

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.04.06

面向复杂山地地形的多无人机测绘任务分配/航迹规划一体化求解方法研究

白艳¹, 宋崎^{1*}, 胡为¹, 王继虎²

(1.沈阳航空航天大学, 辽宁沈阳 110136; 2.航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了解决复杂山地地形环境下的无人机测绘任务分配问题, 提出了一种面向复杂山地地形的多无人机测绘任务分配/航迹规划一体化求解方法。首先, 基于山区不同地形的复杂程度, 建立每个测绘区的无人机航迹规划模型; 其次, 以任务区的测绘时间及无人机各个任务点之间的飞行时间最短为优化目标, 以无人机的航速、最大任务时长等为约束条件, 建立多无人机测绘任务分配/航迹规划一体化模型; 最后, 基于分布式遗传算法对多无人机测绘任务分配一体化模型进行求解。开展实验验证算法的有效性, 结果表明分布式遗传算法显著减少了测绘时间, 提高了测绘效率。研究成果为无人机测绘任务分配提供了新的技术思路, 为推动无人机测绘领域的发展起到了积极作用。

关键词: 无人机测绘; 山脉地貌; 分布式遗传算法; 航迹规划

中图分类号: TB9; TP2; V19 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2024) 04-0088-08

Research on the integrated solution method of multi-UAV surveying and mapping task allocation and flight track planning for complex mountainous terrain

BAI Yan¹, SONG Qi^{1*}, HU Wei¹, WANG Jihu²

(1.Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2.Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To solve the problem of task allocation for drone mapping in complex mountainous terrain, a unified solution for multi-drone mapping task allocation/flight path planning was proposed. Firstly, a flight path planning model was established for each mapping area based on the complexity of different terrain in mountainous areas. Then, a unified model for multi-drone mapping task allocation/flight path planning was established with the optimization objective of minimizing the mapping time and flight time between various task points of the drone, and the constraints of the drone's cruising speed and maximum task duration, etc. Finally, the multi-drone mapping task allocation unified model was solved using a distributed genetic algorithm. An experimental verification was conducted to verify the effectiveness of the algorithm, and the results showed that the distributed genetic algorithm significantly reduced the mapping time and improved the mapping efficiency. The research findings provide a new technical approach for drone mapping task allocation

收稿日期: 2024-08-02; 修回日期: 2024-08-14

基金项目: 航空科学基金项目(20220022054001)

引用格式: 白艳, 宋崎, 胡为, 等. 面向复杂山地地形的多无人机测绘任务分配/航迹规划一体化求解方法研究[J]. 计测技术, 2024, 44(4): 88-95.

Citation: BAI Y, SONG Q, HU W, et al. Research on the integrated solution method of multi-UAV surveying and mapping task allocation and flight track planning for complex mountainous terrain[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(4): 88-95.



and play a positive role in promoting the development of drone mapping.

Key words: UAV survey; mountainous terrain; distributed genetic algorithm; flight path planning

0 引言

目前, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在测绘领域的应用越来越广泛。山脉地区地形复杂、环境变化大, 对无人机测绘提出了更高的要求。因此, 如何高效地进行无人机测绘任务分配成为了重要的研究课题。

国内外研究人员针对无人机在复杂环境下的测绘任务分配问题开展了广泛研究, 特别是在任务规划与分配算法方面进行了深入探索。研究人员提出了基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群优化算法、蚁群算法的任务分配模型, 这些算法通过优化任务路径和分配方案, 提升了无人机群体的任务执行效率。纪良杰等人^[1]在布谷鸟算法的基础上, 引入自适应步长因子并融合模拟退火(Simulated Annealin, SA)机制, 提升了解决多无人机任务分配问题的速度和精度。徐杰等人^[2]提出了基于图论的一体化求解框架, 采用三维Dubins模型, 通过对无人机航向角进行离散化, 将路径规划问题和任务分配问题建立为离散图模型。刘森等人^[3]提出了一种基于改进状态压缩动态规划下多无人机协同搜救任务分配方法。胡超芳等人^[4]提出了一种基于拍卖鸽群优化算法的分布式分配方法。王娜等人^[5]设计了一种深度学习强化方法, 解决群体行为最优策略和协同控制方法, 并利用混合主动行为选择机制评估学习策略。赵恩来等人^[6]结合模拟退火算法和遗传算法构建了GAISA算法, 并基于GAISA设计了输电线路无人机巡检任务智能分配协同控制系统。

尽管国内外研究人员在无人机测绘技术方面取得了一定的成果, 但山脉地貌环境下的无人机测绘任务分配仍存在问题^[7]。首先, 现有的基于分配/航迹解耦的任务规划方法, 可实行性较差, 无法使航迹规划与任务分配很好地结合; 其次, 现有的优化算法在处理复杂地形环境数据时往往效率较低, 难以满足实际应用需求; 最后, 现有的研究大多针对单一类型无人机的任务分配, 而针对多类型无人机协同工作的研究相对较少^[8]。

针对上述问题, 本文提出了一种面向复杂山地地形的多无人机测绘任务分配/航迹规划一体化求解方法, 建立任务分配/航迹规划一体化模型, 利用基于遗传算法的分层耦合任务规划求解策略, 实现多无人机高效协同和精准测绘。

1 多无人机测绘任务分配/航迹规划一体化建模

首先定义由 M 架无人机组成的无人机群 $U_{UVA} = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_M\}$ 以及 N 个任务点的集合 $T_{task} = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$, 然后将 M 架无人机分配给 N 个测绘点。

1.1 目标函数

以最小化所有无人机飞行总时间为目标函数 $F^{[9]}$, 定义如式(1)。

$$F = \min \sum (T_{\text{测绘}} + T_{\text{任务点}}) \quad (1)$$

式中: $T_{\text{测绘}}$ 为无人机在测绘区的总飞行时间, $T_{\text{任务点}}$ 为无人机到达任务点的总飞行时间。

1.2 测绘区航迹规划模型

为了提高测绘效率, 以测绘时间最短为目标, 考虑测绘方式、旁向重叠度、航向重叠度等因素, 建立无人机测绘区航迹规划模型。航迹规划目标函数为

$$T_{\text{测绘}} = \begin{cases} \frac{S_{\text{等高}} \cdot (1+p_r) \cdot (1+p_l)}{V_{\text{等高}}}, & H \leq 10^\circ \\ \frac{S_{\text{贴近}} \cdot (1+p_r) \cdot (1+p_l)}{V_{\text{贴近}} \cdot K_{\text{起伏}} \cdot C_{\text{操控}}}, & H > 20^\circ \\ \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{\text{分割}} \cdot (1+p_{ri}) \cdot (1+p_{li})}{V_{\text{分割}} \cdot K_{\text{起伏}i}} \right), & 10^\circ < H \leq 20^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_{\text{等高}}$ 、 $S_{\text{贴近}}$ 、 $S_{\text{分割}}$ 分别为等高测绘、贴近摄影^[10]、大面积区域分割时无人机测绘面积, $V_{\text{等高}}$ 、 $V_{\text{贴近}}$ 、 $V_{\text{分割}}$ 分别为等高测绘、贴近摄影、大面积区域分割时无人机测绘速度, p_r 和 p_l 分别为航向重叠度与旁向重叠度, i 为第 i 个分区, $K_{\text{起伏}}$ 为起伏修正因子, H 为起伏角度, $C_{\text{操控}}$ 为操控时的难度系数。通过大量调查可得, 复杂环境下, 当贴近摄影测绘时, $K_{\text{起伏}}$ 取1.5; 当区域分割测绘时, $K_{\text{起伏}}$ 取1.2。对于密集森林、山区或建筑密集区, 设 $C_{\text{操控}}$ 为较高值(1.4~1.5)。起伏角度 H 的具体计算公式为

$$H = \arctan\left(\frac{\Delta h}{D}\right) \quad (3)$$

式中： Δh 为测绘区域内最高点与最低点之间的高度差， D 为水平距离。

当 $H \leq 10^\circ$ 时，地形起伏较小，等高飞行能够覆盖整个区域且效率较高；当 $H > 20^\circ$ 时，地形起伏较大，贴近摄影测绘能够更好地捕捉复杂地形的细节，满足高精度的需求。当 $10^\circ \leq H \leq 20^\circ$ 时，使用大面积区域分割测绘来提高覆盖效率和测绘质量。

贴近摄影测量适用于地形复杂且坡度较大的区域，通过紧贴地形飞行，提供更高的测绘精度，确保数据的准确性。大面积区域分割测绘将测绘区域按地形高度差进行分区，多无人机分片测绘后进行图像拼接，采取图像预处理、特征点匹配、加权融合、全局优化等方式^[11]，对整体图像进行校准，以减小累积误差，有效解决地形起伏较大时分辨力和重叠率不一致的问题，更适合在广阔的复杂地形中保持测绘质量的稳定性。大面积区域分割测绘示意图如图1所示。

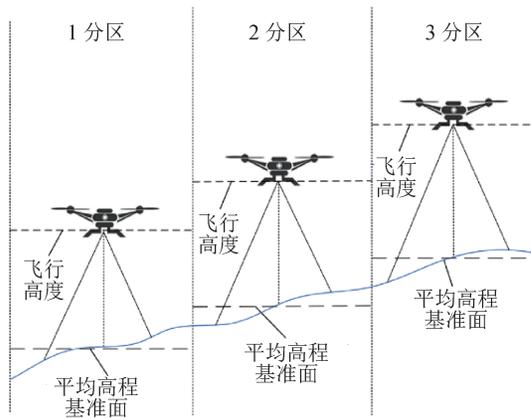


图1 大面积区域分割测绘示意图

Fig.1 Schematic diagram of large-scale area segmentation surveying

根据给定的航线方向，确定各航线的所在位置^[12]。因此，需要保证足够的重叠程度，以实现航线全覆盖。航向重叠度与旁向重叠度如图2所示，其中， P_x 、 P_y 分别为航向上、旁向上影像的单幅宽度， L_x 、 L_y 分别为航向、旁向重叠部分的长度。

在航线上和航线与其他航线之间，重叠度应在一定的范围内，如果没有重叠，需要重新补拍^[13]。为了保证影像匹配度和建模精度符合要求，

在山区测绘中， p_r 一般设定为65%~80%， p_l 通常设定为40%~60%。

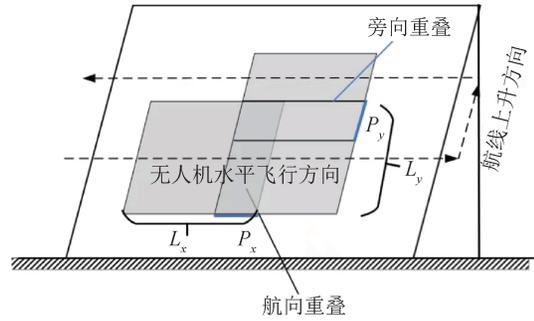


图2 航向重叠度与旁向重叠度

Fig.2 Heading overlap and side overlap

1.3 无人机到达各任务点时间

测绘时，第 i 架无人机到达任务点时间 $t_{任务点}$ 为

$$t_{任务点} = \frac{D(T_i, B_p)}{v_i} \quad (4)$$

式中： v_i 为无人机飞行速度， $D(T_i, B_p)$ 为任务 T_i 与基地 B_p 的欧氏距离，计算公式为

$$D(T_i, B_p) = \sqrt{(x_{B_p} - x_{T_i})^2 + (y_{B_p} - y_{T_i})^2} \quad (5)$$

式中： x_{B_p} 、 y_{B_p} 、 x_{T_i} 、 y_{T_i} 分别为基地 B_p 与任务 T_i 的位置坐标。

1.4 约束条件

在复杂山脉地形中进行无人机航空测量时，需要考虑更多的细节和技术要求^[14]，以确保数据采集准确和无人机安全飞行。具体约束如下^[15]：

1) 飞行高度

在测绘过程中不断调整拍摄距离，确保相机与山脉之间相对距离保持不变，可计算无人机表面相对山脉表面的距离 H_1 ，公式为

$$H_1 = \frac{G_{GSD} \cdot f}{P_s} \quad (6)$$

式中： G_{GSD} 为相机对地表状况的分辨力， f 为相机的焦距， P_s 为像素大小。地面样本距离示意图如图3所示。

2) 每个任务只能分配给一架无人机，故

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1, \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (7)$$

式中： x_{ij} 为无人机 i 执行的任务 j 。

3) 每架无人机在同一时间内只能执行一个任务，故

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (8)$$

4) 续航能力的约束为

$$\sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot x_{ij} \leq B_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

式中： d_{ij} 为无人机*i*执行任务*j*的能耗， B_i 为无人机的能耗上限， $B_i > d_{ij}$ 。

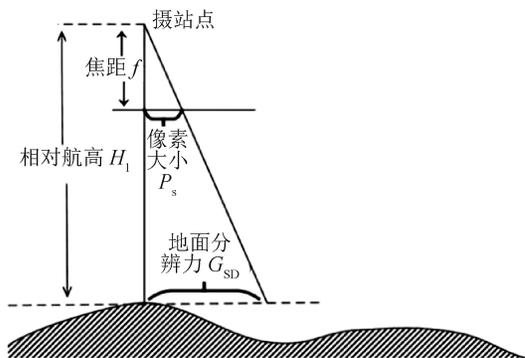


图3 地面样本距离示意图

Fig.3 Schematic of ground sample distance

2 分布式遗传算法设计

考虑到本文多无人机协同采用的分布式架构，为了提高优化算法的计算效率、节约时间、减少能耗，引入分布式遗传算法求解一体化任务规划模型，通过将种群分为多个并行计算的子种群，提高求解速度。

2.1 算法设计

分布式遗传算法是传统遗传算法的扩展版本，通过将算法的处理器或计算节点分类，以提高计算效率并解决更大规模的问题。算法运行时，各无人机独立运行遗传算法，将整个种群分成若干子种群，每个子种群在若干个节点上进化，分别完成相应的适应度计算、选择、交叉、变异、精英算子。相较传统的遗传算法，分布式遗传算法精英算子发生了一些特定变化，即在每个迁移周期内，选择全局范围内的最佳个体，并将这些个体分发到各个子种群中。通过比较精英算子的适应度，保留最优的精英算子，直至无人机完成各自的精英算子。重复以上步骤，直至精英算子不再发生改变。精英算子的保留和交换有助于加快算法的收敛速度，提高找到全局最优解的概率并防止早熟收敛。

2.2 基因编码

基因编码采用混合编码的方式^[16]。每个个体由3部分组成：①任务分配部分，每个任务对应1个任务点，其编码表示该任务被分配到哪一架无人机。对于有*n*个需求点的任务，任务分配部分的长度为*n*；②测绘方式的选择部分紧接任务分配部分，每个任务关联1个测绘方式的编码，以选择最优的测绘方式。测绘方式的选择依据具体任务需求，编码为*m*位的序列，其中每1位对应1种测绘方式(测绘方式包括等高测绘、大面积区域分割、贴近摄影测绘等)；③最后部分编码表示无人机的路径规划，该路径编码不仅包括任务点的访问顺序，还包括达到容量、行程、时间窗约束时返回任务中心的策略。路径规划部分的长度为 $2n+1$ ，其中 $2n$ 用于表示任务点和任务中心的序列，额外的1位表示起点或终点。

假设编码为[1, 3, 2, 01, 10, 00, 1, 2, 5, 1, 3, 4, 1]，其中[1, 3, 2]表示任务1、2、3分别分配给无人机1、无人机3和无人机2；[01, 10, 00]表示任务1选择测绘方式为“大面积区域分割”，任务2选择“贴近摄影测绘”，任务3选择“等高测绘”；[1, 2, 5, 1, 3, 4, 1]表示路径规划中，无人机从任务中心出发，依次访问任务点2和任务点5，返回任务中心后，再依次访问任务点3和任务点4，最后回到任务中心。

2.3 适应度的选取和选择过程

2.3.1 适应度的选取

适应度函数^[17]综合考虑无人机测绘方式及所用的总测绘时间。定义适应度函数*J*为

$$J = \frac{1}{T_{\text{总}} + \lambda \cdot W} \quad (10)$$

式中： $T_{\text{总}}$ 为总测绘时间， W 为约束条件违背程度， λ 为惩罚因子，用于处理约束条件的违背。 λ 可以从一个相对保守的值开始，如 $\lambda = 1$ ，在实际运行中，如果发现算法生成的解经常违反约束条件，则应增加 λ ；如果发现算法过于保守，总测绘时间过长，则可以减小 λ 。

2.3.2 选择过程

采用轮盘赌的方式选择父代个体产生下一代，适应度越高，被选中的概率越大，设父代个体*i*被选中的概率为 P_i ，则有

$$P_i = \frac{J_i}{\sum_{i=1}^N J_i} \quad (11)$$

式中： J_i 为种群中第*i*个个体的适应度值。

2.4 遗传算子

2.4.1 交叉算子

交叉算子用于将2个父代个体(染色体)组合生成新的子代个体。交叉算子通过交换父代个体的基因段来产生新的任务分配方案，从而实现信息的重组和遗传。

2.4.2 变异算子

变异算子用于随机改变染色体中的1个或多个基因值，从而增加种群的多样性，防止陷入局部最优解。染色体的变异主要有两种：①无人机变异(在保证无人机执行任务的能力约束下，随机改变对应目标处执行任务的无人机)；②基因排序变异(改变无人机执行任务的顺序)。

变异操作通常在选择和交叉操作之后进行，以确保种群在进化过程中不断探索新的解空间。

2.4.3 精英算子

精英算子^[18]用于确保当前种群中最优的个体能够直接保留到下一代中，防止优良特性在交叉和变异过程中丢失。其流程是：首先在每一代中选择若干个适应度最高的个体，将他们直接复制到下一代，然后再对其余个体进行选择、交叉和变异操作。这一过程保证了最优个体始终存在于种群中，促进了算法的收敛，并提高了稳定性。

3 实验及仿真研究

实验测绘区为某市的一片山区，测绘区域东面以山峰为主，其余三面为平原以及较为平坦的山丘，测绘区植被较多，整体环境复杂。测绘地区面积约为20 km²，海拔为1 000~2 000 m，呈现出明显的高低差异，东北高而西南低，地面倾斜角多在10°~30°，部分地区的倾斜角超过30°。

当无人机进行测绘时，姿态对影像的分辨率产生重要影响，当无人机倾斜拍摄时，摄像头与地面之间的距离变化导致影像边缘区域的分辨率下降，从而影响数据的准确性。为定量分析姿态对地面分辨率的影响，本研究通过等比例缩放的方式进行实验，对不同倾斜角度下山脉地貌的影像分辨率进行分析。

实验中，无人机保持在固定高度测绘，分别选取0°、10°、20°、30°四种不同的倾斜角度进行拍摄。倾斜角从0°增至30°时，边缘区域的分辨率从3.2 cm/pixel下降到7.2 cm/pixel，这表明倾斜角度越大，影像边缘区域的失真越严重，地面细节丢失越多。不同倾斜角度下影像分辨率的变化情况如表1所示。

表1 不同倾斜角度下影像分辨率

Tab.1 Image resolution at different tilt angles

倾斜角度/(°)	中心区域 $G_{SD}/$ (cm·pixel ⁻¹)	边缘区域 $G_{SD}/$ (cm·pixel ⁻¹)
0	3.2	3.2
10	3.2	4.5
20	3.2	5.8
30	3.2	7.2

山区复杂地形条件下的航测实验结果表明，倾斜角和相机分辨率共同决定了影像的地面分辨率。在选择航测参数时，较小的倾斜角和较高的相机分辨率能够有效提高地面分辨率，确保测绘精度符合要求。

本次测绘选择2种类型的无人机——传统固定翼无人机、多旋翼无人机。固定翼无人机具有较长的飞行时间和较大的飞行范围，稳定性好，可以在较大的风速下飞行^[19]；多旋翼无人机具有较小的体积和良好的机动性，可以垂直起降和悬停，适用于完成复杂地形测绘^[20]。无人机航测参数如表2所示。设定任务场景，定义每个目标点的测绘任务以及各区域的最优测绘方式。建立目标函数，以总测绘时间和无人机的利用率为优化目标。应用分布式遗传算法进行仿真，测量点及基地坐标如表3所示。

设定种群规模为100，最大迭代次数为200次，交叉概率 P_c 为0.9，变异概率 P_m 为0.05，测绘时

表2 无人机航测参数

Tab.2 UAV aerial survey parameters

无人机类型	最大飞行 速度/(km·h ⁻¹)	最大飞行 时间/min	最大起飞 质量/kg
固定翼无人机	200	185	14
多旋翼无人机	58	30	1.5

表3 测量点及基地坐标

Tab.3 Measurement point and base coordinates

目标编号	坐标
1	(60, 60)
2	(100, 60)
3	(40, 56)
4	(70, 90)
5	(60, 90)
6	(43, 86)
7	(110, 100)
8	(90, 70)
9	(80, 90)
10	(45, 95)
基地	(70, 10)

选择航向重叠度为60%，旁向重叠度为55%，采用软件 MATLAB2021b 编写程序进行仿真。本研究中，分配3架无人机：2架固定翼无人机分别设为无人机1和无人机2；1架多旋翼无人机设为无人机3。

试飞区面积为 20 km²，地势起伏在 0° ~ 30°，利用航迹规划目标函数 $T_{\text{测绘}}$ 计算出类型不同的无人机分别选择等高飞行、大面积区域分割、贴近摄影测绘3种测绘方式的飞行时间，如表4所示。

由表4可看出，等高测绘耗时最短，但山区环境复杂，因此在不同地势起伏下选择不同类型的测绘方式。当 $H \leq 10^\circ$ 时，等高飞行测绘是最优方案，选择固定翼无人机1更节约时间。当 $H > 20^\circ$ ，且飞行环境复杂，则采用贴近摄影测绘以确保数

据精度，在这种情况下，由于需要频繁调整飞行高度，测绘时间将相应增加，选择多旋翼无人机3更具机动性。若 H 在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间，则采取大面积区域分割测绘，设定每个区域分割面积为 2 km²，选择固定翼无人机2进行测绘。图4为最优任务分配结果下的无人机执行任务过程示意图。仿真得到各子任务被执行时刻，如表5所示。

表4 无人机测绘方式选择

Tab.4 UAV mapping method selection

无人机类型	测绘方式	时间/min
固定翼无人机	等高测绘	54.45
	大面积区域分割	72.6
	贴近摄影测绘	108.9
多旋翼无人机	等高测绘	81.68
	大面积区域分割	108.9
	贴近摄影测绘	163.35

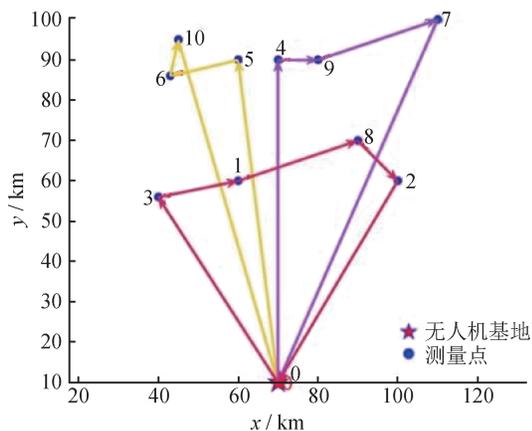


图4 无人机执行任务过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of the process of drone performing a mission

表5 各子任务被执行时刻结果

Tab.5 Results of each subtask execution time

无人机编号	任务序列	任务执行时刻/min	航行距离/km
1	0 → 10 → 6 → 5 → 0	0-60.5-73.6-80.5-199.5	199.5
2	0 → 4 → 9 → 7 → 0	0-60-67.5-182.6-196.3	196.3
3	0 → 3 → 1 → 8 → 2 → 0	0-41.2-56.5-80.2-111.6-163.7	163.7

由表5可以看出，每架无人机的航程约束和任务时长约束满足要求，各无人机前往各测量点的测量时刻不冲突，满足无人机分配任务的约束。

根据仿真结果可知，本文提出的多无人机任务

分配方法能够在满足无人机发射平台限制的前提下，同时获得几架无人机的任务确定矩阵和轨迹。

为了表征分布式遗传算法，将算法的种群大小设置为100，对集中式遗传算法与分布式遗传算

法的仿真结果进行比较,两种算法收敛曲线如图5所示。根据仿真结果可知,分布式遗传算法收敛25代,而集中式遗传算法收敛60代。

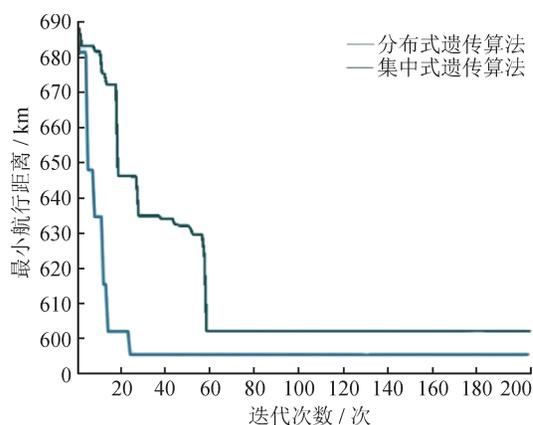


图5 两种遗传算法收敛曲线

Fig.5 Convergence curves of two genetic algorithms

4 结论

复杂山脉地貌测绘是一个复杂的 NP-hard 问题,本文以多无人机任务分配为背景,重点关注无人机测绘方式的选择,对测绘过程中多约束条件下的多无人机任务分配进行数学建模,提出了一种将分布式遗传算法应用于任务分配问题的方法。实验结果表明,本文提出的算法能够显著提高任务分配效率和测绘精度。集中式遗传算法和分布式遗传算法的仿真结果对比表明,分布式遗传算法的收敛速度和优化效果均优于集中式遗传算法。研究成果为解决复杂地貌测绘问题提供了科学的决策依据,具有技术借鉴价值。

参考文献

[1] 纪良杰,赵晓林,魏兆恬,等. 基于改进布谷鸟算法的多无人机任务分配[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(8): 290-295.
JI L J, ZHAO X L, WEI Z T, et al. Multi-UAV task allocation based on improved cuckoo algorithm[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2022, 43(8): 290-295. (in Chinese)

[2] 徐杰,吴蔚楠,龚春林. 多无人机任务分配/航迹规划的一体化求解方法[J]. 宇航学报, 2023, 44(12): 1860-1870.
XU J, WU W N, GONG C L, et al. Integrated mission assignment / route planning method for multiple UAVS[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(12): 1860-1870. (in

Chinese)

- [3] 刘森,姜雪松,张宇晨,等. 林火搜救多无人机协同任务分配方法[J]. 中国新技术新产品, 2024, 18(6): 133-136.
LIU S, JIANG X S, ZHANG Y C, et al. Cooperative task assignment method of multi-UAV in forest fire search and rescue [J]. New Technologies and Products in China, 2024, 18(6): 133-136. (in Chinese)
- [4] 胡超芳,宋思涵,徐嘉均,等. 基于拍卖鸽群优化算法的多无人机追踪分布式任务分配[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(4): 403-414.
HU C F, SONG S H, XU J J, et al. Multi-UAV tracking distributed task allocation based on auction pigeon flock optimization algorithm [J]. Journal of Tianjin University (Science and Engineering), 2024, 57(4): 403-414. (in Chinese)
- [5] 王娜,马利民,姜云春,等. 基于多 Agent 深度强化学习的无人机协作规划方法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(9): 83-89,96.
WANG N, MA L M, JIANG Y C, et al. Uav collaborative planning method based on multi-agent deep reinforcement learning [J]. Journal of Computer Applications and Software, 2019, 41(9): 83-89, 96. (in Chinese)
- [6] 赵恩来,苏鑫磊,董衍旭,等. 基于遗传算法的输电线路无人机巡检任务智能分配协同控制系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2024, 44(9): 64-68.
ZHAO E L, SU X L, DONG Y X, et al. Design of collaborative control system for intelligent assignment of transmission line UAV inspection task based on genetic algorithm [J]. Automation & Instrumentation, 2024, 44(9): 64-68. (in Chinese)
- [7] 黄樊晶,吴盘龙,李星秀,等. 考虑执行能力约束的多机协同目标分配 AEPSO 算法[J]. 宇航学报, 2024, 45(6): 948-957.
HUANG F J, WU P L, LI X X, et al. AEPSO algorithm for multi-machine cooperative target assignment considering execution constraint [J]. Acta Astronautica, 2024, 45(6): 948-957. (in Chinese)
- [8] 李征,彭博,陈海东,等. 一种用于无人机任务分配的改进粒子群算法[J]. 计算机仿真, 2024, 41(8): 344-348, 485.
LI Z, PENG B, CHEN H D, et al. An improved particle swarm optimization algorithm for UAV task assignment [J]. Computer Simulation, 2019, 41(8): 344-348, 485. (in Chinese)
- [9] 张耀中,陈岚,史国庆,等. 时序耦合约束下的多无人机协同任务决策研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(5): 890-896.

- ZHANG Y Z, CHEN L, SHI G Q, et al. Research on multi-UAV cooperative mission decision-making with time-series coupling constraints [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(5): 890-896. (in Chinese)
- [10] 敖其勇, 潘国兵, 龚洲, 等. 无人机斜面贴近摄影测量的三维航线规划研究[J]. 时空信息学报, 2023, 30(4): 500-507.
- AO Q Y, PAN G B, GONG Z, et al. Study on 3-D route planning of UAV slope close to photogrammetry [J]. Journal of Spatio-temporal Information, 2023, 30(4): 500-507. (in Chinese)
- [11] 胡中华, 赵敏, 姚敏. 无人机三维航路规划技术研究及发展趋势[J]. 计测技术, 2009, 29(6): 6-9.
- HU Z H, ZHAO M, YAO M, et al. Research and development trend of UAV 3D route planning technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2009, 29(6): 6-9. (in Chinese)
- [12] 基于无人机平台的摄影测量技术在露天试验台加载变形中的测试应用[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 65.
- The application of photogrammetry technology based on UAV platform in loading deformation test of open-air test bench [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(5): 65. (in Chinese)
- [13] 茅娜, 张文明, 孙侃. 基于无人机贴近摄影测量的露天采石场高陡岩质边坡岩体结构面信息自动识别[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(2): 164-172.
- MAO N, ZHANG W M, SUN K. Automatic identification of rock mass structural plane information of high-steep rock slope in open-pit quarries based on UAV proximity photogrammetry [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(2): 164-172. (in Chinese)
- [14] 王磊, 张怀周, 顾伟, 等. SINS在小型无人机测控方面的应用[J]. 计测技术, 2007, 27(5): 26-27, 34.
- WANG L, ZHANG H Z, GU W, et al. Application of SINS in measurement and control of small UAV [J]. Metrology & Measurement Technology, 2007, 27(5): 26-27, 34. (in Chinese)
- [15] 赵颖, 徐熙阳. 基于混沌蚁群算法的集群无人机协同任务分配[J]. 兵工自动化, 2023, 42(8): 91-96.
- ZHAO Y, XU X Y. Cluster UAV cooperative task assignment based on chaos ant colony algorithm [J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(8): 91-96. (in Chinese)
- [16] 张安, 杨咪, 毕文豪, 等. 基于多策略GWO算法的不确定环境下异构多无人机任务分配[J]. 航空学报, 2023, 44(8): 148-164.
- ZHANG A, YANG M, BI W H, et al. Task allocation of heterogeneous multi-UAV in uncertain environment based on multi-strategy GWO algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(8): 148-164. (in Chinese)
- [17] 张富震, 朱耀琴. 复杂环境中多无人机协同侦察的任务分配方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(10): 2293-2302.
- ZHANG F Z, ZHU Y Q. Task assignment method for multi-UAV cooperative reconnaissance in complex environment [J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(10): 2293-2302. (in Chinese)
- [18] 陈亮, 卢天鸣, 曹林, 等. 基于分解的多目标布谷鸟搜索算法求解多无人机协同任务分配问题[J]. 军事运筹与系统工程, 2021, 35(2): 5-12.
- CHEN L, LU T M, CAO L, et al. A decomposition-based multi-objective Cuckoo search method for cooperative task assignment of multiple UAV [J]. Military Operations and Systems Engineering, 2021, 35(2): 5-12. (in Chinese)
- [19] 宋伟中, 王行业, 王宁. 一种面向无人机区域协同覆盖的感知任务分配方法[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(5): 75-81.
- SONG W Z, WANG X Y, WANG N. A perceptual task assignment method for UAV area cooperative coverage [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(5): 75-81. (in Chinese)
- [20] 刘夏婷, 傅强. 基于改进麻雀搜索算法的多无人机任务分配[J]. 现代计算机, 2023, 29(20): 45-49.
- LIU X T, FU Q. Multi-UAV task allocation based on improved sparrow search algorithm [J]. Modern Computers, 2023, 29(20): 45-49. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 白艳(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为基于智能优化算法的多无人机任务分配、路径规划技术。



通信作者: 宋崎(1978—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为基于群体优化算法的运动规划、轨迹跟踪与自主控制技术。