

一种基于 Voronoi 图的航路规划方法

王 壮¹, 刘聪锋¹, 蔡 啸²

(1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071; 2. 解放军 63893 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: Voronoi 图是一种根据战场多威胁源分布情况获取可行航路点的图形算法, 而蚁群算法是一种新型的模拟进化启发式算法。提出一种基于 Voronoi 图算法的无人机航路规划解决方法, 提升了在多威胁源分布的情况下的无人机航路规划效率。首先, 根据已知威胁源的数据信息生成加权 Voronoi 图, 并定义每条 Voronoi 边的代价为组成 Voronoi 边的 2 个端点的直线距离; 然后利用蚁群算法结合可飞行航迹点集合对无人机在多威胁源分布的飞行环境下进行航路规划。仿真结果验证了所提方法在不同战场环境下解决无人机航路规划问题上的可行性和有效性。

关键词: 无人机航路规划; Voronoi 图; 蚁群算法

中图分类号: V218

文献标识码: A

文章编号: CN32-1413(2017)04-0076-05

DOI: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2017.04.019

A Path Planning Method Based on Voronoi Diagram

WANG Zhuang¹, LIU Cong-feng¹, CAI Xiao²

(1. Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Unit 63893 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: Voronoi diagram is a diagram algorithm fetching optimal path points according to the distribution status of multiple threat sources in battlefield. Ant colony algorithm is a new type of enlightened algorithm simulating evolution. This paper puts forward a path planning solution method based on Voronoi diagram algorithm, which enhances the efficiency of unmanned aerial vehicle (UAV) path planning in the case of multiple threat sources distribution. Firstly, this paper generates the weighted Voronoi diagram according to the data information of known threat sources, and defines that the total cost of each edge could be calculated according to the distance between the two points of the edge, then uses the ant colony algorithm combining with the flightable flight point set to carry out the path planning for the UAV in the multiple threat source distribution flight environment. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method in solving the UAV path planning problem under various combat field environments.

Key words: unmanned aerial vehicle path planning; Voronoi diagram; ant colony algorithm

0 引言

无人机具有低成本、强机动性和“零人员伤亡”等优势。在近代战争中, 无人机承担着对敌方侦察、通信对抗以及对地面威胁攻击等多种任务。无人机航迹规划是指在考虑无人机自身飞行性能、突防敌方威胁区概率和油耗等综合因素下, 规划一条从起始点到目标终点的最优飞行线路^[1]。

航迹规划有很多种算法。按照决策计算方法分

为最优式算法和启发式算法。其中最优式算法是一种纯数学优化方法, 包括动态规划、穷举法、参数优化法、梯度法等, 这类方法计算量大且繁琐, 难以满足多种约束条件的限制, 所以难以完成航迹最优化问题^[2]; 启发式算法包括模拟退火法、蚁群算法^[3-9]、遗传算法^[10]、神经网络、A-Star 算法^[11]、粒子群优化算法^[12]、机器学习等。航迹规划方法按照几何学的观点, 可以分为基于栅格或者基于图形的算法。一般来说, 基于栅格的算法能够满足算法收敛的要

收稿日期: 2017-03-17

求,但是有时难于处理一些限制条件。相对基于栅格的算法来说,基于图形的算法能够处理更多的限制条件,但算法收敛时间较长。

Voronoi 图算法是由俄国数学家 Georgy Fedoseevich Voronoi 发现,并以他的名字命名^[13]。其在几何学、建筑学、地理学、气象学等许多领域应用广泛。

蚁群算法是一启发式进化算法,该算法具有很好的鲁棒性,它利用信息激素作为蚂蚁之间通信的媒介,并通过蚂蚁之间的协同搜索来完成寻优过程。

本文首先给出了无人机飞行环境中的威胁源中心坐标,并以此建立了威胁源分布的数学模型。然后阐述了 Voronoi 图算法和蚁群算法的原理,并对蚁群算法进行改进,给出了基于 Voronoi 图和改进蚁群算法解决无人机航路规划问题的具体实现过程;最后通过仿真实验验证了本文所提方法的可行性和有效性。

1 Voronoi 图算法

本文主要使用的是间接 Voronoi 图生成法,首先将空间中的点集分割,构成 Delaunay 三角网。再对三角网中的每条边做中垂线,获取所有相邻中垂线的交点,最终将交点连接得到 Voronoi 图。

构建 Delaunay 三角网,首先将点集分割成若干子点集,分别对其构建 Delaunay 子三角网;然后对相邻的子集进行横向、纵向合并。在合并过程中,一般包括搜索合并起始线和终止线,删除不满足 Delaunay 准则的三角形;最后生成符合准则的 Delaunay 三角形网。整个过程如图 1 所示。

根据图 1 重构的凸包,获得威胁点的连线图。做相邻两威胁点连线的垂直平分线,进而生成 Voronoi 图。假设威胁体的强度值相同,当无人机沿 Voronoi 边飞行时,因为距离 2 个威胁源距离相等,所以受到来自这 2 个威胁点的威胁也最小。

2 蚁群算法

蚁群算法的基本思想由意大利学者 Dorig M 等于 1991 年首次提出^[14],蚂蚁采用了在经过的路径上留下信息素的方法来协同搜索。在蚁群算法中,一只蚂蚁在行动中经过的路径上留下的信息素,能被同一蚁群中后来的蚂蚁感受到,并作为选择路线的依据,而后到者留下的信息素会对原有的信息素进行加强,如此循环下去,直到几乎所有的蚂蚁都

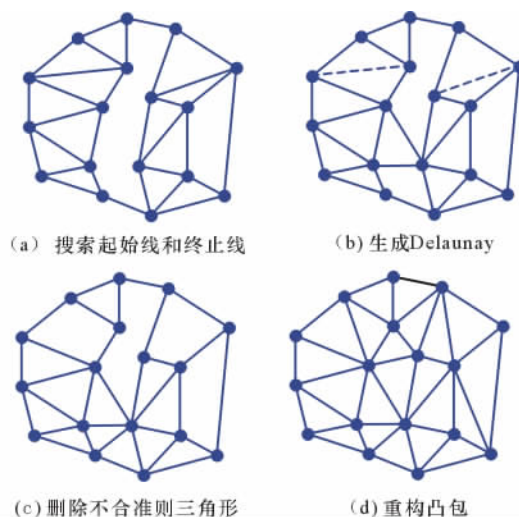


图1 合并凸包示意图

搜索完成,选出最优解。

2.1 算法原理

设有 m 只蚂蚁,每个蚂蚁有以下特征:根据以节点距离和边上激素的数量为变量的概率函数选择下一个城市, $p_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 由位置 i 转移到位置 j 的概率^[15]:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \cdot \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in A_{\text{allowed}}^k} \tau_{is}^\alpha(t) \cdot \eta_{is}^\beta(t)}, & j \in A_{\text{allowed}}^k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_{allowed}^k 为蚂蚁 k 接下来允许选择的节点集合; α 为路径的重要性; β 为能见度的相对重要性; η_{ij} 为边弧 (i, j) 的能见度。

用参数 $1 - \rho$ 表示信息挥发度,随着时间的推移,以前留下的信息逐渐消失,经过 n 个时刻,蚂蚁完成 1 次循环之后,各路径上信息素残留量根据下式做调整:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3)$$

关于 $\Delta\tau_{ij}^k$ 的计算方法,本文采用 ant-cycle system 系统模型:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k, & \text{若蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中经过边 } ij \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q 为 1 个恒定正数,表示蚂蚁循环一周在经过的路径上所释放的信息素总量; L_k 为第 k 只蚂蚁在本次循环中所经过的路径的长度。

由于传统蚁群算法在无人机航路规划的应用中,是将威胁区进行网格化划分,每只蚂蚁选择下一

个将要到达的航迹节点时,选择范围只局限于相邻未到达过的网格节点。这种选择方式的缺点:

(1) 传统算法规划出的最终航路存在许多冗余航路节点;

(2) 过多对最终规划航路没有影响的网格节点参与算法运行,加长了算法收敛到最优解的时间;

(3) 传统算法对于最终航路没有进行平滑处理,不符合无人机实际飞行要求。

2.2 改进蚁群算法

针对传统蚁群算法的缺点,利用 Voronoi 图处理威胁区生成的可飞行航迹点集合,本文提出一种改进的蚁群算法,对无人机进行航路规划。最后,根据无人机飞行参数对最优航迹进行航路平滑处理。

由于威胁区限制,可飞行航迹点集合中点的数量很少。所以在改进算法中,将每只蚂蚁计算转移概率时的选择范围扩大到所有未经过的点。在完成一次迭代之后,更新信息素,对蚁群选出的航迹进行筛选,从没有经过威胁区的航迹集合中选出本代的最优航迹,重复此过程直到整个迭代过程结束。具体的算法流程如图2所示。

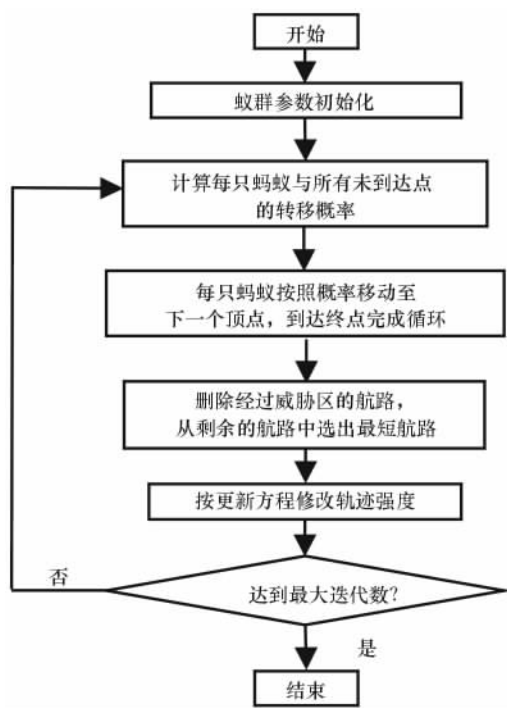


图2 蚁群算法流程图

本文中各个参数选取的数值如下:迭代次数 $n_c=60$, 蚂蚁数量 $m=30$, 信息素启发式因子 $\alpha=1$, 期望值启发式因子 $\beta=2$, 信息素残留系数 $\rho=0.7$, 总信息量 $Q=10$, $\eta_{ij}=1/d_{ij}$ (d_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之

间的距离)。

2.3 航路平滑

由于规划出的无人机初始飞行路径只是将节点连接起来,存在许多折线,不符合无人机飞行的物理要求。所以必须对生成的初始航路进行平滑处理,生成符合物理动力学约束的平滑轨迹。本文使用圆弧段串联法进行航路平滑。

圆弧段串联法原理如图3所示。 w_1, w_2, w_3 为3个相连的航路节点,夹角为 θ , 做夹角 θ 的角平分线 m , 那么无人机转弯半径所在圆的圆心一定位于直线 m 上, 根据无人机的最小转弯半径 R , 令 $OP \perp w_1 w_2$ 且 $OP=R$, 那么垂足点 P 就是转弯圆与航路的切点, 同理可以在 $w_2 w_3$ 上找到另一个切点 Q , 以 O 为圆心, 最小转弯半径 R 为半径, 做圆弧 PQ 就是平滑后的航路。由无人机飞行物理要求限制可知, 平滑后的航路是可飞的。

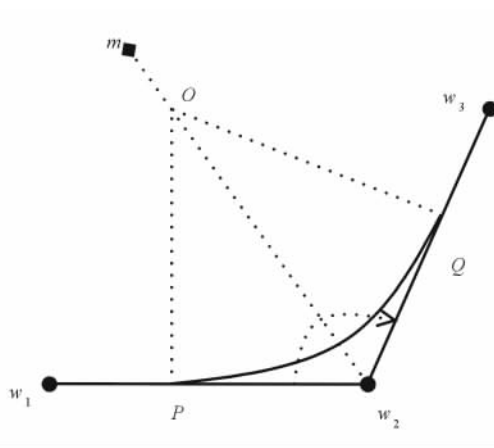


图3 圆弧段串联法示意图

3 威胁源分布建模

无人机在执行任务之前需要在飞行环境中进行航路规划,规划环境内通常都分布着各种各样的敌方威胁。威胁建模是一个复杂问题,随着威胁的数量、种类、分布和飞行任务的变化而变化。通常来说,无人机的巡航高度都在 4 km 以上,美国的“全球鹰”无人机甚至达到了 10 km 的巡航高度,所以在高空航路规划时地形遮蔽可不用考虑,只需要考虑无人机的水平运动,这样就将问题转换为二维规划问题,威胁也可以用圆形区域来等价。无人机航路规划任务可等价为规划出一条从起始点到目标点的能够规避威胁且长度最短的航路。

本文中所采用的数字地形威胁数据为敌方的侦

查雷达坐标及其最大扫描范围,根据三维空间中的威胁分布,取其雷达扫描区域关于 XY 平面的投影,可得基于二维空间的威胁区域分布图,具体如图 4 所示。图 4 中符号“+”表示敌方雷达位置,圆形区域表示每个敌方雷达的扫描范围。

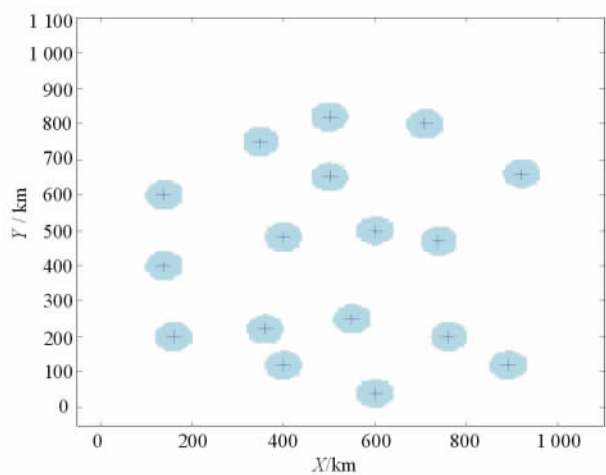
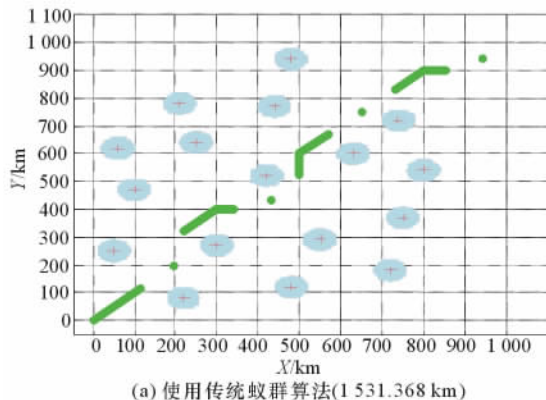


图 4 二维空间环境威胁区域

图 5 是将敌方雷达所在位置作为 Voronoi 图中的生成元,生成 Voronoi 加权图,定义每条 Voronoi 边的代价为组成边的 2 个端点的直线距离。依据生



成的 Voronoi 图,提取生成节点存入点集,作为无人机在地图上的可飞航迹点集合。设定无人机航迹规划中的起点和终点坐标,利用可飞航迹点集合,结合路径规划算法对无人机进行航迹规划。

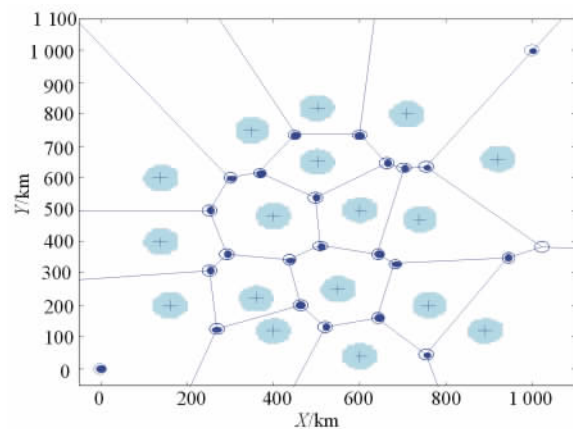


图 5 威胁区域 Voronoi 图

4 仿真实验与分析

图 6 所示的是用传统蚁群算法和改进蚁群算法在相同威胁区分布的条件下,对无人机进行航迹规划。

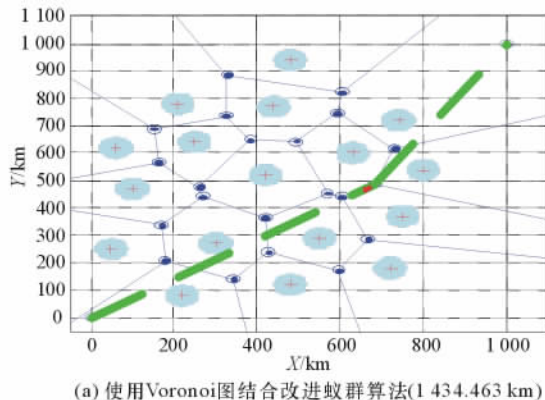


图 6 在相同威胁区分布的条件下对无人机的航迹规划

图 6(a)为使用传统蚁群算法对无人机进行航路规划,最终路径距离权重为 1 531.368 km。图 6(b)为使用 Voronoi 图结合改进蚁群算法对无人机进行航路规划,最终路径距离权重为 1 434.463 km。

从图 6(a)中可以看出,传统蚁群算法通过将威胁区网格化,利用网格节点对无人机进行航迹规划。虽然最终的航路躲避了所有威胁区,并最终到达终点,但是搜索过程繁琐,规划路径含有冗余节点,还有可优化的部分。图 6(b)中最终规划的路径距离权重更短,不但躲避所有的威胁区,而且对路径进行

航路平滑,使其更符合无人机实际飞行要求。

表 1 3 种算法规划路径的长度(km)

名称	威胁分布 1	威胁分布 2
Greedy 算法	1 812.150	1 895.708
Dijkstra 算法	1 613.386	1 532.202
改进蚁群算法	1 448.239	1 434.463

表 1 是 Greedy 算法、Dijkstra 算法和改进蚁群算法分别与 Voronoi 图结合对无人机进行航路规划的仿真结果。仿真程序建立 2 种不同的威胁区分布图,在 2 种威胁分布下,3 种算法都是利用 Voronoi

图中的可飞航迹点集合进行航路规划,并最终得出从起点到终点的无人机飞行路径。3种算法生成的最终航迹成功避开了雷达威胁区的搜索范围。从3种算法规划航路的距离权重可以看出:采用改进蚁群算法得出的路径要优于采用 Greedy 算法、Dijkstra 算法的航路规划的路径。所以在相同威胁区及相同的起点和终点的条件下,相比于普通数学优化算法,运用蚁群算法对 Voronoi 图生成的可飞航迹点进行路径规划可以得到距离权重更小的飞行路径。

5 结束语

本文根据敌方雷达威胁在无人机飞行区域的分布,采用 Voronoi 图算法对威胁区域进行预处理,运用改进蚁群算法对得到的可飞行节点搜索并将得到的航路进行比较分析。最终得出结论:运用改进蚁群算法对 Voronoi 图生成的可飞航迹点进行路径规划,可以得到距离较小的飞行路径。在运用改进蚁群算法搜索路径过程中充分利用了算法鲁棒性的特点。分别对比传统的蚁群算法和数学优化方法,改进蚁群算法都能够删减更多的航迹节点,使得规划路径的距离代价更小。仿真结果验证了本文提出的算法进行航路规划的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 许友平. 无人机对地侦察/攻击航路规划软件系统的研制与开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [2] PIERRE D M, ZAKARIA N, PAL A J. Self-organizing map approach to determining compromised solutions for multi-objective UAV path planning[C]//Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2012 12th International Conference on. IEEE, 2012;995-1000.
- [3] EATON J, YANG S X, GONGORA M. Ant colony optimization for simulated dynamic multi-objective railway junction rescheduling [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017(99):1-13.
- [4] JUANG C F, JHAN Y H, CHEN Y M, et al. Evolutionary wall-following hexapod robot using advanced multi-objective continuous ant colony optimized fuzzy controller [J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2017(99):1.
- [5] LIU Y X, GAO C, ZHANG Z L, et al. Solving NP-hard problems with physarum-based ant colony system [J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2017, 14(1):108-120.
- [6] KYRIAKOPOULOS C A, PAPADIMITRIOU G I, NICOPOLITIDIS P, et al. Energy-efficient lightpath establishment in backbone optical networks based on ant colony optimization [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(23):5534-5541.
- [7] de PAULA MARQUES M, DURAND F R. WDM/OCDM energy-efficient networks based on heuristic ant colony optimization [J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(4):1482-1493.
- [8] JACKNOON A, ABIDO M A. Ant colony based LQR and PID tuned parameters for controlling inverted pendulum [C] // 2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE), 2017:1-8.
- [9] PENG Y H. Ant colony optimization algorithm in occupational skill testing management system [C]//2016 IEEE Advanced Information Management, Communication, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2016:1346-1349.
- [10] FU S Y, HAN L W, TIAN Y, et al. Path planning for unmanned aerial vehicle based on genetic algorithm [C]//Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI&CC), 2012 IEEE 11th International Conference on. IEEE, 2012:140-144.
- [11] KHUSWENDI T, HINDERSAH H, ADIPRAWITA W. UAV path planning using potential field and modified receding horizon A* 3D algorithm[C] // Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011 International Conference on. IEEE, 2011:1-6.
- [12] LIU LI, YU C L, WANG Z, et al. Fast 3D route planning method for small UAV[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(12):2521-2526.
- [13] 宗大伟. Voronoi 图及其应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.
- [14] FLOYD S, JACOBSON V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (81063-6692), 1993, 1(4):397-413.
- [15] 杨剑锋. 蚁群算法及其应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.