

复杂山区环境下的应急无人机路径规划

彭 艺¹, 唐 剑^{1,2}, 杨青青¹

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500;
2. 邵阳工业职业技术学院 人工智能学院, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 针对复杂山区环境下应急通信无人机的飞行路径规划问题, 通过综合考虑障碍物、无人机载重量、无人机电池容量等约束条件, 为降低无人机的飞行时间并延长飞行距离, 基于 Harris 鹰算法框架设计一种改进 Harris 鹰算法的无人机三维路径规划方法. 首先, 对 Harris 鹰的种群初始位置、位置更新方程和猎物的逃逸能量进行改进; 其次, 采用三次样条曲线插值法对路径进行平滑, 以确保无人机飞行过程中安全可靠且平滑; 最后, 将应急无人机在具有不同障碍物的山区进行测试, 并将所得结果与标准 Harris 鹰、蚁群算法和人工蜂群算法进行对比分析. 分析结果表明, 该算法所规划的三维路径规划方法生成的路径更短, 并能更快地寻找到最优路径.

关键词: 路径规划; Harris 鹰算法; 无人机; 最优路径

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2025)02-0585-10

Emergency UAV Path Planning in Complex Mountainous Environment

PENG Yi¹, TANG Jian^{1,2}, YANG Qingqing¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. College of Artificial Intelligence, Shaoyang Industry Polytechnic College, Shaoyang 422000, Hunan Province, China)

Abstract: Aiming at the flight path planning problem of emergency communication unmanned aerial vehicle (UAV) in complex mountainous environment, by comprehensively considering the constraints such as obstacles, UAV load and UAV battery capacity, in order to reduce the flight time and extend the flight distance of UAV, based on the framework of Harris hawk algorithm, we designed a three-dimensional path planning method of UAV based on improved Harris hawk algorithm. Firstly, we improved the initial position of Harris hawk population, position update equation and escape energy of prey. Secondly, the path was smoothed by using cubic spline curve interpolation method to ensure safe, reliable and smooth operation of the UAV during flight. Finally, the emergency UAV was tested in mountainous areas with different obstacles, and the results were compared with the standard Harris hawk, ant colony algorithm and artificial bee colony algorithm. The analysis results show that the path generated by the three-dimensional path planning method planned by this algorithm is shorter and can find the optimal path faster.

收稿日期: 2023-08-04.

第一作者简介: 彭 艺(1976—), 女, 汉族, 博士, 副教授, 从事无人机路径规划的研究, E-mail: 527037928@qq.com. **通信作者简介:** 杨青青(1981—), 女, 汉族, 博士, 讲师, 从事无人机路径规划的研究, E-mail: 1061568608@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 61761025; 62461030)、云南省基础研究面上项目(批准号: 202401AT070415)和云南省基础研究重点项目(批准号: 202401AS070105).

Keywords: path planning; Harris hawk algorithm; unmanned aerial vehicle; optimal path

无人机作为科技发展的重要产物在各领域应用广泛,如农业生产、战场巡查、消防灭火、山区应急通信等,同时无人机在未来 6G 通信的空天地海一体化架构中是重要的组成部分。目前,对民用无人机的研究主要侧重于农业无人机^[1]和消防无人机^[2],而对应用于山区应急通信的无人机研究报道较少。实际应用中山区应急通信无人机需考虑的因素很多,主要有高海拔的山峰、受惊的鸟类和高耸的树木等。

无人机路径规划目前主要依靠智能优化算法求解。智能优化算法包括 A* 算法^[3]、蚁群算法^[4-5]、粒子群优化算法^[6]、遗传算法、萤火虫算法^[7]、生命周期群优化算法^[8]等。文献[9]针对 A* 算法步长固定,提出了一种变步长稀疏 A* 算法求解多无人机航迹规划。Dai 等^[10]提出了一种基于遮挡感知的航迹点生成算法。Jin 等^[11]对动态规划的时间复杂度过大问题,提出了动态规划-遗传算法(DPGA)提高动态规划的计算效率。Fountoulakis 等^[12]采用贪婪算法求解无人机的最优航道设计。文献[13]通过利用八叉树对环境进行建模,设计了一种基于非支配排序遗传算法 II(NSGA-II)和多目标路径规划(MOPP)方法,找到兼顾距离和安全性的无人机最佳无碰撞路径。文献[14]结合无人机的避障规则,通过引入相对速度、相对加速度,提出了一种基于改进人工势场的路径规划模型,有效解决了无人机避障问题。文献[15]利用位置分配模型和 Dijkstra 最优路径算法,结合路径分析等方法对疏散路径进行了合理的规划。文献[16]提出了能快速、准确提取玉米行中心线作为小型农业自动引导车(AGV)导航基准线的方法。文献[17]针对水下无人航行器路径规划,提出了一种基于地磁匹配辅助导航的改进 A* 算法路径规划方法。上述研究大部分考虑的是无人机在城市或其他简单地形环境中的路径规划。有些研究考虑将无人机三维路径规划问题简化成二维的机器人轨迹规划^[4-6]问题,但这种简化未考虑到无人机的运动特点和自身性能的约束。

基于以上分析,本文提出一种考虑动态山区环境下的改进 Harris 鹰群算法用于无人机路径规划。Harris 鹰算法^[18]适合在复杂的环境下寻找最优值,相比于传统智能算法,具有更快的计算速度和更好的全局搜索能力。基于山区应急通信的特点,以最小化路径飞行时间和最短飞行路径作为联合优化的目标函数,构建满足无人机在进行中继过程中避开障碍物的前提下,减少无人机电量消耗的路径规划模型,设计 Harris 鹰算法的路径快速搜索策略,寻找最优的无人机飞行路径。

1 无人机路径规划建模

1.1 问题描述

假设某山区遭遇突发状况导致通信中断,需要利用无人机进行中继通信。假设应急无人机均为充电式旋翼无人机^[4],为使无人机快速且在电量充足时到达预设的中继通信节点,需要对路径进行规划以保障山区被困人员的通信。

1.2 山区飞行环境建模

目前,对山区地形建模通常有函数模拟法和地形高程数据法^[3]。前者利用

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x-x_i}{x_{s_i}}\right)^2 - \left(\frac{y-y_i}{y_{s_i}}\right)^2\right\} \quad (1)$$

对山区地形进行模拟,其中: n 表示山峰数量; x, y 分别为山峰顶点水平投影面的横、纵坐标; z 为山峰顶点所对应的高度; (x_i, y_i) 表示第 i 个山峰的中心坐标; h_i 表示地形参数,用于控制山峰高度; x_{s_i} 和 y_{s_i} 分别表示第 i 座山峰沿 x 轴和 y 轴方向的衰减量,用于控制山峰坡度。后者通过对山区地形实际测得的数据利用插值模拟法模拟真实山区地形。本文采用函数模拟法随机生成山区地形,并对山区地形的山峰数量进行控制变量对照。

1.3 无人机路径规划的约束条件及模型

应急无人机需要综合考虑多种因素的影响,本文主要考虑应急无人机的性能约束和应急要求,从应急通信的紧迫性、快捷性和安全性等角度建立多约束条件应急无人机路径规划模型。

1.3.1 性能约束

1) 最大转弯角和最大爬升角.

受旋翼无人机自身机动性能和山区气候条件的影响,无人机的最大转弯角 α 和最大爬升角 β 受到限制. 该约束限制了无人机只能在一定的角度内进行爬升或下降.

图 1 为最大爬升角, 其中 a 点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , b 点坐标为 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$, l 为 a 点和 b 点之间的距离, l' 为 l 的投影线, α 为 l' 与 l 的夹角, 可表示为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{|z_{i+1} - z_i|}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}\right). \tag{2}$$

对最大爬升角有以下约束:

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}. \tag{3}$$

图 2 为最大转弯角, β 为 l' 与 x 轴平行线的夹角, 可表示为

$$\beta = \arctan \frac{|x_{i+1} - x_i|}{|y_{i+1} - y_i|}. \tag{4}$$

对最大转弯角有以下约束:

$$-\frac{\pi}{2} < \beta < \frac{\pi}{2}. \tag{5}$$

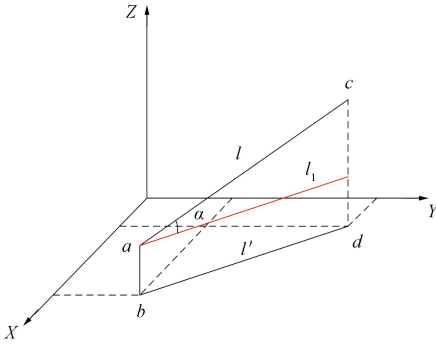


图 1 最大爬升角

Fig. 1 Maximum climbing angle

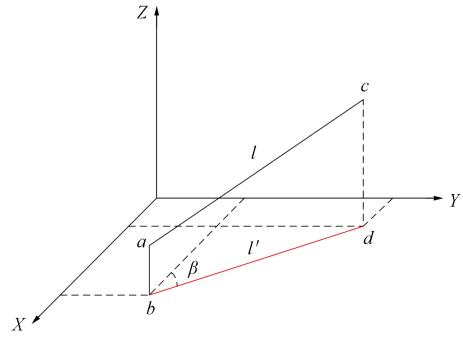


图 2 最大转弯角

Fig. 2 Maximum turning angle

2) 最远航程和最小路径.

在整个应急救援过程中,无人机的最远航程受电池电量的影响,因此无人机的最远航程总长度必须小于该无人机预先设置的最大距离. 同时,无人机由于自身的机动性能,其在改变飞行方向时,必须有一段直飞距离. 该约束限制了无人机的每段飞行距离必须大于最小路径. 假设每段距离为 $d_i (i \leq 0, 1, 2, \dots, k)$, 对最远航程有以下约束:

$$\sum_{i=1}^k d_i \leq d_{\max}, \tag{6}$$

其中 k 为路径段数, d_{\max} 为最远航程. 对最小路径有以下约束:

$$\forall d_i \geq d_{\min}, \tag{7}$$

其中 d_{\min} 为最小路径.

3) 最大携带质量.

应急无人机通常会携带一定数量的微型基站设备或中继设备^[19]. 针对不同应急场景和所需的中继距离不同,无人机携带的设备数量有一定差异,因此需考虑无人机的最大携带质量:

$$G_u \leq G_{\max}, \tag{8}$$

其中 G_u 为无人机携带的质量, G_{\max} 为无人机携带的最大质量.

4) 最小安全距离.

无人机在飞行过程中需避开障碍物,否则会发生碰撞. 无人机与障碍物之间存在一个最小安全距

离, 在飞行过程中, 与障碍物之间的距离需大于等于最小安全距离, 即

$$d_{wo} \geq d_{wo_min}, \quad (9)$$

其中 d_{wo_min} 为无人机与障碍物的最小安全距离, d_{wo} 为无人机与障碍物的距离.

1.3.2 路径规划模型

路径规划模型以安全和快捷为目标, 在满足应急要求的前提下, 尽量缩短飞行距离和飞行时间. 设模型的目标代价函数为 Z , 则

$$\min Z = \sigma Q + \bar{\omega} D + \iota F, \quad (10)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, \\ -\frac{\pi}{2} < \beta < \frac{\pi}{2}, \\ \sum_{i=1}^k d_i \leq d_{\max}, \\ \forall d_i \geq d_{\min}, \\ G_u \leq G_{\max}, \\ d_{wo} \geq d_{wo_min}, \end{cases} \quad (11)$$

其中 Z 为该模型的目标函数, $Q = \sum_{i=1}^k d_{wo} / d_{wo_min}$ 为危险度, D 为应急无人机飞行总距离, F 为最小迭代次数, σ 为危险度权重参数, $\bar{\omega}$ 为距离权重参数, ι 为迭代权重参数. 式(11)即为本文所需的约束条件.

2 算法设计

2.1 Harris 鹰优化算法

Harris 鹰优化(Harris hawk optimization, HHO)算法是一种模拟 Harris 鹰捕食行为的群智能优化算法. 该算法主要由搜索阶段、转换阶段、开发阶段三部分组成. 设种群中个体的位置为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 搜索空间的上界为 $u^b = (u_1^b, u_2^b, \dots, u_N^b)$, 下界为 $l^b = (l_1^b, l_2^b, \dots, l_N^b)$.

2.1.1 搜索阶段

Harris 鹰随机在某个位置栖息, 同时根据下列两种情况发现猎物:

$$X(\tau+1) = \begin{cases} X_{\text{rand}}(\tau) - r_1 |X_{\text{rand}}(\tau) - 2r_2 X(\tau)|, & q \geq 0.5, \\ (X_{\text{rabbit}}(\tau) - X_m(\tau)) - r_3(l^b + r_4(u^b - l^b)), & q < 0.5, \end{cases} \quad (12)$$

其中: $X(\tau)$ 和 $X(\tau+1)$ 分别表示当前个体位置和下一次迭代个体位置; τ 为迭代次数; X_{rand} 为随机选出的个体位置; $X_{\text{rabbit}}(\tau)$ 为猎物位置, 即具有最佳适应度的个体位置; $r_1 \sim r_4$ 和 q 均为 $[0, 1]$ 内的随机数; $X_m(\tau)$ 为个体平均位置, 表达式为

$$X_m(\tau) = \left[\sum_{k=1}^M X_k(\tau) \right] / M, \quad (13)$$

$X_k(t)$ 表示为第 τ 次迭代时第 k 个个体的位置; M 为 Harris 鹰的总数.

2.1.2 转换阶段

HHO 算法根据猎物逃逸能量的动态更新选择围捕阶段的开始时间和追捕策略, 逃逸能量定义为

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{\tau}{T} \right), \quad (14)$$

其中: E_0 表示猎物的初始能量, 为 $[-1, 1]$ 内的一个随机数; τ 表示当前迭代次数; T 表示总迭代次数. 当 $|E| \geq 1$ 时, 鹰群进入搜索阶段, 搜索猎物的位置; 当 $|E| < 1$ 时, 鹰群则进入开发阶段, 去寻找最优解.

2.1.3 开发阶段

当 Harris 鹰搜捕猎物时, 猎物会尝试逃脱危险, 因此 Harris 鹰需要根据逃逸能量 E 选取不同的包围方案.

1) 软包围策略.

当 $0.5 \leq E < 1$ 且 $r \geq 0.5$ 时, Harris 鹰采用软包围策略进行位置更新. 此时, 猎物还具有较大的逃逸能量, 尝试通过随机性的误导动作进行逃脱. Harris 鹰此时采取轻柔的方式包围猎物, 使猎物消耗更多的能量, 猎物更容易被抓捕, 可表示为

$$X(\tau + 1) = VX(\tau) - E | JX_{\text{猎物}}(\tau) - X(\tau) |, \tag{15}$$

其中 $VX(\tau) = X_{\text{猎物}}(\tau) - X(\tau)$ 表示猎物位置与当前个体的差值; r 为 $[0, 1]$ 内的随机数, r 的大小决定了 Harris 鹰的选择策略; J 为 $[0, 2]$ 内的随机数, 表示猎物在逃跑过程中的跳跃距离.

2) 硬包围策略.

当 $|E| < 0.5$ 且 $r \geq 0.5$ 时, Harris 鹰采用硬包围策略进行位置更新. 此时猎物的逃逸能量较少, Harris 鹰可采取强硬的方式去包围猎物.

$$X(\tau + 1) = X_{\text{猎物}}(\tau) - E | \Delta X(\tau) |. \tag{16}$$

3) 快速俯冲式软包围策略.

当 $0.5 \leq E < 1$ 且 $r \leq 0.5$ 时, Harris 鹰采用快速俯冲式软包围策略. 此时, 猎物仍具有足够的逃逸能量, 在突袭前先进行软包围, 然后进行快速俯冲. 针对该阶段采用 LF 函数模拟猎物在逃跑阶段的欺骗性行为:

$$X(\tau + 1) = \begin{cases} Y, & f(Y) < f(X(\tau)), \\ Z, & f(Z) < f(X(\tau)), \end{cases} \tag{17}$$

$$Y = X_{\text{猎物}}(\tau) - E | JX_{\text{猎物}}(\tau) - X(\tau) |, \tag{18}$$

$$Z = Y + S \cdot \text{LF}(2), \tag{19}$$

其中: $f(\cdot)$ 为适应度函数; S 为二维随机变量, 其元素均为 $[0, 1]$ 内的随机数; $\text{LF}(\cdot)$ 为 Lévy 飞行的函数表达式.

4) 快速俯冲式硬包围策略.

当 $|E| < 0.5$ 且 $r < 0.5$ 时, Harris 鹰采取快速俯冲式硬包围策略. 此时, 猎物没有足够的逃逸能量去逃脱, 在突袭前可直接构建硬包围, 然后进行快速俯冲, 表示为式(17)及

$$Y = X_{\text{猎物}}(\tau) - E | JX_{\text{猎物}}(\tau) - X_m(\tau) |. \tag{20}$$

2.2 改进的 Harris 鹰优化算法

2.2.1 初始种群的改进

初始种群的位置对算法的收敛速度有很大影响. 由于没有任何先验知识, 因此大部分智能体算法都采用随机生成种群位置. 本文采用通过计算复杂度较低的 Chan 算法计算出一个初始解, 然后从生成的初始种群中随机选择一个个体用初始解代替, 从而得到改进后的初始种群. 改进后的种群位置更接近最终的优化效果, 因此该改进可减少不必要的全局搜索达到快速收敛.

随机生成初始种群中个体的位置为

$$X = \text{rand}(1, 2, \dots, N) \times (u^b - l^b) + l^b, \tag{21}$$

其中 $\text{rand}(1, 2, \dots, N)$ 表示 N 维的随机向量, 其元素为 $[0, 1]$ 内的随机数.

2.2.2 位置更新方程的改进

本文在 Harris 鹰优化算法搜索阶段引入螺旋式方程^[20]对 Harris 鹰的位置进行更新, 提高了原算法的搜索能力. 随迭代次数的增加, 猎物的全局影响力得到加强, 加快了其他 Harris 鹰向猎物移动的速度, 从而加快了算法的收敛. 改进 Harris 鹰优化算法的位置更新方程为

$$X(\tau + 1) = | X_{\text{猎物}}(\tau) - X(\tau) | \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \left(1 - \frac{\tau^3}{T^3} \right) \cdot X_{\text{猎物}}(\tau), \tag{22}$$

其中 b 为对数螺旋形状常数, l 为 $[-1, 1]$ 内的随机数.

2.2.3 逃逸能量的改进

Harris 鹰优化算法的全局搜索和局部开发能力都取决于猎物的逃逸能量 E , 所以 E 的取值直接影响算法的收敛速度. 若逃逸能量 E 值较大, 则算法具有较强的全局搜索能力, 可避免陷入局部最优;

若逃逸能量 E 值较小, 则算法具有较强的局部开发能力, 可加强算法的收敛能力. 而在标准 Harris 鹰优化算法中, E 值是随迭代次数的增加而逐渐线性递减的. 这种线性递减导致算法的局部开发能力较弱, 同时影响算法的收敛能力. 因此, 本文采用一种非线性能量递减策略^[21], 通过调整惯性权重值的大小保证算法在初始状态以较大的惯性权值进行全局开发, 在迭代后期又以较小的固定权值进行更细致的局部寻优, 用公式可表示为

$$W = \frac{0.55}{\sqrt{1 + (k \cdot \tau/T)^{10}}} + 0.4, \quad (23)$$

其中 k 为非线性能量权重值, τ 为当前迭代次数, T 为迭代总次数. 由式(23)可知, 在算法迭代初期, 权重值可取到 0.95, 有利于算法在前期进行充分的搜索; 随着迭代次数的增加, 权重值逐渐减小到 0.4, 此时算法能更好地进行局部寻优. 此时的逃逸能量定义为

$$E = 2E_0W. \quad (24)$$

图 3 为非线性能量递减因子和线性能量递减因子随迭代次数的变化曲线. 由图 3 可见: 非线性能量递减策略在前期有一个较大值, 从而保证了前期有一个较优的搜索能量; 随着迭代次数的增加, 逃逸能量迅速衰减, 并逐渐维持在一个稳定的较小值范围内, 从而保证了算法后期的局部开发能力.

2.3 三维轨迹平滑处理

经上述算法形成的三维轨迹是由多条线段组成的, 这些线段并不是完全连续的, 因此需进一步对三维轨迹进行优化平滑处理.

三次样条曲线具有计算简单、收敛性好、稳定性好等优点, 在工程问题中应用广泛. 本文采用三次样条曲线对得到的三维轨迹进行平滑处理.

设在 $[a, b]$ 内取 $(n+1)$ 个节点, $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$, 这些节点的函数值如下:

$$y(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (25)$$

三次样条插值方程 $S(x)$ 满足以下条件:

- 1) 在每段区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上, $S(x) = S(x_i)$ 均为一元三次方程;
- 2) 满足插值条件, $S(x_i) = y_i (i = 0, 1, \dots, n)$;
- 3) 曲线光滑, $S(x)$ 、一阶导数 $S'(x)$ 、二阶导数 $S''(x)$ 都连续.

三次样条插值方程在每个区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上的表达式为

$$S(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad (26)$$

其中 a_i, b_i, c_i, d_i 为待定系数, 因此 $S(x)$ 有 $4n$ 个待定系数法. 由式(24)知有 $(n+1)$ 个插值条件; 由条件 1) 可知 $S(x)$ 在 $(n-1)$ 个插值处也必然连续:

$$\begin{cases} S_-(x_i) = S_+(x_i), & i = 1, 2, \dots, n-1, \\ S'_-(x_i) = S'_+(x_i), & i = 1, 2, \dots, n-1. \end{cases} \quad (27)$$

通过式(27)可得到 $(2n-2)$ 个条件, 至此, 共有 $(4n-2)$ 个条件, 再补充 2 个边界条件即可确定三次样条插值方程 $S(x)$.

常用的边界条件有 3 种:

- 1) 固定边界, 给出第一个节点和最后一个节点的一阶导数值;
- 2) 自然边界, 给出两个端点处的二阶导数值;
- 3) 非节点边界, 第二个和倒数第二个节点处的三阶导数连续.

2.4 改进算法

算法 1 改进的 Harris 鹰优化算法.

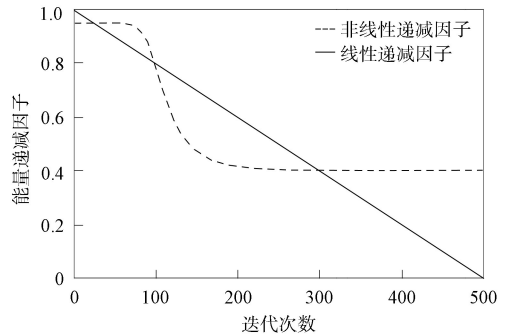


图 3 能量递减因子随迭代次数的变化曲线

Fig. 3 Curves of energy decreasing factors with number of iterations

输入: 种群规模 N , 最大迭代次数 T ;

输出: $X_{\text{猎物}}$;

步骤 1) 在边界 $[lb, ub]$ 内初始化种群 $X_i (i=1, 2, \dots, N)$, 根据式(21)随机生成种群位置, 设置迭代次数 $\tau=0$;

步骤 2) while $\tau < T$ (终止条件不满足) do

步骤 3) 计算 Harris 鹰的适应度值;

步骤 4) 设置 $X_{\text{猎物}}$ 作为猎物的位置(最优位置);

步骤 5) for (每个 Harris 鹰个体(X_i)) do

步骤 6) 根据螺旋式位置更新方程(22)计算个体适应度, 并更新 $X_{\text{猎物}}$;

步骤 7) 根据非线性能量递减策略式(24)更新逃逸能量 E ;

步骤 8) if ($|E| \geq 1$) then //搜索阶段

步骤 9) 根据式(12)更新 Harris 鹰位置;

步骤 10) else if ($|E| < 1$) then //搜索阶段

步骤 11) if ($|E| \geq 0.5, r \geq 0.5$) then //软包围

步骤 12) 根据式(15)更新位置;

步骤 13) else if ($|E| < 0.5, r \geq 0.5$) then //硬包围

步骤 14) 根据式(16)更新位置;

步骤 15) else if ($|E| \geq 0.5, r < 0.5$) then //快速俯冲式软包围

步骤 16) 根据式(17)更新位置;

步骤 17) else if ($|E| < 0.5, r < 0.5$) then //快速俯冲式硬包围

步骤 18) 根据式(17)更新位置;

步骤 19) end if

步骤 20) end for

步骤 21) end while

步骤 22) return $X_{\text{猎物}}$.

3 仿真分析

本文在 MATLAB2020a 环境下对改进的 HHO 算法进行仿真测试, 并与标准 HHO 算法、蚁群算法和人工蜂群算法进行比较。

3.1 仿真环境及参数设置

首先, 生成 $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m} \times 600\ \text{m}$ 的模拟山区地形环境, 将该环境作为应急无人机的飞行环境。本文采用 MATLAB 对环境进行建模, 结果如图 4 和图 5 所示。为多方面验证算法的有效性和可靠性, 算法需要在多个不同环境下进行验证。为验证算法在复杂山区的动态避障能力, 在动态障碍物环境中随机生成一定数量的圆点, 以此代替山区可能出现的动态障碍物, 如鸟类、落叶等。本文分别在静态障碍物环境和动态障碍物环境下进行模拟仿真, 仿真环境如图 4 和图 5 所示。不同环境的障碍物数量和分布位置存在差异, 其他参数均一致。参数设置列于表 1。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

参数	参数值	参数	参数值
最远路径长度 d_{max}/m	3 000	危代价权重 σ	0.3
最大爬升角 α/rad	$\pi/2$	距离代价权重 $\bar{\omega}$	0.4
最大转弯角 β/rad	$\pi/2$	迭代代价权重 ϵ	0.3
起始点坐标	(0,0,0)	种群数量	30
终点坐标	(100,100,400)	最大迭代次数	100

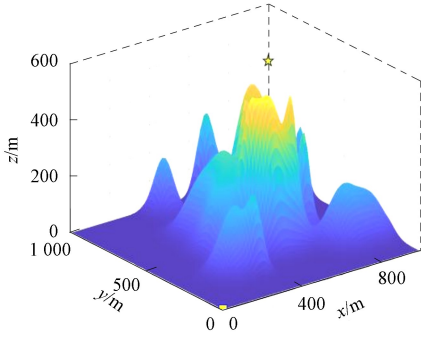


图 4 静态障碍物环境

Fig. 4 Static obstacle environments

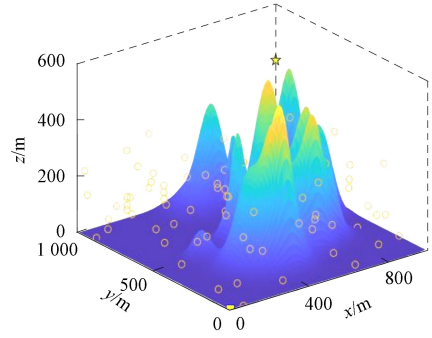


图 5 动态障碍物环境

Fig. 5 Dynamic obstacle environments

3.2 静态障碍物环境

表 2 列出了不同算法在静态障碍物环境下的性能比较. 由表 2 可见, 改进后的 Harris 鹰算法在该静态障碍物环境下寻找最优路径比标准 Harris 鹰算法、蚁群算法和人工蜂群算法更快, 并且寻找到的最优路径更短, 更接近理论最优值. 图 6 和图 7 分别为基于改进 Harris 鹰算法的应急无人机在静态障碍物山区环境的三维飞行轨迹图和俯视图. 由图 6 和图 7 可见, 改进的 Harris 鹰算法找到的路径能更快到达终点位置.

表 2 不同算法在静态障碍物环境下的性能对比

Table 2 Performance comparison of different algorithms in static obstacle environments

参数	改进的 Harris 鹰算法	标准 Harris 鹰算法	蚁群算法	人工蜂群算法
100 次实验所用时间平均值/s	93.27	96.61	97.39	219.82
100 次实验所得最短距离/m	1 464	1 471	1 469	1 474
平均最小迭代次数	54	62	58	65

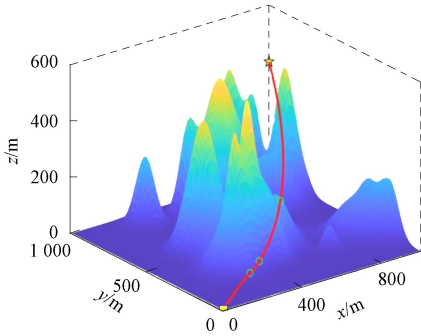


图 6 静态障碍物环境下的最优路径轨迹

Fig. 6 Optimal path trajectory in static obstacle environments

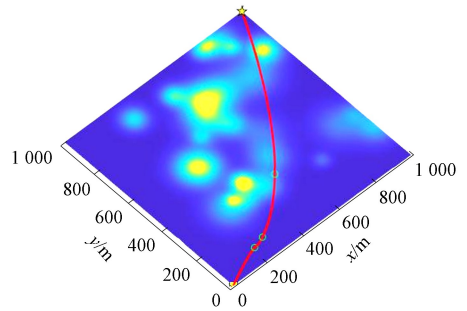


图 7 静态障碍物环境下的最优路径俯视图

Fig. 7 Top view of optimal path in static obstacle environments

3.3 动态障碍物环境

表 3 列出了不同算法在动态障碍物环境下的性能比较. 由表 3 可见, 相比于标准 Harris 鹰算法、蚁群算法和人工蜂群算法, 改进后的 Harris 鹰算法在动态障碍物的山区环境下也能在最短的时间内找到最优路径.

表 3 不同算法在动态障碍物环境下的性能比较

Table 3 Performance comparison of different algorithms in dynamic obstacle environments

参数	改进的 Harris 鹰算法	标准 Harris 鹰算法	蚁群算法	人工蜂群算法
100 次实验所用时间平均值/s	94.23	97.35	97.74	210.19
100 次实验所得最短距离/m	1 464	1 474	1 473	1 475
平均最小迭代次数	56	67	59	66

图 8 和图 9 分别为基于改进 Harris 鹰算法的应急无人机在动态障碍物山区环境的三维飞行轨迹

图和俯视图。由图 8 和图 9 可见, 即使在动态障碍物环境下, 改进的 Harris 鹰算法仍能找到合适的路径。

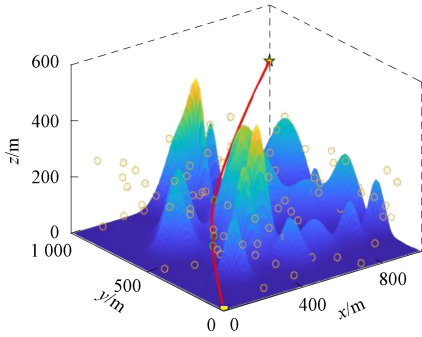


图 8 动态障碍物环境下的最优路径轨迹

Fig. 8 Optimal path trajectory in dynamic obstacle environments

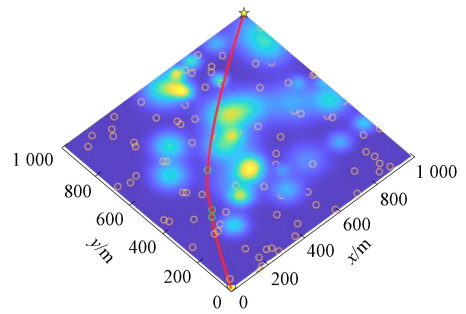


图 9 动态障碍物环境下的最优路径俯视图

Fig. 9 Top view of optimal path in dynamic obstacle environments

3.4 结果分析

通过分析图 6~图 9 和表 2、表 3 可见, 本文算法在静态障碍物环境和动态障碍物环境下的路径规划表现均优于标准 Harris 鹰算法、蚁群算法和人工蜂群算法。同时, 与其他智能算法相比, 本文算法在达到最优状态时所需的迭代次数更少、收敛速度更快、代价需求更小, 更适合在复杂山区环境中应用。

综上所述, 针对复杂山区环境下应急通信无人机的飞行路径规划问题, 本文提出了一种改进的 Harris 鹰算法路径规划, 引入无人机的自身性能和任务需求作为约束条件。实验结果表明, 改进的 Harris 鹰算法生成的路径比标准 Harris 鹰、蚁群算法和人工蜂群算法得到的路径更短, 所需时间也更少。本文考虑了山区环境模型, 通过随机生成山峰保证无人机在复杂山区也能保持优异的性能; 同时考虑了随机产生不同数量的障碍物, 保证无人机在复杂山区环境中能安全到达目的点。仿真验证结果表明, 基于改进的 Harris 鹰算法的无人机能安全地在复杂山区环境中到达目的点。

参 考 文 献

- [1] 王宇, 王文浩, 徐凡, 等. 基于改进蚁群算法的植保无人机路径规划方法 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 103-112. (WANG Y, WANG W H, XU F, et al. Path Planning Approach Based on Improved Ant Colony Optimization for Sprayer UAV [J]. Agricultural Machinery Journal, 2020, 51(11): 103-112.)
- [2] 史博辉. 面向森林火情的无人机航迹规划算法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021. (SHI B H. Research on UAV's Path Planning Algorithm for Forest Fire [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.)
- [3] 张启钱, 许卫卫, 张洪海, 等. 复杂低空物流无人机路径规划 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(7): 1275-1286. (ZHANG Q Q, XU W W, ZHANG H H, et al. Non-entry Path Planning for Complex Low-Altitude Logistics [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(7): 1275-1286.)
- [4] 唐立, 郝鹏, 张学军. 基于改进蚁群算法的山区无人机路径规划方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 158-164. (TANG L, HAO P, ZHANG X J. An UAV Path Planning Method in Mountainous Area Based on an Improved Ant Colony Algorithm [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(1): 158-164.)
- [5] LI B, QI X G, YU B G, et al. Trajectory Planning for UAV Based on Improved ACO Algorithm [J]. IEEE Access, 2019, 8: 2995-3006.
- [6] SONG B Y, WANG Z D, ZOU L, et al. On Global Smooth Path Planning for Mobile Robots Using a Novel Multimodal Delayed PSO Algorithm [J]. Cognitive Computation, 2017, 9: 5-17.
- [7] GOEL U, VARSHNEY S, JAIN A, et al. Three Dimensional Path Planning for UAVs in Dynamic Environment Using Glow-Worm Swarm Optimization [J]. Procedia Computer Science, 2018, 133: 230-239.
- [8] LIU H S, CHEN Q Y, PAN N, et al. Three-Dimensional Mountain Complex Terrain and Heterogeneous Multi-UAV Cooperative Combat Mission Planning [J]. IEEE Access, 2020, 8: 197407-197419.

- [9] BO N, LI X M, DAI J J, et al. A Hierarchical Optimization Strategy of Trajectory Planning for Multi-UAVs [C]//2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 294-298.
- [10] DAI R, FOTEDAR S, RADMANESH M, et al. Quality-Aware UAV Coverage and Path Planning in Geometrically Complex Environments [J]. *Ad Hoc Networks*, 2018, 73: 95-105.
- [11] JIN Z R, LIANG Z, ZOU Z L, et al. 3D Trajectory Planning of UAV Based on DPGA [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 105667-105677.
- [12] FOUNTOULAKIS E, PASCHOS G S, PAPPAS N. UAV Trajectory Optimization for Time Constrained Applications [J]. *IEEE Networking Letters*, 2020, 2(3): 136-139.
- [13] CHAI S Q, LAU V K N. Multi-UAV Trajectory and Power Optimization for Cached UAV Wireless Networks with Energy and Content Recharging-Demand Driven Deep Learning Approach [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(10): 3208-3224.
- [14] YAN S K, PAN F, XU J H, et al. Research on UAV Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method [C]//2022 2nd International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 1-5.
- [15] 李玉堂, 赵竞争, 王民水, 等. 基于位置分配模型的避震疏散最优路径规划 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(6): 2018-2028. (LI Y T, ZHAO J Z, WANG M S, et al. Optimal Path Planning for Earthquake Evacuation Based on Location Allocation Model [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(6): 2018-2028.)
- [16] 刘浩, 宫金良, 张彦斐. 基于作物行特征的小型农业 AGV 导航基准线提取方法 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 296-301. (LIU H, GONG J L, ZHANG Y F. Extraction Method of Navigation Reference Line for Small Agricultural AGV Based on Crop Row Characteristics [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 296-301.)
- [17] 孙齐, 卞强, 童余德. 基于地磁匹配辅助导航的改进 A* 算法路径规划 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(6): 696-703. (SUN Q, BIAN Q, TONG Y D. Path Planning of Improved A* Algorithm Based on Geomagnetic Matching Aided Navigation [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2023, 44(6): 696-703.)
- [18] AAHA B, SM C, HF D, et al. Harris Hawks Optimization: Algorithm and Applications [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 97: 849-872.
- [19] 彭艺, 唐剑, 杨青青, 等. 基于强化学习的应急无人机通信中继选择策略 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(7): 9-15. (PENG Y, TANG J, YANG Q Q, et al. Relay Selection Strategy for Emergency UAV Communication Based on Reinforcement Learning [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(7): 9-15.)
- [20] 肖剑, 张凯, 高凡, 等. 基于改进 HHO 算法的螺纹钢丝头中径测量方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(10): 48-55. (XIAO J, ZHANG K, GAO F, et al. Pitch Diameter Measurement of Threaded Steel Wire Head Based on Improved HHO Algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(10): 48-55.)
- [21] 华勇, 王双园, 白国振, 等. 基于惯性权值非线性递减的改进粒子群算法 [J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(2): 1-9. (HUA Y, WANG S Y, BAI G Z, et al. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Nonlinear Decreasing Inertial Weights [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2021, 38(2): 1-9.)

(责任编辑: 韩 啸)