离规划情况减少了8个;相较于最大作

表1 4架无人机不同路径规划方法结果数据对比

Table 1 Data comparison of four UAVs under different path planning situations

作业区域	参数	改进PSO规划	最大作业距离规划	最小返航距离规划
规则	总返航点数量	20	20	28
	返航补给总时间/s	1870	2949	2215
	总耗时/s	4 638	4 919	4 691
	最小补给时间间隔/s	70.0	59.1	6.8
不规则	总返航点数量	20	18	
	返航补给总时间/s	1968	2 340	
	总耗时/s	4 406	4 595	
	最小补给时间间隔/s	64.2	37.1	

表2 2架和3架无人机规则作业区域下不同路径规划方法结果数据对比

Table 2 Data comparison of two and three UAVs under different path planning situations in regular operation area

无人机架数	参数	改进PSO规划	最大作业距离规划	最小返航距离规划
2	总返航点数量	22	20	28
	返航补给总时间/s	1 958	2 513	2 159
	总耗时/s	8 788	9 066	8 876
	最小补给时间间隔/s	214.8	207.6	125.0
3	总返航点数量	21	18	27
	返航补给总时间/s	1 977	2 635	2 150
	总耗时/s	6 009	6 256	6 106
	最小补给时间间隔/s	124.9	105.5	55.2

业距离规划和最小返航距离规划,基于 PSO 改进算法得到的返航补给总时间分别减少了 36.6% 和 15.6%,总耗时分别减少了 5.7% 和 1.1%,最小补给时间间隔分别增加了 18.4% 和 929.4%,且远大于安全间隔时间 40 s;采用最小返航距离规划时的最小补给时间间隔为 6.8 s,补给时将难以满足无人机飞行时的安全空间间距要求。当作业区域不规则时,若采用最小返航距离规划,由于每架无人机每次植保作业的距离不尽相同,将导致各无人机的补给时间难以满足间隔分布的要求。在作业区域不规则的情况下,相较于最大作业距离规划,基于改进 PSO 算法得到的总返航点数量增加了 2 个,返航补给总时间减少了 15.9%,总耗时减少了 4.1%,最小补给时间间隔增加了 73.0%,且远大于安全间隔时间 40 s;采用最大作业距离规划时的最小补给时间间隔为 37.1 s,小于设置的安全间隔时间。

表 2 中,当采用 2 架植保无人机进行作业时,相较于最大作业距离规划和最小返航距离规划,基于改进 PSO 算法得到的总返航点数量分别增加了 2 个和减少了 6 个,返航补给总时间分别减少了 22.1% 和 9.3%,总耗时分别减少了 3.1% 和 1.0%,最小补给时间间隔分别增加了 3.5% 和 71.8%。当采用 3 架植保无人机进行作业时,相较于最大作业距离规划和最小返航距离规划,基于 PSO 算法得到的总返航点数量分别增加了 3 个和减少了 6 个,返航补给总时间分别减少了 25.0% 和 8.0%,总耗时分别减少了 3.9% 和 1.6%,最小补给时间间隔分别增加了 18.4% 和 126.3%。

对比 3 种规划算法各项数据可以发现,除了总返航点数量可能会出现比最大作业距离规划稍多的情况,采用本文提出的改进 PSO 算法得到的路径规划结果在返航补给总时间、总耗时、最小补给时间间隔等 3 项指标中均为最优。最大作业距离规划在总返航点数量和最小补给时间间隔 2 项指标中表现较优,最小返航距离规划在返航补给总时间和总耗时 2 项指标中表现较优。而基于改进 PSO 算法得到的路径规划结果较好地综合了最大作业距离规划和最小返航距离规划的优点,并较好地克服了二者的缺点,表现出了较优的性能,具有一定的实际意义。

当作业区域不规则或面积较大时,采用最大

作业距离规划或最小返航距离规划,可能会出现各无人机补给时间不能满足间隔分布或补给时不能满足无人机飞行时的安全空间间距要求的问题,而使用本文提出规划算法能较好地避免这一问题,表现出了更强的作业区域适应性。

5 结 论

1) 针对单架植保无人机作业效率有限的情况,对多植保无人机协同作业问题进行了研究,基于改进 PSO 算法,提出了一种多植保无人机协同路径规划解决方案,实现了对各无人机返航顺序和返航点位置的寻优。

2) 本文提出的基于改进 PSO 算法的多植保无人机协同路径规划算法较好地综合了最大作业距离规划和最小返航距离规划的优点,并较好地克服了二者的缺点,表现出了较优的性能,且对作业区域有更好的适应性,具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Y, ZHENG Z, YANG L. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 158: 54-64.
- [2] MINAEIAN S, JIAN L, SON Y J. Vision-based target detection and localization via a team of cooperative UAV and UGVs[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2017, 46(7): 1005-1016.
- [3] CONESA-MU OZ 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] BEN-GHORBEL M, RODRIGUEZ-DUARTE D, GHAZZAI H, et al. Joint position and travel path optimization for energy efficient wireless data gathering using unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2165-2175.
- [5] PRIMICERIO J, FIORILLO E, GENESIO L, et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture [J]. Precision Agriculture, 2012, 13(4): 517-523.
- [6] 刘鑫, 杨霄鹏, 刘雨帆, 等. 基于 GA-OCPA 学习系统的无人机路径规划方法[J]. 航空学报, 2017, 38(11): 321275.
- [7] LIU X, YANG X P, LIU Y F, et al. UAV path planning based on GA-OCPA learning system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(11): 321275 (in Chinese).
- [8] LIN Y, SARIPALLI S. Sampling-based path planning for

- UAV collision avoidance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(11): 1-14.
- [8] 周志艳, 臧英, 罗锡文, 等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 1-10.
- ZHOU Z Y, ZANG Y, LUO X W, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24): 1-10 (in Chinese).
- [9] 娄尚易, 薛新宇, 顾伟, 等. 农用植保无人机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 1-6, 31.
- LOU S Y, XUE X Y, GU W, et al. Current status and trends of agricultural plant protection unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(12): 1-6, 31 (in Chinese).
- [10] 陈海, 何开锋, 钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报, 2016, 37(3): 928-935.
- CHEN H, HE K F, QIAN W Q. Cooperative coverage path planning for multiple UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 928-935 (in Chinese).
- [11] 徐博. 植保无人机航线规划方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- XU B. Research on route planning for plant protection unmanned aerial vehicles[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese).
- [12] 徐博, 陈立平, 谭或, 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.
- XU B, CHEN L P, TAN Y, et al. Path planning based on minimum energy consumption for plant protection UAVs in sorties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 36-42 (in Chinese).
- [13] 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.
- WANG Y, CHEN H T, LI Y, et al. Path planning method based on Grid-GSA for plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 29-37 (in Chinese).
- [14] 董胜, 袁朝辉, 谷超, 等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 1-11.
- DONG S, YUAN Z H, GU C, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 1-11 (in Chinese).
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [16] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995: 39-43.
- [17] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
- YANG W, LI Q Q. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. Strategic Study of CAE, 2004, 6(5): 87-94 (in Chinese).
- [18] ESMIN A A A, COELHO R A, MATWIN S. A review on particle swarm optimization algorithm and its variants to clustering high-dimensional data[J]. Artificial Intelligence Review, 2015, 44(1): 23-45.
- [19] SHI Y H, EBERHART R. Monitoring of particle swarm optimization[J]. Frontiers of Computer Science, 2009, 3(1): 31-37.
- [20] JIAO B, LIAN Z, GU X. A dynamic inertia weight particle swarm optimization algorithm[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2008, 37(3): 698-705.
- [21] 方群, 徐青. 基于改进粒子群算法的无人机三维航迹规划[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(1): 66-73.
- FANG Q, XU Q. 3D route planning for UAV based on improved PSO algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(1): 66-73 (in Chinese).

(责任编辑: 李丹)

Cooperative path planning for multi-sprayer-UAVs

KAN Ping^{1,2}, JIANG Zhaoliang^{1,2,*}, LIU Yuhao^{1,2}, WANG Zhenwu^{1,2}

1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education,

School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China

2. Rizhao Intelligent Manufacturing Institute, Shandong University, Rizhao 276800, China

Abstract: In order to achieve collaborative work and improve operation efficiency of multi-sprayer-Unmanned Aerial Vehicles(UAVs), a cooperative path planning algorithm for multi-sprayer-UAVs based on the improved Particle Swarm Optimization(PSO) is proposed. Considering the working area's shape and size and the operating parameters of sprayer-UAV, the working area of each UAV is divided. The full coverage route in each area is generated by grid method. The operation distance during one trip of each sprayer-UAV is used as the algorithm optimization variable. Under the condition that the replenishment time of each UAV meets the interval distribution constraint, four factors of replenishment frequency, total replenishment time, total operation time and minimum replenishment interval are comprehensively considered, constituting the objective function. The improved PSO algorithm is applied to optimize the position of return points and return sequence of UAVs. The simulation results show that compared with the maximum operating distance planning and the minimum return distance planning, the proposed planning algorithm show better performance and better operation area adaptability, which proved its effectiveness and practicability.

Keywords: path planning; multi-sprayer-Unmanned Aerial Vehicle (UAV); supply point; Particle Swarm Optimization (PSO); return points

Received: 2019-10-25; Revised: 2019-11-22; Accepted: 2019-12-19; Published online: 2019-12-30 11:08

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200422.html>

Foundation items: Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2017MEE052); Rizhao Science and Technology Innovation Project (2019CXZX1110).

* Corresponding author. E-mail: jiangzhaoliang@sdu.edu.cn