

文章编号:1674-8190(2022)01-060-08

基于改进启发式蚁群算法的无人机自主航迹规划

辛建霖,左家亮,岳龙飞,张宏宏
(空军工程大学空管领航学院,西安710051)

摘要: 无人机自主航迹规划是未来无人机作战使用的关键技术难题。针对传统航迹规划方法存在的求解效率不高、实时性较差、容易陷入局部最优等缺点,提出一种基于改进启发式蚁群算法的无人机自主航迹规划算法。该算法前期使用Dijkstra算法进行初始化航迹,引入启发式信息,提高搜索效率;采用Logistic混沌映射初始化信息素,增加解的多样性,提高算法收敛速度;算法中、后期采用多航迹选择策略和模拟退火机制,提高全局搜索能力,避免因收敛速度过快而陷入局部最优解。对该算法进行仿真分析,结果表明:在存在威胁和障碍的复杂环境中,本文提出的改进启发式蚁群算法与标准蚁群算法相比,能够有效规划出一条从起点到终点的航迹,并且寻优精度更高,收敛速度更快,具有一定的应用价值。

关键词: 无人机;航迹规划;Dijkstra算法;Logistic混沌;蚁群算法;模拟退火算法

中图分类号: V249.1; V279

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.01.06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Autonomous Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Based on Improved Heuristic Ant Colony Algorithm

XIN Jianlin, ZUO Jialiang, YUE Longfei, ZHANG Honghong

(College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Autonomous path planning of UAV is a key technical problem for future UAV operation. In view of the shortcomings of traditional route planning methods, such as low efficiency, poor real-time performance, easy to fall into local optimum, an improved heuristic ant colony algorithm for UAV route planning is proposed. In the early stage of the algorithm, Dijkstra algorithm is used to initialize the track, and heuristic information is introduced to improve the search efficiency. Logistic chaotic map is used to initialize pheromone, so that the diversity of solutions can be increased and the convergence speed of the algorithm can be improved. In the middle and late stage of the algorithm, multi-track selection strategy and simulated annealing mechanism are used to improve the global search ability of the algorithm, which avoid falling into local optimum due to too fast convergence speed solution. The simulation results show that, compared with the basic ant colony algorithm, the improved ant colony algorithm can plan a path from the start to the end effectively in the complex environment with threats and obstacles. It also has higher optimization accuracy and faster convergence speed, which is of applicable value.

Key words: UAV; route planning; Dijkstra algorithm; Logistic chaos; ant colony algorithm; simulated annealing algorithm

收稿日期:2021-01-29; 修回日期:2021-05-19

基金项目:国家社会科学基金(2020-SKJJ-C-034);国家社会科学基金军事学项目(2019-SKJJ-C-026)

通信作者:左家亮, jialnzuo@163.com

引用格式:辛建霖,左家亮,岳龙飞,等.基于改进启发式蚁群算法的无人机自主航迹规划[J].航空工程进展,2022,13(1):60-67.

XIN Jianlin, ZUO Jialiang, YUE Longfei, et al. Autonomous path planning for unmanned aerial vehicle(UAV) based on improved heuristic ant colony algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 60-67. (in Chinese)

0 引言

随着科学技术的发展,现代战争信息化、智能化程度逐渐提高,使得无人机的应用发展受到更多关注^[1]。无人机航迹规划是无人机作战应用的关键环节,其目的是在满足各种约束条件的前提下(无人机性能、飞行安全性、任务目标等),寻找一条最优或较优航迹^[2]。航迹规划经历了从手动绘制到计算机自动解算两个阶段,研究内容主要包括:地形和威胁等环境要素的表示方法分析、基于任务需求的目标函数构造、满足飞行距离和转弯半径等限制因素的约束条件处理、针对实时性和协同性等需求的航迹搜索算法研究^[3]。现有的航迹规划已可以满足一定的应用需求,例如,田疆等^[4]提出了一种改进连接型快速扩展随机树算法,可用于复杂环境下的无人机三维航迹规划,但在实时性、高效性、协同航迹规划和可替换航迹规划等方面仍然存在一些不足^[4-6]。

航迹规划算法主要分为两大类,一类是经典算法,如最优控制法、动态规划法等;另一类是智能算法^[7],如人工势场法、粒子群算法、遗传算法、蚁群算法等。最优控制法把航迹规划问题转化为最优控制问题,建立最优控制模型进行求解,但这种方法对初始值要求较高,建模和求解较为复杂。遗传算法模拟生物遗传进化过程,求解航迹规划问题高效、鲁棒性强,但算法容易早熟收敛,局部搜索能力较差。李涵等^[8]在歼轰机突防突击过程中,运用改进的遗传算法进行了航线规划,但其计算模型考虑因素较少,模型尚不完善。蚁群算法(Ant Colony Algorithm,简称 ACO)^[9]是一种基于对蚂蚁群体觅食行为的研究而提出的搜索算法,具有鲁棒性好、正反馈能力强的优点,但面对复杂问题时,容易出现算法停滞、陷入局部最优、运算时间过长等问题。为此,国内外对 ACO 算法提出了许多改进措施。陈雄等^[10]对信息素挥发系数进行动态调整,用优化参数的方式有效解决了算法停滞的问题,但改进后算法不够灵活;B. Bullheimer 等^[11]引入精英蚂蚁策略,通过改进算法结构提高最优和次优路径的引导能力,但收敛速度较慢;Wang L 等^[12]采用融合遗传算法的方式提升 ACO 算法的寻优能力,但算法适应性较差。

本文提出一种改进启发式蚁群算法(Improved Heuristic Ant Colony Algorithm,简称 IH-

ACO)的无人机自主航迹规划算法,通过引入 Dijkstra 算法、Logistic 混沌映射、多航迹选择策略、模拟退火机制的方法对 ACO 算法进行改进,以提高算法初期的搜索效率,增强全局寻优能力,平衡收敛速度与全局寻优能力之间的矛盾,增强算法在复杂环境中的搜索性能,并对算法进行仿真分析。

1 航迹规划问题描述及环境建模

1.1 问题描述

针对无人机在作战任务中穿越地形障碍、躲避敌方地对空导弹威胁的航迹规划,简化运行环境并进行如下假设^[13]:(1)简化模型,将无人机简化为质点;(2)假设无人机在执行任务中,保持一定的飞行高度和速度,在二维有限空间进行移动;(3)假设地形障碍、地空导弹火力覆盖范围已知,并用多边形进行表示(通常地空导弹火力覆盖为圆形区,这里简化模型,用正方形区域表示)。

1.2 空间建模

在航迹规划中,常用的空间建模方法有 VORONOI 法^[14]、栅格图法^[15]、链接图法^[16]等,其中链接图法具有简化模型占用内存少、效果好的优点,故本文采用链接图法构造二维空间模型,生成规划可用空间,如图 1 所示,在 MATLAB 环境中构造 200 km × 200 km 的二维空间,存在 4 个不规则多边形表示的障碍区域、多条自由链接线(黑色虚线表示)和初始点 T 和终止点 U ,链接各链接线中点、初始点 T 和终止点 U ,生成初始航迹规划网络图(黑色实线表示)。

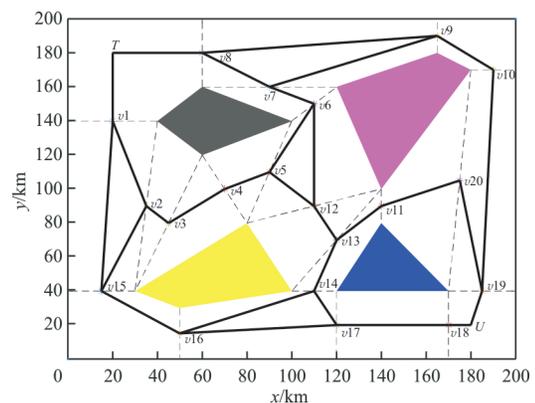


图 1 链接图法构造二维空间模型图

Fig. 1 Construction of two dimensional space model graph by link graph method

1.3 航迹点的构造

生成一条由初始点 T 到终止点 U 的航迹,需要通过二维空间模型中的 j 条链接线,航迹与链接线存在 j 个交点,设每条自由链接线两个端点分别为 $Q_j^{(0)}$ 和 $Q_j^{(1)}$,链路上其他点表示为^[17]

$$Q_j(h_j) = Q_j^{(0)} + [Q_j^{(1)} - Q_j^{(0)}] \times h_j$$

$$(h_j \in [0, 1], j = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中: h_j 为比例参数; j 为与航迹相交的链接线数。

通过式(1)可知,用 h_1, h_2, \dots, h_j, T 和 U 可以表示一条从起始点到终止点的航迹。

1.4 建立目标函数

在无人机飞行穿越地形障碍、躲避敌方地对空导弹威胁时需要进行航迹规划,航迹规划的任务是根据起始点和目标点的位置,在避开地形障碍区、导弹威胁区的前提下,找到一条最短航迹,保证无人机能够安全、快速通过^[18]。目标函数为

$$Length = \min \{Length(iter, m)\} \quad (2)$$

式中: $Length(iter, m)$ 为航迹长度(在第 $iter$ 次迭代第 m 只蚂蚁的情况)。

2 蚁群算法改进

2.1 Dijkstra 算法规划初始航迹

为了改善 ACO 算法前期搜索效率差的问题,运用典型的最短路径算法^[19],在算法求解出一个节点到其他节点的最短航迹的基础上,确定起始点到终止点的一条较优航迹,以减少 ACO 算法前期搜索的盲目性。Dijkstra 算法的基本思想是先把二维模型中的节点分为两组,一组为已确定最短航迹的节点,另一组为未确定最短航迹的节点,按最短航迹长度递增的顺序逐个把未确定的节点加入已确定的一组中,直到所有节点都成为已确定的节点,即可得到一条从起始点到终止点的较优航迹。Dijkstra 算法流程如图 2 所示。

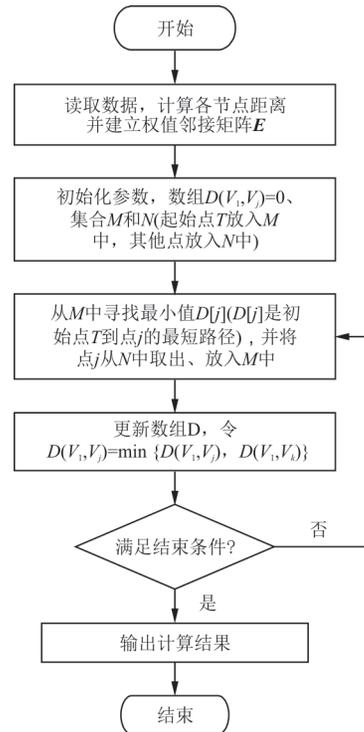


图 2 Dijkstra 算法初始化航迹流程图^[20]

Fig. 2 Flow chart of Dijkstra algorithm initialization track^[20]

2.2 引入 Logistic 混沌映射初始化信息素

为了避免蚁群停滞在局部搜索,提高算法收敛速度,引入混沌扰动。混沌是在确定性系统中存在的随机情况,表现为类似随机的非随机运动现象,其具有规律性、遍历性、随机性等特点。本文在初始化信息素阶段应用 Logistic 混沌映射。Logistic 混沌映射方程^[21]:

$$X_{j,k}(t+1) = \mu X_{j,k}(t) [1 - X_{j,k}(t)] \quad (3)$$

式中: $X_{j,k}(t)$ 为混沌变量; μ 为控制变量。

当 $\mu = 4, 0 \leq X_{j,k}(0) \leq 1$ 时,式(3)处于混沌状态。

信息素中引入 Logistic 混沌映射:

$$\tau_{j,k}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{j,k}(t) + \Delta\tau_{j,k}(t) + \zeta X_{j,k}(t) \quad (4)$$

式中: ζ 为可调节参数。

2.3 多航迹选择策略

在 ACO 算法中,状态转移规则直接影响了搜索解的质量和效率,将真实蚂蚁在前进中对信息素利用、对新航迹的探索以及一些“随机行为”引入状态转移规则,采用多航迹选择策略对基本状

态转移规则进行改进,公式^[22]为

$$P_{j,k} = \begin{cases} \arg \max_{k \in J} \{ [\tau_{j,k}]^\alpha \cdot [\eta_{j,k}]^\beta \} & (m \leq m_0) \\ \frac{[\tau_{j,k}]^\alpha \cdot [\eta_{j,k}]^\beta}{\sum_{w \in L} [\tau_{j,w}]^\alpha \cdot [\eta_{j,w}]^\beta} & (m_0 < m \leq m_1) \\ \text{Random}(j) & (m > m_1) \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_0, m_1 为常数且 $0 < m_0 < 1, 0 < m_1 < 1$; m 为随机数且 $0 < m < 1$ 。

当 $m \leq m_0$ 时,从可行航迹点中找出 $[\tau_{j,k}]^\alpha \cdot [\eta_{j,k}]^\beta$ 最大的航迹点;当 $m_0 < m \leq m_1$ 时,使用ACO算法的状态转移规则选择航迹点;当 $m > m_1$ 时,随机选择下一个航迹点。这种设计很好地保证了解的多样性,同时避免算法因收敛速度快而陷入局部最优的情况。

2.4 模拟退火算法

Metropolis 研究发现一般组合优化问题和固体物质退火过程中物理系统的能量变化具有相似性,进而提出了模拟退火优化算法。固体物质退火分为升温、等温、降温三个阶段,高温阶段固体升温,内能增加,固体内的粒子无序运动速度快,此过程与算法设置的初始温度对应;等温阶段固体与外界保持热平衡状态,此过程与算法设置Metropolis抽样准则对应;退火阶段固体温度降低、内能减小,粒子趋于有序,最终达到稳定状态,此过程与算法控制参数减小相对应。使用Metropolis抽样准则接受一定条件下的劣解,有效避免陷入局部最优,以达到收敛全局最优解的效果。模拟退火算法流程^[23]如下:

(1) 初始化:设置系统温度为 T ,初始温度 $T(0) = T_0$,任取初始解 S_1 ,确定每个 T 时的迭代次数,即Metropolis链长 L 。

(2) 对当前温度 T 和 $k = 1, 2, \dots, L$,重复步骤(3)~步骤(6)。

(3) 对当前解 S_1 进行随机扰动,得到新解 S_2 ;

(4) 设置增量为 $df, df = f(S_2) - f(S_1), f(S_1)$ 为 S_1 的代价函数。

(5) 根据Metropolis准则,公式为

$$P = \begin{cases} 1 & (df < 0) \\ e^{-\frac{df}{T}} & (df \geq 0) \end{cases} \quad (6)$$

根据 df 的结果决定解的更新方式。当 $df < 0$ 时,接受新解;否则,以 $e^{-\frac{df}{T}}$ 的概率接受新解。

(6) 当连续多个Metropolis链中都未接受新解 S_2 ,或退火达到终止温度,输出当前解 S_1 为最优解,然后结束;否则减小温度 T 后返回步骤(2)。

2.5 算法步骤

IH-ACO算法通过Dijkstra算法初始航迹、Logistic混沌映射初始化信息素、采用多航迹选择策略和模拟退火机制,在提高算法收敛速度的同时,能够有效提高全局搜索能力,避免陷入局部最优。改进算法流程如图3所示,具体实施步骤为:

- (1) 使用链接图法构造二维空间环境模型;
- (2) 采用Dijkstra算法规划一条从起始点到终止点的初始航迹;
- (3) 初始化算法参数;
- (4) 引入Logistic混沌映射,按照式(4)初始化信息素;
- (5) 设 $NC=0, m$ 只蚂蚁放于初始点;
- (6) 蚁群算法开始搜索,根据式(5)选择下一节点;
- (7) 判断蚂蚁是否到达终止点,若未到达终止点,跳转至步骤(6),到达终止点则跳转至步骤(8);
- (8) 引入模拟退火机制,根据式(6)产生新解并更新最优解;
- (9) 根据当前航迹规划情况,更新信息素;
- (10) $NC=NC+1$,当 $NC > NC_{\max}$ 时,输出结果,否则跳转至步骤(5)。

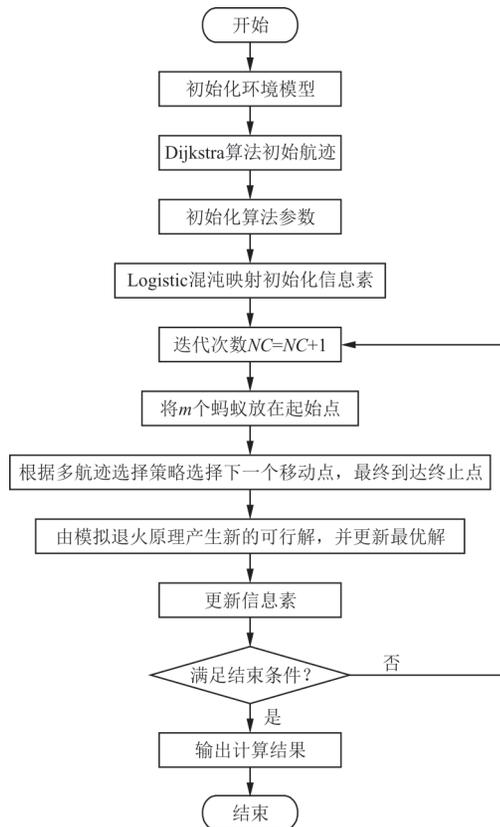


图3 IH-ACO算法流程图
Fig. 3 IH-ACO flow diagram

3 仿真分析

为测试 IH-ACO 算法在无人机作战中飞行穿越地形障碍、躲避敌方地对空导弹威胁的航迹规划效果,使用 MATLAB 2018a 对 IH-ACO 算法进行仿真,并与 ACO 算法、文献 [10] 的改进算法 (Novel Ant Colony Algorithm, 简称 NL-ACO) 和文献 [12] 的改进算法 (Evolutionary Ant Colony Algorithm, 简称 EY-ACO) 在相同测试环境下进行对比。构造 200 km×200 km 的二维仿真测试区域,进行算法参数初始化:种群数量 $m=20$,信息启发因子 $\alpha=1$,期望启发因子 $\beta=2$,初始条件下信息素浓度 $\tau_0=0.000\ 09$,信息素衰减因子 $\rho=0.5$,随机概率 $q_0=0.6$,迭代次数 $NC=500$,模拟退火初始温度 $T_0=90\text{ }^\circ\text{C}$,终止温度 $T_f=10\text{ }^\circ\text{C}$,退火系数为 0.9,随机产生地形障碍区(不规则多边形表示)和敌方地对空导弹威胁区(正方形表示)、起始点 Start 和终止点 End。

仿真实验 1:无人机穿越 1 个的地形障碍区,起始点为 Start(20,20)、终止点为 End(140,90),实验结果如图 4 所示。

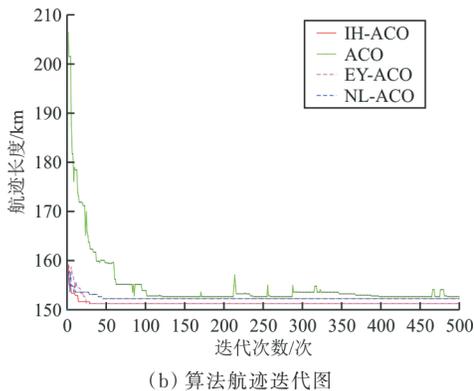
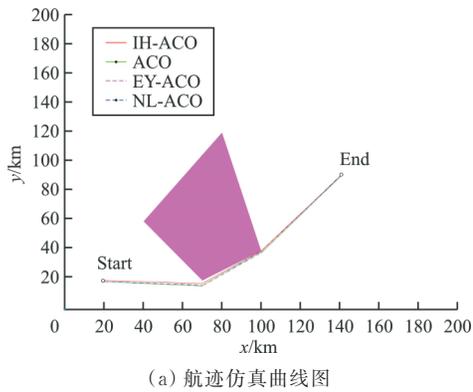


图 4 一个地形障碍区时航迹轨迹迭代图
Fig. 4 Iterative map of track in a terrain obstacle area

仿真实验 2:无人机穿越 2 个地形障碍区,起始点为 Start(20,180)、终止点为 End(160,97),实验结果如图 5 所示。

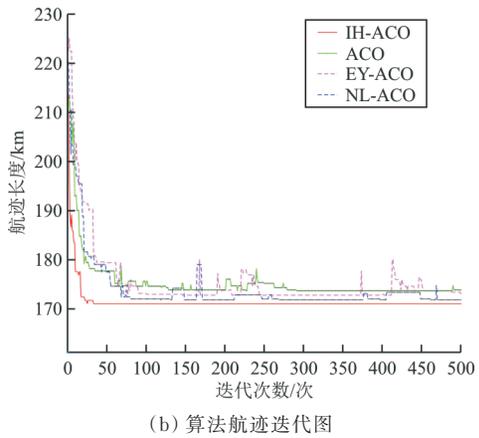
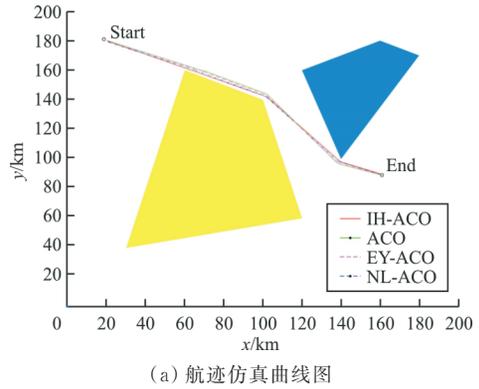
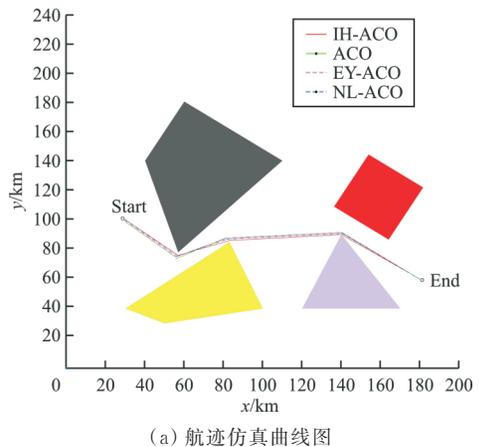


图 5 两个地形障碍区时航迹轨迹迭代图
Fig. 5 Iterative map of track in two terrain obstacle areas

仿真实验 3:无人机躲避 1 个地对空导弹威胁区并穿越 3 个地形障碍区,起始点为 Start(30,100)、终止点为 End(180,60),实验结果如图 6 所示。



(a) 航迹仿真曲线图

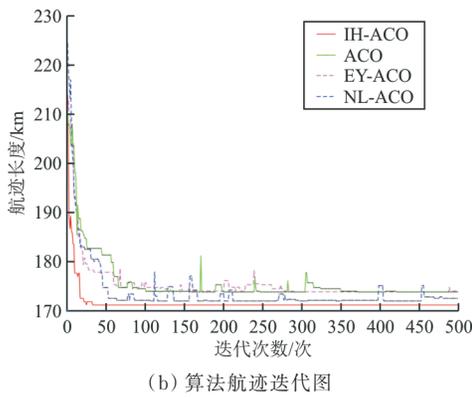


图 6 1 个地空导弹威胁区和 3 个地形障碍区时航迹轨迹迭代图

Fig. 6 Iterative map of track trajectory for one surface to air missile threat area and three terrain obstacle areas

仿真实验 4: 无人机穿越躲避 3 个地空导弹威胁区并穿越 5 个地形障碍区, 初始点为 Start(10, 100)、终止点为 End(180, 80), 实验结果如图 7 所示。

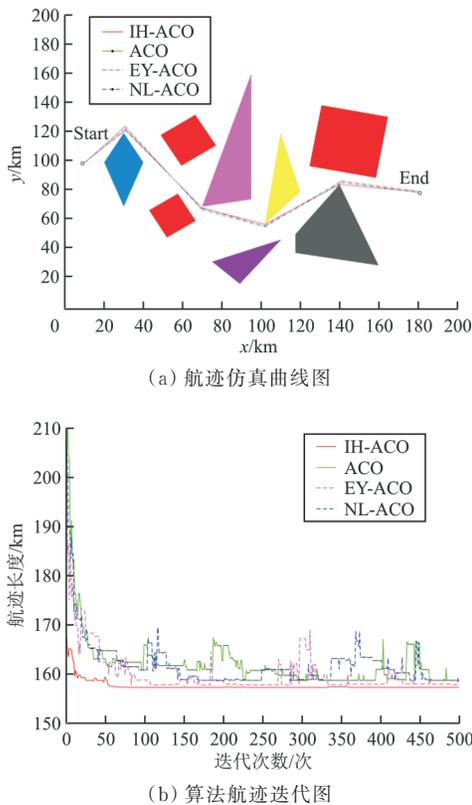


图 7 3 个地空导弹威胁区和 5 个地形障碍区时航迹轨迹迭代图

Fig. 7 Iterative map of track trajectory for three surface to air missile threat areas and five terrain obstacle areas

从图 4~图 7 中的(a)图可以看出:在无人机航迹规划过程中,通过使用 ACO 算法、NL-ACO 算法、EY-ACO 算法、IH-ACO 算法,无人机可以有效穿越地形障碍、躲避敌方地对空导弹威胁,证明四种算法都能满足无人机航迹规划的基本要求。

从图 4~图 7 中的(b)图可以看出: IH-ACO 算法和 ACO 算法相比,在迭代次数一定的情况下, IH-ACO 算法搜索得到的最短航迹更小,表明本文改进算法的全局搜索能力得到了增强; IH-ACO 算法与 NL-ACO 算法、EY-ACO 算法相比,在均可加快收敛速度的情况下, NL-ACO 算法、EY-ACO 算法在面对复杂环境时出现了停滞在局部最优解的情况,而本文改进算法仍可以很好地进行航迹搜索。综上所述,可以证明 IH-ACO 算法可有效解决全局寻优与收敛速度之间矛盾。

四种算法运算结果如表 1 所示,可以看出: IH-ACO 算法在最短航迹、收敛时间上都优于其他三种算法,表明 IH-ACO 算法在精度提高的同时,加快了收敛速度,即 IH-ACO 算法具有更好的寻优能力。

表 1 四种算法运算结果
Table 1 Calculation results of four algorithms

实验	算法	障碍物个数/个	航迹起止点	最短航迹/km	收敛时间/s
1	ACO	1	Start(20,20)→ End(100,90)	152.666 2	0.146 2
	NL-ACO			152.280 9	0.831 6
	EY-ACO			151.281 2	0.043 6
	IH-ACO			151.280 9	0.043 1
2	ACO	2	Start(20,180) →End(140,97)	173.815 8	0.306 2
	NL-ACO			171.965 5	0.167 3
	EY-ACO			172.888 9	0.152 2
	IH-ACO			170.226 0	0.073 4
3	ACO	4	Start(30,100) →End(180,60)	173.991 6	0.256 5
	NL-ACO			171.965 5	0.168 3
	EY-ACO			173.815 8	0.214 9
	IH-ACO			171.140 4	0.096 2
4	ACO	8	Start(10,100) →End(180,80)	218.686 1	0.843 5
	NL-ACO			218.685 7	0.682 5
	EY-ACO			217.739 4	0.358 6
	IH-ACO			217.258 9	0.295 3

综上所述,由于在前期进行了Dijkstra算法初始航迹、Logistic混沌映射初始化信息素,在中、后期采用多航迹选择策略和模拟退火机制,IH-ACO算法加强了全局搜索能力并提高了算法收敛速度,相比ACO算法具有更好的航迹规划效果。

4 结 论

(1) 使用Dijkstra算法进行初始化航迹、Logistic混沌映射初始化信息素,保证较快的搜索速度,提高蚁群前期搜索能力。

(2) 采用多航迹选择策略的状态转移规则,增加解的多样性,有效提高了算法的全局搜索能力。

(3) 应用模拟退火机制,避免算法收敛过快陷入局部最优解。

(4) IH-ACO算法在航迹规划过程中,因Dijkstra初始化和Logistic初始化能加快前期搜索效率、多航迹选择策略能增加解的多样性、模拟退火机制能防止早熟收敛,有效解决全局寻优与收敛速度之间的矛盾,在无人机作战的航迹任务规划中有很好的适用性。

(5) HI-ACO算法与ACO算法相比,在收敛速度提升的同时保证了全局搜索能力;HI-ACO算法与NL-ACO算法、EY-ACO算法相比,在复杂环境中仍能快速、有效地进行航迹搜索,解决了其他改进算法在复杂环境中停滞在局部最优解的问题。

下一步将研究如何将IH-ACO算法应用到有更多约束条件的复杂环境中进行航迹规划,并结合不同的作战环境和目的要求,提出更实时高效的航迹规划算法。

参考文献

- [1] ZHANG B, TANG L, DECASTRO J, et al. A recursive receding horizon planning for unmanned vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2912-2920.
- [2] 张则强, 谢梦柯, 蒋晋, 等. 一种多约束条件下智能飞行器航迹快速规划方法: CN111024092B[P]. 2020-10-30.
ZHANG Zeqiang, XIE Mengke, JIANG Jin, et al. A fast path planning method for intelligent aircraft under multiple constraints: CN111024092B[P]. 2020-10-30. (in Chinese)
- [3] 李泓波, 白劲波, 程顺, 等. 航迹规划研究趋势分析[J]. 现代计算机, 2015, 12(31): 49-51.
LI Hongbo, BAI Jinbo, CHENG Shun, et al. Research trend analysis of route planning [J]. Modern Computer, 2015, 12(31): 49-51. (in Chinese)
- [4] 田疆, 李二超. 用于无人机三维航迹规划改进连接型快速扩展随机树算法[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 514-522.
TIAN Jiang, LI Erchao. An improved RRT-connect algorithm used for UAV 3D trajectory planning [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 514-522. (in Chinese)
- [5] 郑昌文, 严平, 丁明跃, 等. 飞行器航迹规划研究现状与趋势[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1441-1446.
ZHENG Changwen, YAN Ping, DING Mingyue, et al. Research status and trend of route path planning for flying vehicles [J]. Acta Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1441-1446. (in Chinese)
- [6] 郑昌文. 飞行器航迹规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
ZHENG Changwen. Research on route planning for air vehicle [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [7] 谢凯利, 杨海涛, 谢海平. 智能航迹规划算法研究现状与展望[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 8-13.
XIE Kaili, YANG Haitao, XIE Haiping. Research status of intelligent track planning algorithm [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 8-13. (in Chinese)
- [8] 李涵, 姚登凯, 赵顾颖. 基于改进遗传算法的突防突击航线规划[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 334-340.
LI Han, YAO Dengkai, ZHAO Guhao. Penetration flight planning based on improved genetic algorithm [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 334-340. (in Chinese)
- [9] DORIGO M. Optimization, learning and natural algorithm [D]. Milan, Italy: Politecnico di Milano, 1992.
- [10] 陈雄, 袁杨. 一种机器人路径规划的蚁群算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 952-955.
CHEN Xiong, YUAN Yang. Novel ant colony optimization algorithm for robot path planning [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2008, 30(5): 952-955. (in Chinese)
- [11] BULLNHEIMER B, HARTL R F, STRAUSS C. A new rank based version of the ant system—a computational study [J]. Central European Journal of Operations Research, 1997, 7(1): 25-38.
- [12] WANG L, LUO C, LI M, et al. Trajectory planning of an autonomous mobile robot by evolving ant colony system [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2017, 32(4): 112-121.
- [13] 李静茹. 基于改进蚁群算法的多无人机协同路径规划研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
Li Jingru. Research on multiple unmanned aerial vehicles collaborative path planning based on improved ant colony algorithm [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technol-

- ogy, 2020. (in Chinese)
- [14] 何艳萍, 张安, 刘海燕. 基于 Voronoi 图与蚁群算法的 UCAV 航路规划[J]. 电光与控制, 2009(11): 26-28, 58.
HE Yanping, ZHANG An, LIU Haiyan. UCAV route planning based on Voronoi diagram and ant colony algorithm [J]. Electro Optics and Control, 2009 (11): 26-28, 58. (in Chinese)
- [15] 魏燕明, 王倩, 张建祥, 等. 非制导炸弹投掷的攻击航迹规划研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 487-495.
WEI Yanming, WANG Qian, ZHANG Jianxiang, et al. Attack path planning for throwing unguided bomb [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10 (4): 487-495. (in Chinese)
- [16] 陈晓, 戴冉, 陈昌源. 基于 Maklink 图和蚁群算法的航线规划[J]. 中国航海, 2017, 40(3): 9-13.
CHEN Xiao, DAI Ran, CHEN Changyuan. Navigation route planning with Maklink graph and ant colony algorithm [J]. China Navigation, 2017, 40(3): 9-13. (in Chinese)
- [17] HOSSIEN G, AMIR S, MAHDI J, et al. A hybrid method of link prediction in directed graphs[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 165: 7-15.
- [18] 刘文文, 朱家明. 基于蚁群算法对飞行器航迹规划的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2020, 36(6): 701-708.
LIU Wenwen, ZHU Jiaming. Research on flight path planning based on ant colony algorithm [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Science Edition), 2020, 36 (6): 701-708. (in Chinese)
- [19] 程凝怡, 刘志乾, 李昱奇. 一种基于 Dijkstra 的多约束条件下智能飞行器航迹规划算法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(6): 1284-1290.
CHENG Ningyi, LIU Zhiqian, LI Yuqi. Path planning algorithm for Dijkstra-based intelligent aircraft under multiple constraints [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(6): 1284-1290. (in Chinese)
- [20] SOLKA J L, PERRY J C, POELLINGER B R, et al. Fast computation of optimal paths using a parallel Dijkstra algorithm with embedded constraints [J]. Neurocomputing, 1995, 8(2): 195-212.
- [21] 杨超杰, 裴以建, 刘朋. 改进粒子群算法的三维空间路径规划研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(11): 117-122.
YANG Chaojie, PEI Yijian, LIU Peng. Research on three-dimensional space path planning based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Computer Engineering and Application, 2019, 55(11): 117-122. (in Chinese)
- [22] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [23] 周明, 孙树栋, 彭炎午. 基于遗传模拟退火算法的机器人路径规划[J]. 航空学报, 1998, 19(1): 119-121.
ZHOU Ming, SUN Shudong, PENG Yanwu. Path planning of mobile robot via genetic simulated annealing approach [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19 (1): 119-121. (in Chinese)

作者简介:

辛建霖 (1998—), 男, 本科生。主要研究方向: 作战筹划与任务规划。

左家亮 (1986—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 空战智能决策及空战评估、兵器科学与技术。

岳龙飞 (1995—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 机器学习与空战决策。

张宏宏 (1995—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 无人机冲突解脱、航空管制。

(编辑: 马文静)