

救灾无人机的优化A*航迹规划算法

韩晓微¹, 韩震², 岳高峰², 崔建江³

1. 沈阳大学 科技创新研究院, 沈阳 110044

2. 沈阳大学 信息工程学院, 沈阳 110044

3. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004

摘要:针对抢险救灾中无人机派遣量及空间航迹规划最短路径相制约的问题,提出了一种优化A*的航迹算法。通过设计的蛇形割圆法对圆形巡查区域进行路径规划,通过提取感兴趣区域的方法选择较佳搜索方向,提高搜索效率,采用加权评估法优化自然威胁权重系数,重定义航迹估计函数。将提出的方法在灾情巡查和生命勘测实际问题中进行性能检测。仿真结果表明,该算法能够合理分配无人机数量且能快速规划出较优飞行轨迹,实现巡查覆盖率达88.96%。

关键词:航迹规划; A*算法; 蛇形割圆法; 感兴趣区域; 加权评估法

文献标志码:A **中图分类号:**TP391 **doi:**10.3778/j.issn.1002-8331.1912-0304

Path Planning Algorithm of Disaster Relief UAV Based on Optimized A*

HAN Xiaowei¹, HAN Zhen², YUE Gaofeng², CUI Jianjiang³

1. Institute of Science and Technology Innovation, Shenyang University, Shenyang 110044, China

2. College of Information Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China

3. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China

Abstract: In order to solve the problem that the dispatching quantity of UAV and the shortest path of space flight path planning are restricted. A track algorithm for optimizing A* is proposed. The path planning of the circular inspection area is carried out by the designed serpentine cutting method. The better search direction is selected by extracting the region of interest, so as to improve the search efficiency of relief UAV. The weighted assessment method is used to optimize the natural threat weight coefficient and redefine the track estimation function. The proposed method is tested in the application to the actual problem of disaster inspection and life investigation for performance detection. The simulation results show that the proposed algorithm can reasonably allocate the number of UAV and quickly plan the optimal flight path, and realize the inspection coverage rate of 88.96 percent.

Key words: path planning; A* algorithm; serpentine circular cut; region of interest; weighted assessment method

随着无人机智能化水平的提高,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在灾难救援领域大展身手,解决了救援人员无法第一时间到达灾区的救援难题^[1-3]。无人机航迹规划是救援任务中最重要的环节,全局优化的航迹规划在减少飞行距离的同时也提高救援效率^[4-7],受到广大学者的火热研究。

无人机在各大灾区抢险救灾中的航迹规划问题,各国研究学者已经做了大量研究工作,提出的各种智能航迹规划算法已经在实际救灾任务中得到验证^[8]。马云红

提出了基于改进A*算法的三维无人机路径规划^[9],陈海等人将凸多边形区域中的无人机覆盖航迹规划问题为研究重点,提出了一种凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划问题转化为凸多边形宽度问题算法^[10],李季等人提出基于改进A-Star算法的无人机航迹规划算法^[11],解决无人机在未知危险环境中的威胁规避问题,其目的是综合路径代价影响的因素,从而达到无人机航迹规划威胁避让效果,低空突防中无人机的飞行环境的复杂性,综合考虑了飞行高度、航迹长度等因素,搜索一条两个航

基金项目:国家自然科学基金(61873338);沈阳市双百工程计划(Z18-5-013)。

作者简介:韩晓微(1969—),男,博士,教授,研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: Hxw69@163.com;韩震(1995—),男,硕士研究生,控制理论与控制工程, E-mail: 2456331132@qq.com;岳高峰(1995—),男,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程;崔建江(1964—),男,博士,副教授,研究方向为复杂建模系统与分析。

收稿日期:2019-12-20 **修回日期:**2020-02-16 **文章编号:**1002-8331(2021)06-0232-07

路点之间的最优航迹,SUN等人提出基于A*算法规划无人机路径^[12],将危险区域以多边形建模,利用子节点安全性检测策略,解决了实际环境下突然出现的威胁区动态路径规划问题,Tsai等人提出了一种随机数快速搜索的算法来确定三维空间的初步航迹^[13],并通过改进的A-Star算法降低了无人机在飞行中能量的消耗。Nuske提出了一种改进的稀疏切向网络算法^[14],利用测地线性质的切线流形上的切线表面周围障碍快速规划。Ryan提出了一种禁忌搜索算法应用在多无人机协同侦查任务规划问题,并将该问题转化为多旅行商问题^[15]。

综上所述,为进一步提高传统规划算法在搜索速度以及与巡查距离混合优化的耦合度,本文采用蛇形割圆法对重点圆形巡查区域航迹规划,同时采用提取感兴趣区域方式选择较优搜索方向、通过加权评估法重新定义航迹估计函数,基于以上内容改进的A*算法,合理分配无人机数量的同时也缩短了无人机到达灾区的飞行时间。

1 无人机群航迹规划模型建立

1.1 灾情巡查

某地区地震后,根据灾情分出七个重点区域,且每个重点区域均以方圆十公里为界限,需派出无人机对其进行巡查完成任务,在巡查任务之前需对震区进行三维图重建,通过软件MATLAB将某震灾区的2 913列,2 775行高程数据进行数据处理,得到震区三维立体图,如图1所示。

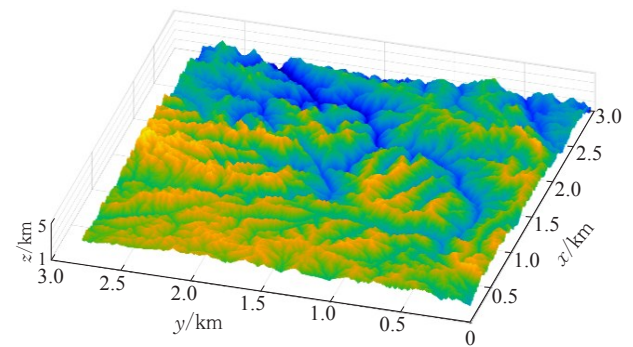


图1 震区三维立体图

为了提高无人机巡查任务的效率,在震区三维立体图中,根据震区现象将7个重点地震区域中心位置及其中心方圆10 km区域标示出来,将其记为集合 $S_n = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$,得到俯视二维示意图,如图2所示。

无人机在海拔4 200 m处巡查到的海拔3 000 m处面积以及1个重点区域面积时,根据人类对天空仰望目标物的常规角度,从灾区水平地面任意点观测无人机的最适仰角要小于 60° ,且无人机在搜救过程中,其搜救效果不能被障碍物所影响,将该巡查任务拟化成圆锥体示意图,如图3所示。

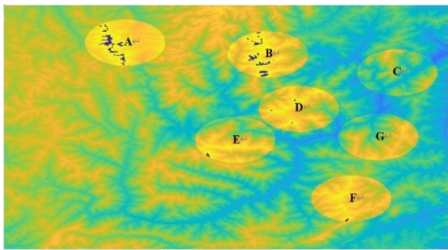


图2 震后7个重点区域示意图

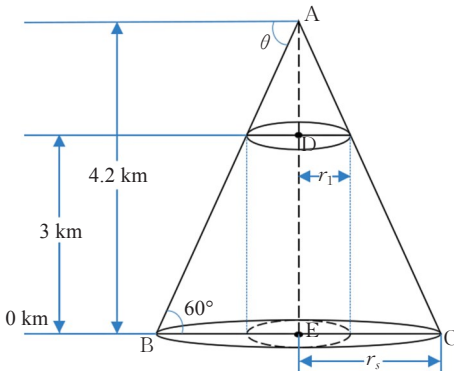


图3 无人机巡查示意图

由图3得到无人机巡查有效范围,即无人机在海拔3 000 m平面巡查视线圆形区域的半径,简化后数学模型:

$$r_1 = \frac{AE - DE}{\tan \theta} \tag{1}$$

即无人机巡查半径为 r_1 ,重点区域为半径10 km的圆形,在凸多边形区域航迹规划问题中^[2],从飞行航程和飞行时间考虑分析,重点巡查区域的巡查时间较为固定,且无人机在转弯期间会增加额外飞行距离,故转弯次数越少,整体执行任务的飞行时间越短,基于在凸多边形飞行区域中,最少转弯次数方向与凸多边形某条边平行的思路,设计了蛇形割圆法对圆形重点震区($R = 10$ km)进行巡查,该巡查过程假设无人机航速不变。当无人机在某一特定多边形飞行区域执行任务,转弯的次数与飞行距离成正比关系,即转弯数越少,飞行路程越短,转弯数越多,飞行路程越长,巡查经过路径及面积示意图,如图4所示,条形阴影部分为巡查面积,每个矩形的长对称轴为巡查路线。

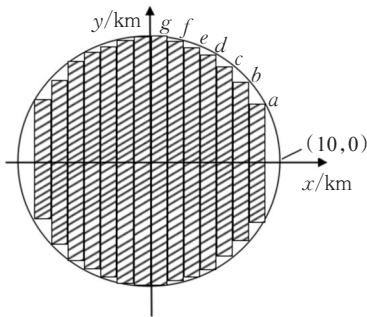


图4 无人机巡查单位面积路径示意图

将巡查重点区域放置到平面直角坐标系中,以上述巡查直径作为宽度的矩形来切割重点区域中心圆,从而

建立最短航迹路程 L_{\min} 的目标函数,其中点 $p(p_x^i, p_y^{ij})$ 为巡查路径与重点区域中心圆交点坐标,且满足 $\sum(p_x^i, p_y^i)$ 都在无人机携带视频采集装置巡查重点区域 S ,无人机在飞行过程中的飞行速度为 60 km/h,单架无人机完成一个灾区巡查时间为 t_s 。

$$L_{\min} = 2 \sum_{i=1}^N (p_y^{i,1} - p_y^{i,2}) = 2 \sum_{i=1}^{\frac{R \tan \theta}{2(AE-DE)}} (p_y^{i,1} - p_y^{i,2}) \quad (2)$$

$$t_s = \frac{L_{\min}}{60} \quad (3)$$

1.2 地形与大气威胁

本文在建立模型的时候充分考虑灾区的实际情况,引入地形威胁和大气威胁,使其更加符合实际自然规律,提高模型的实用性。在无人机航迹规划问题中,地形限制问题通过建立数学模型来模拟已知灾区区域三维地形,从而建立数学模型为:

$$z(x, y) = h_i \times \exp[-(\frac{x-a_i}{\lambda_i})^2 - (\frac{y-b_i}{\lambda_i})^2] \quad (4)$$

$Z(x, y)$ 为山峰表面任意一点投影到水平面的坐标值, h_i 为第 i 个山峰的高度值, (a_i, b_i) 为山峰中心投影到水平面的坐标值, λ_i 为第 i 个山峰的坡度系数值,通过改变其值可模拟山峰陡度。

将山峰外轮廓抽象为三角形模型,如图 5 所示,无人机到山峰中垂线的距离为 d_m ,中垂线到山峰表面的距离为 d_h 。

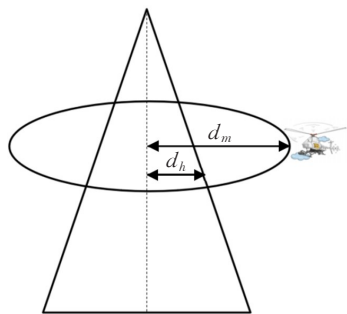


图5 无人机环绕山体飞行示意图

无人机飞行安全距离介于 d_{\min} 和 d_{\max} 之间,当无人机与山峰表面距离大于 d_{\max} 时,危险度为 0,当距离趋于 d_{\min} 时,危险度越大,山峰对无人机的威胁度为 T_m :

$$T_m = \begin{cases} 0, & d_m - d_h \geq d_{\max} \\ (d_m - d_h)/d_m, & d_{\min} < d_m - d_h < d_{\max} \\ 1/(d_m - d_h), & d_m - d_h \leq d_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

大气中恶劣环境区域可拟化为一个球体,球体半径分为最小威胁 $R_{e\min}$ 和最大威胁 $R_{e\max}$,大气威胁示意图,如图 6 所示。

当无人机处于最大威胁区域之外时,无人机不受任何影响,威胁度为 0,随着无人机向危险球体中心的靠近,无人机受到的威胁将越来越大, L_{UAV} 为无人机到球体中心的距离,大气威胁对无人机的威胁为 T_w :

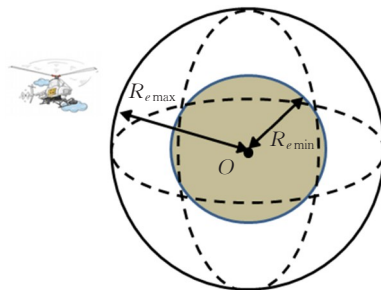


图6 大气威胁示意图

$$T_w = \begin{cases} \frac{1}{L_{UAV}^4}, & L_{UAV} \geq R_{e\max} \\ 0, & L_{UAV} < R_{e\max} \end{cases} \quad (6)$$

2 无人机巡查路径优化与求解

2.1 A*算法基本思想

A*算法是一种启发式搜索算法。在巡查三维状态空间中起始点到目标点的最小代价路径问题上被广泛使用,大量应用在无人机的航迹规划问题中。主要是通过搜索空间中持续评估航迹的估价函数值来启发式搜索节点来寻找最优航迹^[10]。A*算法常规的评估函数表示为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (7)$$

设定当下节点为 n ,其中 $f(n)$ 是从出发点经过节点 n 到达目标点的预估代价, $g(n)$ 是在三维空间中从出发点到达目标节点 n 的实际代价, $h(n)$ 是从节点 n 到达目标节点的预计代价。

A*算法拥有 open 表和 closed 表两个数据集合库, open 表用来存放已生成待考察的节点, closed 表保存已考察过的节点,算法步骤如下:

(1)将起始点存放到 open 表。

(2)查询 open 表,找到 $f(n)$,将它视为当前节点进行处理,若此节点为终点,结束所有操作,否则,将该节点存放到 closed 表中。

(3)如果当前节点与目的距离在最短飞行距离范围内,转至(4)。

(4)根据节点情况进行拓展。

(5)将当前节点设置为相邻节点的父亲点,加入 open 表,转至步骤(2)。

(6)结束。

2.2 改进的 A*算法

搜索方向、搜索步长是 A*算法搜索效率的主要影响因素。本文通过寻找感兴趣区域的方式优化搜索方向,从而提高无人机搜索灾区任务的效率,在视觉图像领域,在需要被处理的原图上,以不规则多边形的轮廓框选出需要被处理的区域,多边形多数以圆、方框方式呈现,其被框选出的区域为感兴趣区(ROI)^[16-20]。通过

提取感兴趣区域的方法框选重点关注的区域,可减少图像处理周期,提高识别精度。在制定震区巡查任务之前需要无人机携带采集摄像头进行大范围信息采集,针对某一震区事件,对该震区中7个较为严重的区域进行巡查,假设7个重点震区都是以半径为10 km(并记为S)的圆形区域,并标记出区域S中的感兴趣区域以内的灾情,建立巡查时间模型,灾区感兴趣区域如图7所示。每个重点区域海拔低于3 000 m的区域面积理论所需巡查时间为 t_j' , S' 为每个重点区域海拔低于3 000 m的感兴趣区域面积, S_j 为每个重点区域面积($j=A,B,C,D,E,F,G$), t_s 为无人机巡查单位面积所需时间,具体表达式如式(8)所示:

$$t_j'=\frac{S'}{S_j}\times 100\% \times t_s$$

(8)

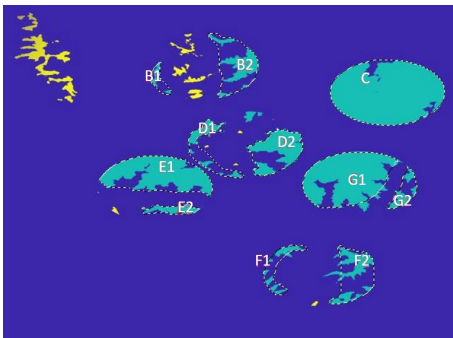


图7 感兴趣区域

2.3 航迹路径代价函数

由于在无人机航迹搜索过程中, $g(n)$ 与 $h(n)$ 对航迹的评估代价并不相同^[12],故采用加权评估的方法,通过仿真实验合理设定不同的权重系数 ω_1 、 ω_2 ($\omega_1+\omega_2=1$);巡查无人机在执行任务期间,为保证在安全距离平稳飞行,将飞行高度作为重要考虑因素之一,因此,将地形威胁程度 T_m ,大气威胁程度 T_w ,飞行高度代价 T_h 引入到实际代价函数 $g(n)$ 中,同样设定 ω_3 、 ω_4 、 ω_5 ($\omega_3+\omega_4+\omega_5=1$)进行约束,启发函数 $h(n)$ 表示无人机通过蛇形割圆法到达目标节点的预计轨迹路线距离,具体表达式为:

$$f(n)=\omega_1g(n)+\omega_2h(n)$$

(9)

$$g(n)=\omega_3T_m(n)+\omega_4T_w(n)+\omega_5T_h(n)$$

(10)

$$h(n)=L_{\min}(n)$$

(11)

3 仿真结果与分析

3.1 航迹规划环境模型

本文仿真实验所使用的计算机操作系统为Windows 10专业版,开发环境为MATLAB 2016b,所使用的数据均来自中国地震台网。假设无人机垂直方向的爬升角度在 -15° 至 $+15^\circ$ 范围中,飞行安全距离需大于50 m,垂直方向最大飞行距离为5 000 m,无人机巡查任务从基地H(110,0)(单位:km)处派出开始,到完成巡查任务返回到基地为止,巡查任务期间,在巡查视线不被障碍物

阻挡基础上,以及从灾区水平地面任意点观测无人机的最适仰角要小于 60° ,则该点被视为巡查点,要求在4小时内完成巡查海拔3 000 m以下灾区,通过改进的A*算法优化完成任务的无人机最小派出量,提高灾区巡查覆盖率,表1为巡查感兴趣区域所需时间。

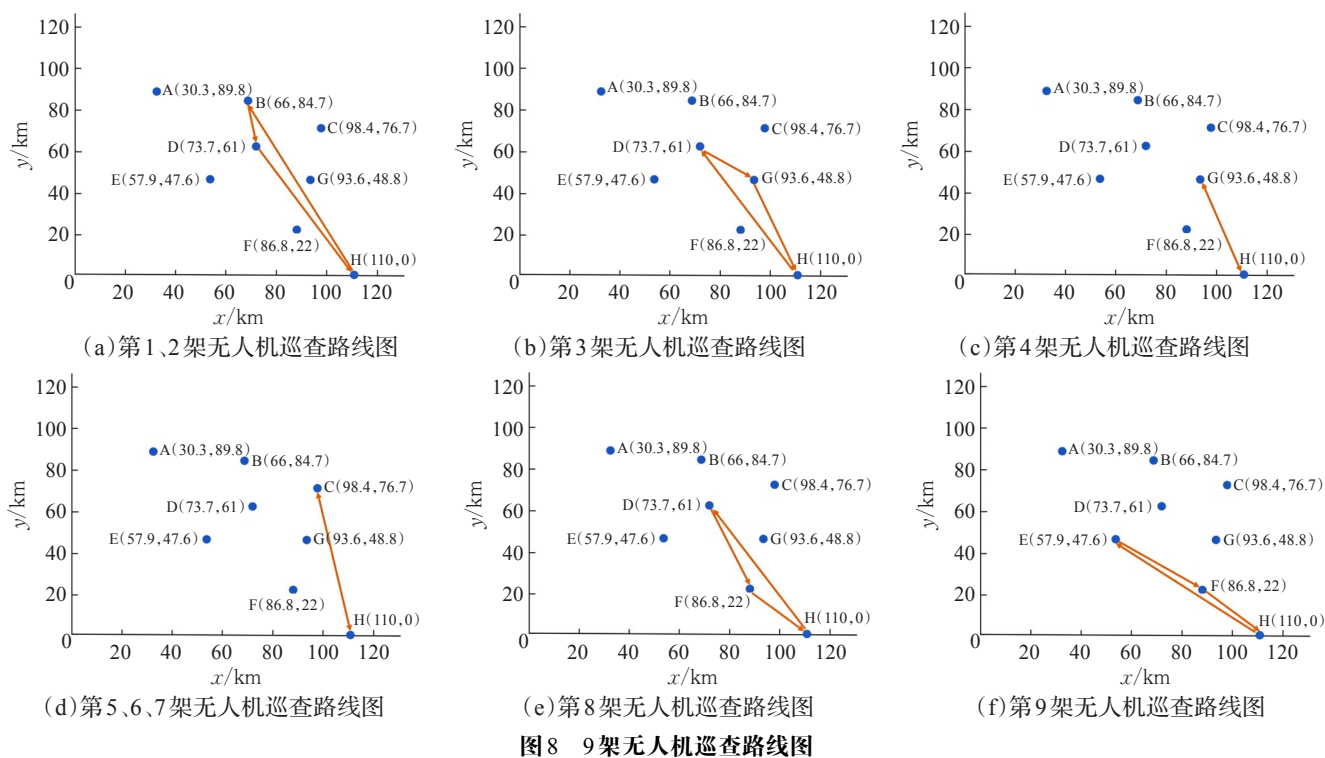
表1 巡查各感兴趣区域所需时间_h

区域中心点	巡查时间
B ₁	0.38
B ₂	1.10
C	3.40
D ₁	0.57
D ₂	1.12
E ₁	1.70
E ₂	0.43
F ₁	0.43
F ₂	0.85
G ₁	2.55
G ₂	0.43

灾后震区共有7个重点区域中心,且给定一个无人机基地H,将这8个位置点的每两点之间构成一段飞行轨迹,每段距离通过位置点坐标即可求出,由于无人机飞行速度恒定,其任意两个位置点之间单程时间亦可算出,距离及时间如表2所示结果。

表2 任意两点距离及时间

区域中心或基地代号	两点之间距离/km	两点之间单程时间/h
HA	120.067	2.00
HB	95.447	1.59
HC	77.572	1.29
HD	70.984	1.18
HE	70.570	1.18
HF	31.972	0.53
HG	51.482	0.86
AB	36.062	0.60
AC	69.349	1.16
AD	52.086	0.87
AE	50.424	0.84
AF	88.256	1.47
AG	75.418	1.26
BC	33.373	0.56
BD	24.919	0.42
BE	37.974	0.63
BF	66.060	1.10
BG	45.283	0.75
CD	29.267	0.49
CE	49.870	0.83
CF	55.916	0.93
CG	28.310	0.47
DE	20.717	0.35
DF	41.141	0.69
DG	23.342	0.39
EF	38.608	0.64
EG	35.720	0.60
FG	27.649	0.46



3.2 改进A*算法搜索路径结果

相比于传统的A*算法,本文改进的A*算法先是通过蛇形割圆法对巡查区域进行飞行路线规划,并通过提取感兴趣区域方式选择搜索方向,结合巡查各重点区域所需时间以及重点区域中心、基地各两点之间距离和单程飞行时间,得出如表3所示无人机飞行路线说明。

表3 无人机飞行路线说明表

飞行路径	各段飞行时间分布	巡查 时间/h	无人机 数量
H→B ₂ →D ₂ →H	1.59+0.55+0.42+0.21+1.18	3.94	2
H→D ₂ →G ₂ →H	1.18+0.7+0.39+0.43+0.86	3.56	1
H→G ₁ →H	0.86+2.28+0.86	4.00	1
H→C→H	1.29+1.14+1.29	3.72	3
H→D ₁ →F ₂ →H	1.18+0.57+0.69+0.85+0.53	3.82	1
H→E ₁ →F ₁ →H	1.18+1.22+0.64+0.43+0.53	4.00	1

从表3可以得出至少需要9架无人机执行此任务,现将9架无人机的飞行路线用不同颜色进行表示如图8(a)~(f)所示。

3.3 求解发现次生灾害巡查方案

次生灾害是震区常见现象,为了避免次生灾害造成二次灾害,制定使用无人机在震区海拔不高于4 000 m的震区(不限定在重点震区S)上空巡逻(假设无人机巡查速度不变)的方案,被巡查区域为蓝色区域如图9所示。

以无人机为中心,在起始点将周围①~⑧的点作为待扩展的方向点,依次判断8个方向是否满足以下3个条件:(1)非山体;(2)非震区边界;(3)该点未被巡查过。如果满足这3个条件,则无人机向该扩展方向继续巡查,经过多次训练,得出最优飞行规则模型如图10所示。

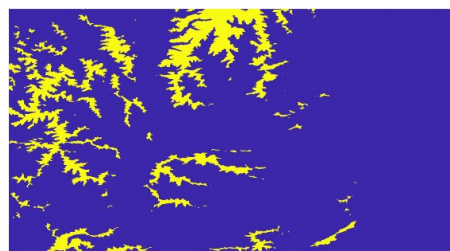


图9 震区海拔高度低于4 000 m区域(紫色部分)

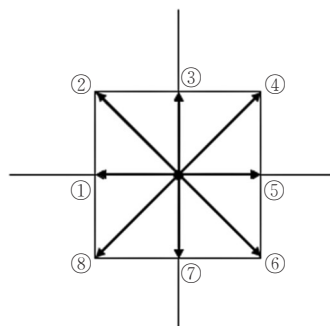


图10 无人机飞行规则模型示意图

考虑到无人机续航问题,无人机从巡查任务开始到返回基地H最大续航时间为8 h时,无人机可正常返回基地,基于以上无人机巡查要求,巡航直至将震区海拔高度低于4 000 m区域均巡查到,经目标模型计算,震区海拔高度低于4 000 m区域完全巡查一次需要39架次无人机,覆盖面范围图如图11所示。

对比传统A*算法,验证改进A*算法性能优良,通过将拓展节点数与巡查时间转化为面积覆盖率的指标进行评估,所谓拓展节点数与覆盖率反应的就是无人机巡航效果,如式(12)所示:

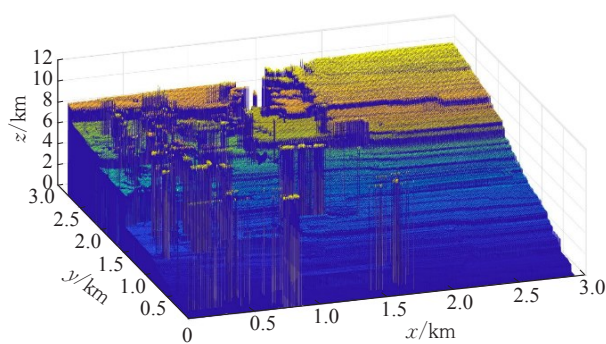


图 11 9架无人机巡航覆盖面积范围图

$$\eta = \frac{\sum_{i=A}^G t_i'}{\sum_{j=A}^G t_j'} \times 100\%$$

(12)

通过将上述表 1 无人机飞行感兴趣区域时间代入模型,计算得出本文算法的覆盖率为 88.96%,拓展节点数由 52 330 降至 15 324 个,文中方法在无人机航迹规划的巡查性能上具有重要的实际意义。

3.4 生命迹象探测

为了加快救援速度,将地震带来的伤害降到最低,需要无人机搭载生命探测装置来探测震区灾民生命的迹象,给救援队伍提供准确的灾民定位信息,拟从基地 H(110,0),J(110,55)(单位:km)处各派出 15 架无人机完成巡查任务,以合理分配无人机的数量和最短搜索时间为基础,优化出最优的飞行轨迹,从而提高无人机搜索灾民的效率。

通过将震区山体进行等海拔分层处理,计算巡查每层所需时间,将 30 架无人机合理分配到巡查区域,仿真软件将海拔 3 000 m 以下区域筛选出,并将全区域山体进行分层扫描,得到 2、3、4 层高面分层区域图如图 12 (a)~(c)所示。

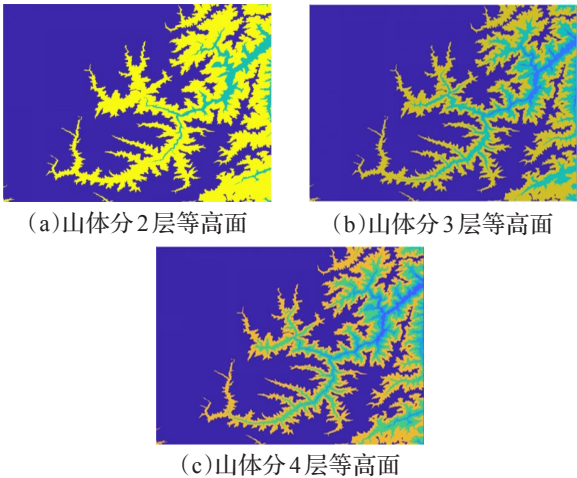


图 12 山体分 2 层、3 层、4 层等高面示意图

同理前文灾区巡查面积示意图,将无人机在巡查处到分层海拔层面积投影作为无人机巡查的单位面积,计

算无人机巡查每个等海拔层面所需时间,山体分 3 层时无人机巡查每个等海拔层面所需时间如表 4。

表 4 山体 2、3、4 层时巡查每个等海拔层面所需时间

分层	海拔高度/m	时长/h
2 层	黄色(2 118)	(51+369)
	绿色(2 118~3 059)	
3 层	黄色(1 726)	(8.3+44.4+106.2)
	绿色(1 726~2 374)	
	天蓝色(2 374~3 002)	
4 层	黄色(1 588.5)	交叉覆盖面积大, 不采取
	绿色(1 588.5~2 059)	
	天蓝色(2 059~2 529.5)	
	浅蓝色(2 529.5~3 000)	

当震区山体分为 2 层时,计算得知无人机巡查 2 059 m 海拔层面需要 51 h,巡查 3 000 m 海拔层面需要 369 h。题中拟派出 30 架无人机,每架无人机的最大续航时间为 8 h,因此一共最多有 240 h 可以用来巡查,小于震区山体分为 2 层时所需巡查时间,故按 2 层分割山体海拔并不能完成此巡查任务,不采取此分层次数;当震区山体分为 4 层时,相邻两层交叉覆盖面积太大,无人机巡查效率大大降低,且延长了巡查时间,故不采取此分层次数;则只有分 3 层方案符合实际规划需求。

为使第一架执行任务无人机从基地派出到最后一架完成任务的无人机飞回基地的整体任务时间尽量缩短,并规定每个层面被巡查时间不超过 2~3 h,则完成最终任务的最短时间为每层均被巡查完的最大时间。合理分配 H、J 两基地处各飞出的 15 架无人机,由于最高海拔层面积较大,需要无人机数量多,故将从 J 基地出发的 15 架无人机均派到最高海拔层巡查。此外,设从基地 H 处派往 1 726 m 海拔层面 2 架无人机,派往 2 374 m 海拔层面 x 架无人机,派往 2 059 m 海拔层面 y 架无人机。则应满足:

$$\text{s.t.} \begin{cases} 2+x+y=15 \\ 2 < 22.8/x < 3 \\ 2 < (54.44+52)/[(y+15)\times 2] < 3 \end{cases}$$

(13)

通过上述约束条件,求解得出从基地 H 处派往 1 726 m 海拔层面 2 架无人机,派往 2 374 m 海拔层面 9 架无人机,派往 2 059 m 海拔层面 4 架无人机,最短时间间隔为 2.8 h,且其飞行路线也应用问题一所建立的巡查路线模型程序求得,故不在此重述。

4 结束语

通过研究分析现有无人机在三维空间航迹规划算法,针对目前无人机在三维空间航迹规划使用 A*算法存在派出无人机数量多,规划轨迹长,巡查时间长的问

法在某灾区巡查问题中得到实际验证,文中算法所实现巡查覆盖率达88.96%。能够满足灾区无人机巡查任务实际需求,本文所设计的优化预测的航迹A*改进算法在灾区巡查任务中具有重要意义。

参考文献:

- [1] 谭雁英,李洋,周军,等.复杂环境下基于A*算法的无人机路径再规划[J].系统工程与电子技术,2017,39(6):1268-1273.
- [2] 卢青,周军,呼卫军.基于改进A*算法的滑翔飞行器轨迹规划[J].系统工程与电子技术,2016,38(12):2758-2763.
- [3] 占伟伟,王伟,陈能成,等.一种利用改进A*算法的无人机航迹规划[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(3):315-320.
- [4] 陈志旺,夏顺,李建雄,等.基于定向A*算法的多无人机同时集结分步策略[J].控制与决策,2019,34(6):1169-1177.
- [5] 张帅,李学仁,张鹏,等.基于改进A*算法的无人机航迹规划[J].飞行力学,2016,34(3):39-43.
- [6] 倪昌浩,邹海.在复杂地形下三维UAV航迹规划的改进A*算法[J].传感器与微系统,2021,40(2):136-138.
- [7] 吴鹏,桑成军,陆忠华,等.基于改进A*算法的移动机器人路径规划研究[J].计算机工程与应用,2019,55(21):227-233.
- [8] 王生印,龙腾,王祝,等.基于即时修复式稀疏A*算法的动态航迹规划[J].系统工程与电子技术,2018,40(12):2714-2721.
- [9] 马云红,张恒,齐乐融,等.基于改进A*算法的三维无人机路径规划[J].电光与控制,2019,26(10):22-25.
- [10] 陈海,王新民,焦裕松,等.一种凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划算法[J].航空学报,2010,31(9):1802-1808.
- [11] 李季,孙秀霞.基于改进A-star算法的无人机航迹规划算法研究[J].兵工学报,2008,29(7):788-792.
- [12] SUN X L, XIU X F, YAO W R, et al. Triple-stage path prediction algorithm for real-time mission planning of multi-UAV[J]. Electronics Letters, 2015, 51(19): 1490-1492.
- [13] TSAI Y J, LEE C S, LIN C L, et al. Development of flight path planning for multirotor aerial vehicles[J]. Aerospace, 2015: 171-188.
- [14] NUSKE S, CHOUDHURY S. Autonomous exploration and motion planning for an unmanned aerial vehicle navigating rivers[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(8): 1-22.
- [15] RYAN J L, BAILEY T G, MOORE J T, et al. Reactive tabu search in unmanned aerial reconnaissance simulations[C]//Proceedings of Winter Simulation Conference, 1998: 873-879.
- [16] 许金金,王敏,吴伟交.基于红外图像的车底藏人检测系统设计[J].计算机工程与应用,2013,49(3):69-73.
- [17] 李温温,刘富,姜守坤.指节纹图像感兴趣区域提取与特征识别算法[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(2):599-605.
- [18] 黄色吉,许燕玲,杨雪君,等.实时跟踪焊缝特征的感兴趣区域特征提取算法[J].上海交通大学学报,2016,50(12):1877-1880.
- [19] 郑继明,周大伟.基于视觉掩蔽特性的感兴趣区渐进图像传输[J].计算机工程与应用,2008,44(7):129-132.
- [20] 张清,刘慧霞,席庆彪.一种融合多特征的UAV快速目标识别[J].计算机工程与应用,2013,49(3):238-242.