

基于 VORONOI 图的无人机空域任务规划方法研究

叶媛媛¹, 闵春平², 沈林成¹, 常文森¹(¹国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073 ²第二炮兵装备研究院 北京 100085)

摘 要: 无人机任务规划系统对充分发挥无人机自主控制与飞行和自主执行任务的能力起着十分关键的作用。在分析 VORONOI 图的性质的基础上, 以压制敌防空火力作战任务想定为背景研究基于 VORONOI 图的无人机任务规划技术, 重点讨论了规划环境建模、航路代价计算和初始航路选择问题。最后对该方法进行了时间和空间性能分析。

关键词: 任务规划; VORONOI 图; 压制敌防空火力; 无人机; 空域

文章编号: 1004-731X (2005) 06-1353-03

中图分类号: TP391

文献标识码: A

VORONOI Diagram Based Spatial Mission Planning for UAVs

YE Yuan-yuan¹, MIN Chun-ping², SHEN Lin-cheng¹, CHANG Wen-sen¹(¹College of Electromechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;²Second Artillery Equipment Academe, Beijing 100085, China)

Abstract: Mission planning systems play important roles in autonomous intelligent control and mission capability of UAV. On the basis of analyzing VORONOI Diagrams' attributes, a VORONOI-Diagram-based mission planning approach for UAVs is studied. Under the scenario of Suppression of Enemy Air Defense, we focus on the planning environments modeling, flight path cost computing and initial cooperating paths selecting. Using this method the planning space dimensions of UAV can be reduced. Also this approach enables multiple UAVs to find spatial cooperating paths much easier. Finally, the analysis of temporal and spatial performance is discussed.

Key words: mission planning; VORONOI Diagram; suppression of enemy air defense; UAV; spatial

引言

近几年, 关于将无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)应用于各种军事和民用任务的研究引起了越来越多人的兴趣。无人机以其自身的优势, 尤其适合飞行任务要求严格或高度危险的任务环境中, 如军事侦察、监视、压制敌防空火力、电子干扰以及交通巡查等。这些任务都要求无人机能够确定什么时候进行什么任务, 如何完成任务, 从而使其完成任务代价最小, 如燃油最少, 安全概率最大, 任务成功概率最大等。无人机任务通常通过航路来组织, 包括中途点、转弯点, 飞行速度和高度等, 因此无人机任务规划系统主要通过航路进行规划来组织无人机的飞行任务。

通常情况下, 无人机任务约束条件复杂、任务空间广、任务多样, 不确定因素繁多, 因此很难一次性、快速地确定无人机的航路, 尤其难于确定多无人机协同执行任务的协同规划解。我们认为采取无人机层次规划思想, 即首先快速地给出初始参考航路, 然后对初始参考航路逐步施加其他约束条件和任务指标, 最后获得满意的任务规划解, 使得无人机任务规划系统充分实时给出可行规划结果的同时, 能够充分灵活地在各个任务目标和约束条件之间折中平衡, 并及时处理任务执行过程中的不确定因素。本文主要研究层次规划的第一步, 即如何快速地确定无人机初始可选航路以及无人机

协同执行任务的初始可选航路集。

下面, 论文以典型的压制敌防空火力 (SEAD, Suppression of Enemy Air Defense) 作战任务想定为背景 (如图 1 所示), 探讨如何应用 VORONOI 图到无人机任务规划问题中, 重点讨论基于 VORONOI 图的无人机任务规划方法中规划环境建模、航路代价计算和初始航路搜索问题, 最后对该方法进行了时间和空间性能分析。

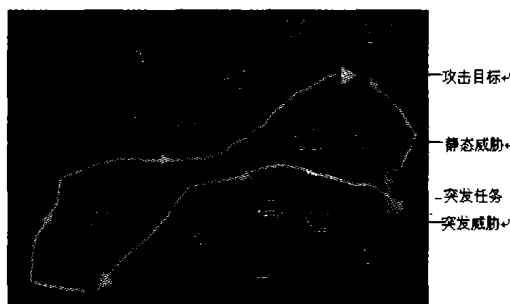


图 1 对空中防御压制任务场景

1 无人机任务规划环境的 VORONOI 图建模

VORONOI 图是一种表示点或实体集合近似信息的几何结构。给定一个点或者实体集合, 平面就可以划分成距离各个点或者实体最近距离的凸网, 这个凸网即称为 VORONOI 图。通过 VORONOI 图能够有效的将地理信息中的点、对象和区域以拓扑结构表示出来, 并能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, 从而对这种定性关系进行度量^[6]。本文认为正是上述性质使得 VORONOI 图能够应用在

无人机任务规划问题中,同时一些比较成熟的 VORONOI 图构建方法也为其应用到无人机任务规划领域奠定了基础。下面本文阐述如何应用 VORONOI 图对无人机任务规划问题建模。

如图 1 所示为典型的压制敌防空火力任务想定,想定中除了有已知的静态配置的威胁,还可能有突然出现的威胁,所攻击的目标往往并不孤立存在而是处于多重防空武器的覆盖保护之下。无人机在执行预定任务过程中可能顺便执行一些其他打击或者侦察任务等。本文为讨论问题方便,假设这些威胁为防空雷达,包括静态配置雷达和突然启动的雷达(突发威胁)。无人机距雷达越远,则越不容易被发现,越安全。可以设想将雷达膨胀成一个球体,这些球体相交构成以雷达为中心的多面体,相交面就是两雷达威胁都达到最小的区域,也就是无人机应该选择的航路区域。

通过 VORONOI 图对规划环境表达的基本思路为:将威胁中心位置作为 VORONOI 图的点,以威胁大小作为 VORONOI 图邻近区域的“距离”量度,构建威胁配置的 VORONOI 图,“距离”越大则所受威胁越小, VORONOI 图的各条边在相应点的领域内距威胁“距离”最大,因而所受威胁相应最小。针对压制敌防空火力作战想定,本文考虑雷达的探测能力与距雷达距离的四次方成反比,因此构建威胁配置的 VORONOI 图,距离的度量即以欧氏距离为度量标准。如图 2 所示为根据作战想定建立的 VORONOI 图,圆点表示对方的威胁配置。

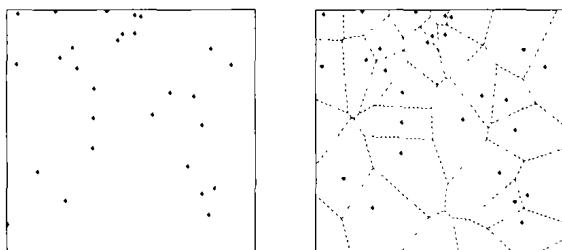


图 2 对方威胁配置分布与相应的 VORONOI 图

2 基于 VORONOI 图的航路代价计算

无人机任务规划问题是一个约束条件复杂的多目标问题,通常情况下很难快速地一次性得到最满意的解。依据层次规划的思想,首先考虑某些约束条件和目标,确定初始可行的任务解集,而后在初始任务解集之上施加其他的约束条件和目标指标,分层对任务规划约束条件和目标处理,最后得到满意的或者最优的无人机任务规划解。基于上述思想,本文首先考虑与距离直接相关的危险性代价和燃油代价,危险性代价与到雷达的距离的四次方成反比,燃油代价与航路段的长度和速度有关,此处暂不考虑速度因素。

对于上述想定的情形,单个 UAV 沿着 V 图的每一条边飞行,都将具有一定的代价,本文首先考虑与距离直接相关的危险性代价 J_{threat} (与边到雷达的距离和航速有关)和燃油代价 J_{fuel} (与航路长度和航速有关)。记第 i 条边到第 j 雷达的危险性代价为 $J_{threat,i,j} = f(l_i, v_i)$, 通常航速保持不变,则第 i 条边到第 j 雷达的危险性代价为第 i 条边上各点到第 j 雷达的积分,即:

$$J_{threat,i,j} = \int J(l) dl$$

实际中通常取边上的几个点进行加权平均,本文取 1/4, 1/2, 3/4 点的代价加权,即

$$J_{threat,i,j} = \alpha_{i,j} \left(\frac{1}{d_{1/4,i,j}^4} + \frac{1}{d_{1/2,i,j}^4} + \frac{1}{d_{3/4,i,j}^4} \right)$$

这样第 i 条边的危险性代价为所有雷达对该边的威胁之和:

$$J_{threat,i} = \sum_{j=1}^N J_{threat,i,j}$$

记第 i 条边的燃油代价为 $J_{fuel,i} = g(l_i, v_i)$ 。这样边的总代价由危险性代价和燃油代价两个因素决定。一条航路的代价为组成航路的 VORONOI 图中边的代价之和,即

$$J_{road} = \sum_{i=1}^M \phi(J_{threat,i}, J_{fuel,i})$$

航路规划问题就可以变为对 VORONOI 图的搜索。在这两个目标之间如何权衡将体现决策人员的战术倾向和作战价值倾向,可以作为一个多目标决策和优化问题,也可以转换为一个单目标决策问题。本文考虑将双目标决策问题通过线性组合转换成单目标决策问题:

$$J_{road} = \sum_{i=1}^M (kJ_{threat,i} + (1-k)J_{fuel,i})$$

其中 $0 \leq k \leq 1$, k 体现决策者对两个因素的倾向, $k=1$ 表明决策者不惜燃油代价,追求航路的安全性,而 $k=0$ 则意味着不考虑安全,仅追求燃油量最小。

3 基于 VORONOI 图搜索的航路规划

基于 VORONOI 图确定初始航路是无人机层次规划中的第一步,并不追求最优解,目标在于找到足够多的可选航路区域,从而逐步降低进一步优化航路的空间复杂性。本文采用满意剪枝策略对搜索过程中的不满足航路代价指标的航路直接进行剪枝,搜索无人机初始航路集合,算法如下:

1. 初始化: 确定无人机的出发点 Start_Point, 即规划树的根(Root), 目标点 Target_Point, 危险性代价和燃油代价指标 Threat_Threshold, Fuel_Threshold,
2. 对于当前点 Current_Point, 扩展得到 Childs, 对于每一个 Child
 - a) 如果 Child 到目标点的路程小于切入目标距离, 则
 - i. 计算 Current_Point 到 Childs 之间路段的危险性代价 Threat 和燃油代价 Fuel
 - ii. if Threat < Threat_Threshold, Fuel < Fuel_Threshold, 则 Child 添加到规划树 else 放弃这条路段
 - b) 否则, 算法成功退出
3. 输出可选航路段

通过该算法为无人机进一步的任务规划提供规划空间,尤其是确定了多无人机协同作战空域规划的参考航路空间。Threat_Threshold 和 Fuel_Threshold 值的大小决定了对航路要求的强度,体现了任务执行中所愿意花费的代价,对 Threat_Threshold 和 Fuel_Threshold 要求越严格,则得到的

航路越少。如图 3、4 是本文在图 1 想定中对方威胁配置之下, 建立 VORONOI 图并确定的初始航路。

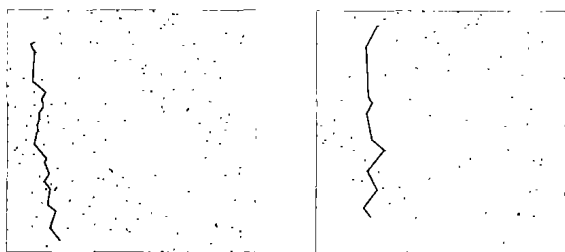


图 3 根据 VORONOI 所确定初始航路

图 3 所示为 Threat_Threshold 和 Fuel_Threshold 取某值时的单一航路, 点表示对方的威胁配置, 星号表示攻击目标, 圆圈表示无人机的出发点。航路的终端为预定的目标切入点, 初始航路的确定中假设无人机的飞行高度不变。从图 3 中可以看到, 航路避开了威胁配置较密集的地方, 同时尽量以较短的航路接近目标, 其中代价侧重于危险性因素。通常情况下, 希望给出更多的初始航路, 一方面是多机协同的需要, 另一方面能够提供航路的多样性, 更有利于无人机之间的协同, 并在某些航路不可用的情况下可以快速选择其他航路。

如图 4 所示为通过 VORONOI 图所确定的多条可选航路。图 4 中通过 VORONOI 所确定的初始航路集基本避开了威胁配置密集区, 在威胁性满足一定指标的情况下, 兼顾航路尽量短, 即燃油尽量少的目标。图 4 的初始航路集为多机协同提供了初始的协同航路。

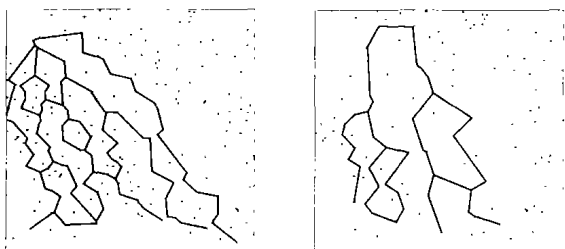


图 4 根据 VORONOI 确定的初始航路集

4 基于 VORONOI 图任务规划的空间和时间可行性分析

一个规划算法不可行或者算法性能优劣的因素一方面是考察算法能否找到解, 另一方面算法的时间和空间性能也是非常重要而关键的因素, 特别对于无人机而言, 时间性能尤其是影响无人机自主和机动灵活性的重要指标, 基于 VORONOI 图的任务规划方法同样也必须考虑在实际应用中的时间和空间性能。下面本文从空间和时间代价方面对于 VORONOI 用于无人机任务规划问题做了分析, 并表明其可以适用于无人机任务规划问题。

定理 1 N 个点上的 VORONOI 图至多有 $2N-5$ 个顶点和 $3N-6$ 条边。

定理 2 对于 N 个点的 VORONOI 图, 最坏情形下, 平面上的 N 个点构造一个 VORONOI 图需要进行 $O(N \log N)$ 次运算。

定理 3 生成树算法构造 N 个点的 VORONOI 图要运行

$O(N \log N)$ 次, 占用存储 $O(N)$ 。

定理 1 和定理 3 说明, VORONOI 图所耗费的空间代价与 VORONOI 图的点成多项式比例关系, 具体到本无人机任务规划中, 即与对方威胁数目成正比例, 因此该方法用于无人机任务规划中在空间耗费上完全可行。

定理 2 和定理 3 中说明构造 VORONOI 图的运算量并不与点数构成指数关系, 这足以说明构造 VORONOI 图的时间代价是可以接受的。本文通过分别对具有 100、1000 和 10000 个点的情形构造 VORONOI 图所用的时间进行了统计, 如表 1。

表 1 VORONOI 图构造时间性能统计^[11]

点个数	100	1000	10000
总时间(s) (500 次)	79.2350	744.1390	6789.2
平均时间(s)	0.1847	1.4883	13.5784

将 VORONOI 图应用于任务规划之中, 所用时间包括构造 VORONOI 所用的时间以及通过 VORONOI 图搜索初始航路的时间。如图 5 不同威胁配置下的算法所用时间。

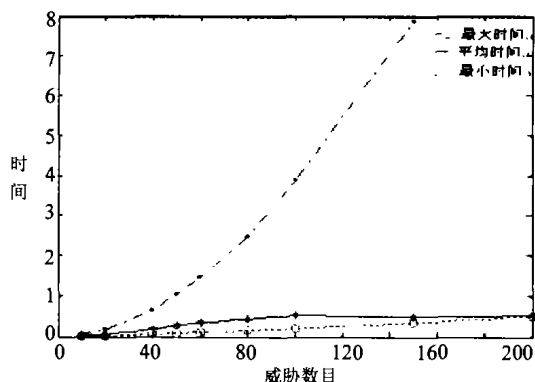


图 5 不同威胁配置下的算法所用时间

图 5 中对于具有 150 个和 200 个威胁的情形下所用平均时间反而有所减少, 是因为本文考虑的任务范围为 $500 \times 500 \text{ km}$, 而在这个范围内布置 150 或者更多威胁造成对方威胁过于密集, 算法无法找到满足代价要求的航路, 从而在开始的时候就使得算法因为失败而退出的概率大大增加, 从而导致平均时间反而出现减少的情形。对于具有 200 个威胁配置的情况下, 由于威胁配置过于密集而导致基本上找不到满足指定代价的航路, 也导致算法很快退出。从表中看出, 对于可以找到航路的情形, 算法所用时间随着威胁数目呈线性增长的趋势。因此从试验结果分析, 通过 VORONOI 对无人机任务规划建模, 而后快速确定其初始可选航路可行。

5 结论

无人机任务规划问题约束条件复杂, 目标不唯一, 本文认为采用层次化的规划方法是一种有效的无人机任务规划问题, 即首先考虑某些目标和约束条件, 快速确定无人机的初始航路, 而后逐步施加其他约束条件, 最终获得各个目标不同折中平衡之下的任务解。本文在这种思路指导下, 以典型压制敌防空火力为背景, 应用 VORONOI 图对无人机任务规划问题建模, 首先考虑与距离直接相关的威胁性代价和燃

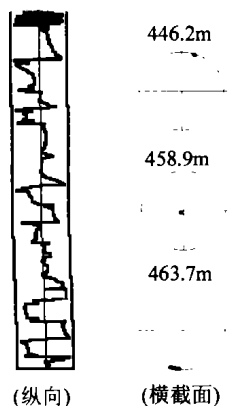


图8 7S时抽油杆柱与井筒碰撞接触状态

表1 不同井深处抽油杆柱内力与强度计算结果

井深 /m	平均轴力 /kN	平均扭矩 /N·m	动扭矩 /N·m	平均弯矩 /N·m	动弯矩 /N·m	安全 系数
0.0	35.1	-117.0	23.8	147.8	4.6	7.95
101.6	31.4	-115.3	23.4	110.0	3.8	9.31
203.6	27.5	-107.6	22.5	159.8	8.3	7.52
306.2	23.5	-104.2	20.5	149.3	18.3	6.28
373.8	20.9	-88.1	20.8	573.5	92.2	1.71
399.7	19.9	-80.1	21.5	279.7	47.6	3.23
501.7	16.0	-78.5	18.2	27.2	7.7	13.69
595.3	12.4	-76.4	15.3	49.3	16.9	9.59
697.3	8.4	-74.9	12.2	39.1	9.7	14.49
808.3	4.1	-73.6	7.9	59.2	14.5	11.77
923.0	-0.1	-71.9	0.7	4.9	17.0	14.69

表2 不同井深处碰撞力计算结果

井深/m	间隙/mm	碰撞率/%	平均碰撞力/N	最大碰撞力/N	扶正器
378.6	1.5	100.0	209.0	218.2	Y
387.1	10.0	100.0	82.9	83.5	Y
395.5	10.0	100.0	73.1	73.3	Y
404.0	10.0	100.0	39.8	39.9	Y
412.4	10.0	100.0	8.8	9.1	Y
420.9	10.0	0.0	0.0	0.0	N
433.5	25.5	0.0	0.0	0.0	N
442.0	25.5	0.0	0.0	0.0	N
454.7	10.0	0.0	0.0	0.0	N
43.7	1.5	100.0	20.0	20.1	Y

4 结论

(1) 在螺杆泵采油技术中, 抽油杆柱的工作状态仿真是解决抽油杆失效的主要途径, 文中建立的井筒内旋转抽油杆

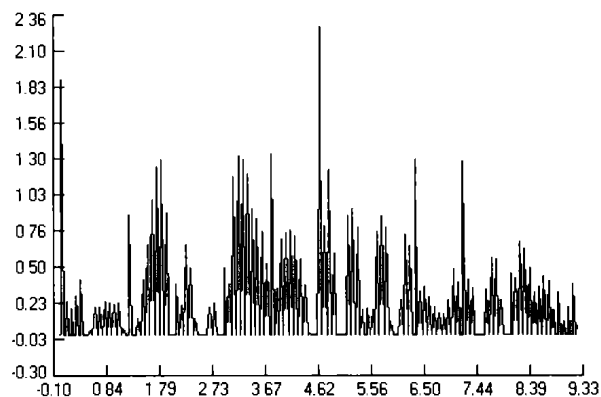


图9 7S时抽油杆柱与井筒碰撞接触力

柱动力学仿真方法, 为正确描述抽油杆柱的运动和受力变形状态提供了一种行之有效的技术手段。

(2) 通过旋转抽油杆柱动力学仿真, 能得到抽油杆柱在时域内的内力和应力、碰撞接触和运动状态, 进一步计算出碰撞率和平均碰撞力、平均应力和应力幅; 据此可进行抽油杆柱强度校核和设计、扶正器安放位置设计, 也可对抽油杆柱失效机理进行分析和解释。

(3) 本文建立的井筒内旋转抽油杆柱动力学仿真方法, 已在大庆油田聚驱螺杆泵抽油杆柱设计、杆柱失效机理分析和预防措施制订中得到应用, 也可以在其它油田推广应用。

参考文献:

- [1] 韩修廷, 王修玲, 焦振强. 螺杆泵采油原理及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998, 13-15.
- [2] 程鹏, 顾雪林, 胡才志, 等. 地面驱动单螺杆泵抽油杆失效分析与预防措施[J]. 石油机械, 2000, 28(4): 26-27.
- [3] 晏样慧, 赵文章. 地面驱动螺杆泵空心抽油杆系统的优化设计[J]. 石油机械, 2002, 30(6): 42-45.
- [4] 王早祥, 张彦廷, 李淑萍. 地面驱动螺杆泵杆柱的组合设计[J]. 石油机械, 1998, 26(8): 45-48.
- [5] 隋允康, 任旭春. 斜井单螺杆抽油泵柱和扶正器间距的最优设计[J]. 计算力学学报, 2002, 19(1): 58-62.
- [6] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988, 403-436.
- [7] William Weaver, Jr.. Structural Dynamics by Finite elements [M]. Prentice, Inc. New Jersey, 1987, 234-239.
- [8] 刘巨保, 丁皓江, 张学鸿. 间隙元在钻柱瞬态动力学分析中的应用[J]. 计算力学学报, 2002, 19(4): 456-460.

(上接第 1355 页)

油代价, 快速确定初始可选航路集, 为后续任务规划确定规划空间, 使得任务规划在各个目标之间可以灵活进行各种指标之下的折中和平衡, 从而获得不同折中和平衡之下的任务规划解, 体现不同的任务策略和思想。

注 1: 本文的试验均在 pc 上进行, AMD, 650MHZ。

参考文献:

- [1] Timothy W McLain, Randal W Beard, etc. Experimental Demonstration of Multiple Robot Cooperative Target Intercept [A],

In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C], Monterey, CA, Aug. 5-8, 2002, Reston, VA.

- [2] 肖位枢. 图论及其算法[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [3] 王树禾. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [4] 张考, 张云飞, 马东立, 等. 飞行器对雷达隐身性能计算与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [5] 朱宝鏊, 朱荣昌, 雄笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [6] 陈军. VORONOI 动态空间数据模型[M]. 北京: 测绘出版社出版, 2002.