

基于 Voronoi 图与蚁群算法的 UCAV 航路规划

何艳萍^{1,2}, 张 安¹, 刘海燕²

(1. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710072; 2. 第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘 要: 提出一种基于 Voronoi 图和蚁群优化算法 (ACO) 的无人作战飞机航路规划的方法。首先根据已知威胁源建立威胁源的 Voronoi 图, 并构建了起始点、目标点与威胁场的 Voronoi 图赋权有向图, 从而建立了无人机搜索路径的集合, 结合初始集合, 然后给出无人作战飞机航路规划的具体实现过程, 最后对 UCAV 在多种威胁环境下的航路规划进行了仿真实验, 仿真结果表明这种航路规划方法是可行和有效的。

关键词: UCAV; 航路规划; Voronoi 图; 蚁群优化算法 (ACO)

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2009)11-0022-03

Path Planning for UCAV Based on Voronoi Diagram and Ant Colony Optimization

HE Yanping^{1,2}, ZHANG An¹, LIU Haiyan²

(1. College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: A method based on Voronoi diagram and ant colony optimization was proposed for path planning of Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV). First the Voronoi diagram of threats was created according to the known threat sources and the Voronoi weighted direction diagram of start point, target point and threat field was created. Then a set of UCAV searching paths was created and the realization process of path planning for UCAV was given based on the initial set. Simulations were carried out on path planning of UCAV under various threatening environment. Simulation results show that the proposed method is effective and feasible.

Key words: UCAV; path planning; Voronoi diagram; Ant Colony Optimization (ACO)

0 引言

无人作战飞机路径规划是要寻找从初始点到目标点满足某种性能指标最优的运动轨迹。所谓最优轨迹, 就是在给定的战场区域中, 能够最大限度地利用地形信息和敌情信息, 综合考虑飞机的导航精度和机动能力的限制, 使飞机飞行在安全概率最大的飞行航线上。因此, 航路规划是 UCAV 任务规划系统的关键组成部分^[1-2]。为了解决上述问题, 出现了大量的无人机的航路规划方法, 目前存在的研究方法有: 动态规划算法^[3]、遗传算法 (GA)^[4]、A* 算法^[5]、蚁群优化算法

(ACO)^[5-6]等, 这些算法各有其优缺点, 算法的优劣主要取决于算法的实时性和路径解的最优性。本文在研究已有算法的基础上, 提出一种基于 Voronoi 图和蚁群优化算法的无人作战飞机航路规划的方法。

1 建立威胁场的 Voronoi 图

Voronoi 图是计算几何学中一种重要的几何结构, 其应用在航路规划中的最大特点是根据已知战场威胁源分布情况下生成由初始可选路径集, 它是一组由连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形构成。通过 V 图能够有效地将地理信息中的点、对象和区域以集合拓扑结构表示出来, 并且能够通过这些拓扑关系表示自然语言中的定性关系和模糊地理信息, 这种性质对于航线规划非常关键, 尤其对于初始航线集或者航路区域的确定很重要。

要为 UCAV 规划航路, 就要考虑到威胁。所以, 要

收稿日期: 2008-09-15

修回日期: 2008-11-26

基金项目: 高校博士点基金项目资助 (20060699026); 航空科学基础
基金项目资助 (20090553008)

作者简介: 何艳萍 (1979-), 女, 湖北随州人, 硕士生, 讲师, 主要研究
方向为复杂系统建模与仿真。E-mail: pingpinghe2000@yahoo.com.cn

根据威胁的地理分布 (威胁包括敌方的探测设备及地形障碍)计算威胁分布的 Voronoi图,确定航路的走向和航区。此处,将威胁点均简单表示为雷达点 (把地形威胁视为雷达,用和雷达一样的方法来处理),且这些雷达点满足雷达方程 (即表示目标反射的能量与目标距雷达距离的四次方成反比 $1/d^4$)。这里,假设雷达功率相同,其搜索范围是一个以雷达为圆心半径 r_x 的圆,当 UCAV 飞到该范围内时,几乎百分之百的概率会被探测到和击毁,同时假设威胁点之间没有可以改变探测性能的信息交流, UCAV 飞行高度保持不变,这样就把问题降到二维的协同航线规划问题。由 Voronoi图的特性可知,若 UCAV 沿 Voronoi图的边飞行,受到相邻两个威胁点的威胁最小。现在问题简化为在 Voronoi图上寻找 UCAV 从起始点到目标点的最小代价航线,将无限搜索转化为有限搜索,大大降低了计算量^[3 7]。

2 建立赋权有向图

在构造 Voronoi图时,起始点和目标点不在母点范围之内。为简化起见,将起始点和目标点分别与其几何距离最近的 3 个节点相连,这样使起始点和目标点与威胁场 Voronoi图形成一个从起点到目标点的有向图。

无人机路径规划就是要寻找飞行代价最小的路径,要满足无人机的生存概率和杀伤概率最大,这需要无人机具有规避威胁的能力,并满足其燃料足够安全返回基地。考虑两方面的代价:一是无人机的燃料限制,二是威胁场中各个雷达对无人机的威胁。第一方面可以假定无人机以恒定的速度飞行,燃料限制与路径的几何长度相关,可简单表示为 $J_{f_i} = L_i$, L_i 是第 i 条边的长度。第二方面,假设各个雷达是相同的,无人机的雷达反射作用效果是无人机到雷达距离 d 的四次方分之一。因此无人机沿着某一边 i 飞行,其所受的雷达威胁与无人机到雷达距离的四次方分之一成正比。更精确的威胁计算方法,可以将一条 Voronoi边分段计算、合并。为了简化计算,每条路径均匀地分成 6 等分,取其中的 3 个点来代替整条路径的代价,这 3 个点分别是: $1/6$ 、 $1/2$ 、 $5/6$ 。其中 L_i 为第 i 条路径的长度, $d_{1/6}$ 为距离该条路径最近的威胁点到该条路径 $1/6$ 处的距离, $d_{1/2}$ 为距离该段路径最近的威胁点到该条路径 $1/2$ 处的距离, $d_{5/6}$ 为距离该路径最近的威胁点到该条路径 $5/6$ 处的距离。如图 1 所示,在每条边的 $L_i/6$ 、 $L_i/2$ 、 $L_i5/6$ 点处分别计算某一雷达对该边的威胁值。对第 i 条边,威胁代价计算公式为^[3]

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$J_{t_i} = L_i \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_{1/6,i,j}^4} + \frac{1}{d_{1/2,i,j}^4} + \frac{1}{d_{5/6,i,j}^4} \right) \quad (1)$$

其中: n 是威胁场中雷达的个数; $d_{1/6,i,j}$ 是第 j 个雷达距第 i 条边 $1/6$ 处的距离。因此,综合考虑上面两方面的代价,无人机沿 Voronoi有向图的第 i 条边飞行的最终代价为

$$J_i = kJ_{f_i} + (1-k) J_{t_i} \quad (2)$$

这样 Voronoi有向图就变成赋权有向图,每条边的代价就是 J_i ,从而建立了无人机搜索路径的集合。

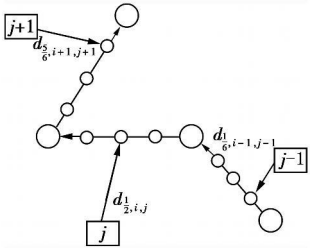


图 1 路径代价计算
Fig 1 Path cost calculation

3 蚁群优化算法

蚁群算法 (Ant Algorithm) 是一种新的概率搜索算法,它利用生物信息激素作为蚂蚁选择后续行为的依据。即每只蚂蚁会对一定范围内其他蚂蚁散布的生物信息激素做出反应,依据生物信息激素的强度在每一个道口对多条路径选择做出概率上的判断并执行该选择,同时影响后续蚂蚁的行为。于是,寻优过程就通过若干蚂蚁的协同搜索完成。受到蚂蚁这种觅食方式的启发, M Dorigo 等人在 1991 年首先提出了蚁群算法^[8],并将其应用于 TSP 问题,取得了一定成效。考虑到 TSP 问题与航路规划问题具有一定的相似性,本文将引入航路规划领域。

3.1 算法的数学模型

通过模仿蚂蚁的觅食行为方式,在求解航路规划问题时,将 m 个人工蚂蚁定位于起始点,每个蚂蚁使用一定的状态转换规则从一个状态转到另一个状态 (即从一个节点转到另一个节点),直到最终到达目标点,完成一条候选航路 (航路规划问题的一个可行解)。在所有 m 个蚂蚁都完成了各自的候选航路选择后,再根据生物信息激素修改规则,利用当前 m 条候选航路以及历史上得到的一条代价最小的候选航路信息,修正网络图中各条边的生物信息激素强度,这一修正过程模拟了蚂蚁释放生物信息激素以及生物信息激素的自然挥发现象,生物信息激素的修改规则可以引导蚂蚁搜索到问题的最优解^[9-10]。

本文具体操作如下:首先,对 Voronoi图各边给出初始信息素值,令蚂蚁从距离出发点最近的 Voronoi节点开始搜索,根据状态转移规则选择行进的 Voronoi

边,以距离目标点最近的 Voronoi节点为终点结束搜索。当所有蚂蚁完成各自的候选航路选择后,按照信息素更新规则对 Voronoi图中各边的信息素进行更新,其中没有蚂蚁经过的边进行信息素蒸发,重复这一过程直至达到结束条件。

1) 蚂蚁状态转换规则。一个人工蚂蚁选择新可行节点的概率是由两节点间边的代价以及生物信息激素的强度决定的,按式 (3)计算蚂蚁 k 从当前节点 r 转换到可行节点 s 的概率为^[5-6 11]

$$P_k(r,s)=\begin{cases} \frac{\tau(r,s)^\alpha \eta(r,s)^\beta}{\sum_{s\in J_k(r)} \tau(r,s)^\alpha \eta(r,s)^\beta}, & s\in J_k(r) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau(r,s)$ 为蚂蚁储存在边 $L(r,s)$ 上的生物信息激素强度; $\eta(r,s)$ 为节点 s 相对于节点 r 的可见性, $\eta(r,s)=1/C_{rs}$, C_{rs} 为边 $L(r,s)$ 的代价; $J_k(r)$ 是第 k 个蚂蚁由节点 r 可以到达所有可行节点的集合,这些节点均是节点 r 的相邻节点,而且它们比节点 r 更接近目标点; α 为信息启发式因子,表示轨迹的相对重要性,反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息在蚂蚁运动时所起的作用; β 为期望启发式因子,表示能见度的相对重要性,反映了蚂蚁在运动过程中启发信息在蚂蚁选择路径中的受重视程度。蚂蚁从状态 r 转移到状态 s 所选可行节点的概率会随着生物信息激素强度的增大而增大,随着通路代价的增大而减少。

2) 生物信息激素修改规则。一旦所有蚂蚁完成了各自候选航路的选择过程(找到一条航路规划问题的可行解),就必须对各边上的生物信息激素作一次全面的修正,修正规则如下^[5 11]:

$$\tau(r,s)=(1-\rho)\tau(r,s)+\rho[\Delta\tau(r,s)+e\Delta\tau^k(r,s)] \quad (4)$$

其中:

$$\Delta\tau(r,s)=\sum_{k=1}^m\Delta\tau^k(r,s) \quad (5)$$

式中: m 为蚂蚁的数量, $0<\rho<1$ 为信息挥发参数,用来蒸发储存在边上的生物信息激素,以减弱原有的信息; $1-\rho$ 为信息素残留因子; $0<e<1$ 为信息加强参数,用来加强储存在边上的生物信息激素强度以保留最优结果信息; $\Delta\tau^k(r,s)$ 表示蚂蚁 k 经过边 $L(r,s)$ 后的生物信息激素增量,其值由下式给出:

$$\Delta\tau^k(r,s)=\begin{cases} Q/W_k, & \text{边 } L(r,s) \text{ 属于蚂蚁 } k \text{ 的候选航路} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta\tau^k(r,s)=\begin{cases} Q/W_e, & \text{边 } L(r,s) \text{ 属于当前最好的候选航路} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Q 值为一个常数,用来控制信息素的强度; W_k 为蚂蚁 k 选择的航路广义代价; W_e 为当前最小的航路代价。

3.2 实现步骤

根据上述的原理和规则,基于 Voronoi图和蚁群优化算法的无人作战飞机航路规划问题的具体步骤如下:

1) 根据威胁源分布构造 Voronoi图,并计算 Voronoi图中每条边的总代价;参数初始化, Voronoi图每条边赋初始信息素值;

2) 将所有蚂蚁置于距离出发点最近的 Voronoi图节点,并根据式 (3)选择下一节点,直至所有蚂蚁完成搜索过程;

3) 根据式 (2)计算出可行路径的代价,并更新所找到的最优路径;

4) 参照当前循环中最优路径更新所有 Voronoi边信息素值,规则如式 (4)、式 (5);

5) 若满足循环结束条件,则循环结束并输出计算结果,否则跳转到 2)。

4 仿真实验

图 2描述了某 UCAV的任务态势。敌方阵地大小为 $70\text{ km}\times70\text{ km}$,其中:“●”代表雷达、导弹等威胁源;“■”代表 UCAV出发点;“★”表示任务目标点,其具体方位如表 1、表 2所示。进入敌方防御区域后, UCAV需要根据自身所处的威胁环境完成航路优化计算。实验中参数设置为 $m=30$, $\alpha=2$, $\beta=5$, $\rho=0.1$, $Q=100$ 。图 3在 $70\text{ km}\times70\text{ km}$ 的空域内,我方 UCAV从坐标 (10, 0)处飞到 (45, 65),利用本文所提 ACO算法在 Voronoi图中进行无人作战飞机航路搜索,图 3给出了 UCAV进入威胁区域执行作战任务时的航路规划结果,可行航路在图中用实线表示,仿真结果表明这种航路规划方法是可行和有效的。

表 1 起始点、目标点的坐标方位

Table 1 The coordinates of start point and target point

起始点坐标	目标点坐标
(10, 0)	(45, 65)

表 2 威胁点的坐标方位

Table 2 The coordinates of threat points

威胁点编号及坐标			
1(17, 55)	2(32, 61.5)	3(45, 61)	4(51.5, 59)
5(61, 53)	6(57, 40)	7(51.5, 26)	8(48, 16)
9(33.5, 19)	10(22, 25)	11(12, 31)	12(9, 42)
13(25, 47)	14(20, 40)	15(46, 35)	16(24, 37)
17(33.5, 52)	18(32, 43.5)	19(38, 57.5)	20(40, 5, 50)
21(37, 45)	22(40, 30)	23(46, 52)	24(53, 50.5)
25(50, 43)	26(28, 52)	27(43, 45)	28(28, 28)
29(37, 25)	30(40, 41.75)	31(44, 22)	32(36, 35)
33(35, 39)	34(30, 34)		

5 结束语

美国的双射程 双任务导弹历经近 20 年的探索和发展,目前已进入工程化发展阶段,通过对其进行较为深入的技术分析,可以更清楚地认识双射程 双任务导弹和相关的武器火控系统及其发展趋势。

参考文献

- [1] Dual Range Missile Air Superiority Missile Technology (ASMT) [Z/OL] [2009-09-01] <http://www.fas.com>.
- [2] 李佑义. 美空军探索双射程空空导弹 [J]. 现代军事, 1998(4): 29-30.
- [3] 高劲松, 孙晓琳, 赵东方. 美国双射程双任务导弹的发

展 [J]. 国际航空, 2009(2): 46-47.

- [4] 高劲松, 杨慧. 美国双射程双任务导弹评述 [J]. 国际航空, 2009(4): 33-35.
- [5] 高劲松, 孙隆和. 双射弹的擦肩发射原理研究 [J]. 电光与控制, 2006, 13(6): 24-27.
- [6] 高劲松, 田省民. 以本机为中心的全向攻击的概念研究 [J]. 电光与控制, 2008, 15(8): 61-63.
- [7] HEWSON R. Jane's air-launched weapons[M]. Jane's Information Group Limited 2008.
- [8] 杰伊·米勒. “猛禽”F-22 新一代主力战机 [M]. 杨晨光, 白堃, 译. 北京: 科学普及出版社, 2009.
- [9] 杨伟, 陈林. JSF 联合攻击战斗机 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [10] Unmanned system roadmap 2007-2032 [Z]. Office of the Secretary of Defense Washington DC Oct 2007.

(上接第 24 页)

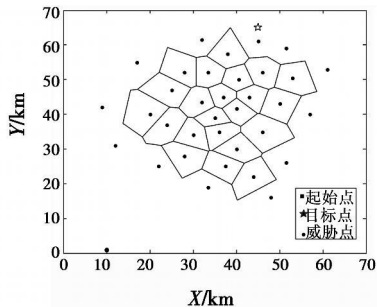


图 2 UCAV 的任务态势 Voronoi 图

Fig 2 Situation Voronoi map of UCAV

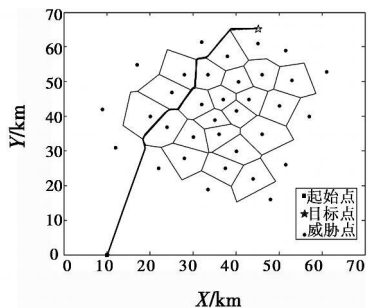


图 3 蚁群算法优化后的无人作战飞机可行航路图

Fig 3 The feasible path planning map of UCAV by using ant colony optimization algorithm

5 结论

Voronoi 图能够有效地将地理信息中的点、对象和区域以集合拓扑结构表示出来,并且能够通过这些拓扑关系表示自然语言中的定性关系和模糊地理信息,这种性质对于航线规划非常关键,尤其对于初始航线集或者航路区域的确定很重要。本文在传统 Voronoi 图的基础上,根据已知的威胁分布情况,采用 Voronoi 图对敌方区域进行划分,运用蚁群算法对无人机航路

进行规划,仿真结果表明 ACO 算法在 Voronoi 图中进行航路规划的可行性,可行航路保证 UCAV 能够回避各种威胁,顺利地飞抵目标点。值得注意的一点是,在基于 Voronoi 图和蚁群优化算法的无人作战飞机航路规划以后,为了保证航迹的可飞性,必须满足一些限制的条件,例如最大过载及转弯半径限制,此时可以采用其他的方法对航迹进行光滑细化。

参考文献

- [1] 韩志刚, 贺建良, 孙隆和, 等. 现代空对地攻击技术 [J]. 电光与控制, 1999, 6(4): 17-22.
- [2] 孙彪, 朱凡. 采用粒子群优化算法的无人机实时航迹规划 [J]. 电光与控制, 2008, 15(1): 35-38.
- [3] 田伟. 无人作战飞机航路规划研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [4] 马云红, 周德云. 基于遗传算法的无人机航路规划 [J]. 电光与控制, 2005, 12(5): 24-27.
- [5] 柳长安. 无人机航路规划方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [6] 任波, 于雷, 韩李勋. 自适应蚁群算法的无人机航迹规划方法 [J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 38-39.
- [7] 叶媛媛, 闵春平. 基于 Voronoi 图的无人机空域任务规划方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2005(6): 1353-1355.
- [8] ALBERTO C. DORIGO M, VITTORIO M, et al Distributed optimization by ant colonies[C] //Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life Paris 1991, 134-142.
- [9] 段海滨, 王道波, 朱家强, 等. 蚁群算法理论及应用研究的进展 [J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1321-1326.
- [10] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [11] 彭斯俊, 黄樟灿, 刘道海, 等. 基于蚂蚁系统的 TSP 问题的新算法 [J]. 武汉汽车工业大学学报, 1998, 20(5): 88-92.