

## 一种无人机路径规划算法研究

符小卫, 高晓光

(西北工业大学电子与信息学院, 西安 710072)



**摘要:**指出了飞行器航迹规划与路径规划的区别;提出了一种给定威胁分布下的无人机路径规划算法。根据威胁分布情况构造无人机可能飞行的航路集,用 voronoi 图表示出来,采用 Dijkstra 算法搜索威胁分布图,求解粗略最短路径。在粗略最短路径的基础上,应用三次样条曲线和序列二次规划的方法求解最优路径。用 Matlab 进行仿真验证,证明了算法的有效性。

**关键词:**无人机;路径规划;voronoi 图;Dijkstra 算法;三次样条曲线;序列二次规划

文章编号:1004-731X(2004)01-0020-02 中图分类号:V218 文献标识码:A

## Study on a Kind of Path Planning Algorithm for UAV

FU Xiao-wei, GAO Xiao-guang

(Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The difference between flight path planning and trajectory planning is presented, and a path planning scheme for UAV is developed. Constructing and searching a voronoi diagram based on the locations of the threats, an initial reference threat-avoiding flight path to the target is generated. This initial reference path cannot be followed by the UAV. In this paper, cubic spline theory and sequential quadratic programming are used for optimizing the initial reference path. The optimized path is flyable to the UAV. The Matlab simulation result demonstrates the path planning algorithm is effective.

**Keywords:** UAV; path planning; voronoi diagram; Dijkstra algorithm; cubic spline; SQP

## 引言

飞行路径规划是无人机(UAV)任务规划和航迹规划的一部分,它是依靠地形信息和敌情信息,在某些约束条件下,找出从出发点到目标点无人机生存概率最大的飞行路线,用一系列航路点表示。即:路径规划的目的是要根据任务要求、威胁分布、无人机机动特性、燃料限制选择一条能使无人机回避敌方威胁,安全完成预定任务的飞行路径。而航迹规划是找出一系列具有速度剖面的航路点。

路径规划有多种方法,如:动态规划法<sup>[1][2]</sup>、最速下降法、最优控制方法、启发式搜索法、神经网络法、模拟退火法、遗传算法<sup>[1]</sup>等,各种算法各有其优缺点,算法的优劣主要取决于算法的快速性、算法求出解的最优性。本文在文献<sup>[3]</sup>的基础上,提出一种有别于其路径优化的方法。

## 1 算法的应用条件和主要思想

## 1.1 算法的应用条件

在用该算法进行路径规划时,本文作了以下假设:

威胁分布已知,威胁为敌方雷达;

无人机进入巡航阶段,以定常速度做某一高度的水平飞行,对威胁做回避飞行。

## 1.2 算法的主要思想

首先根据已知的威胁分布情况,取威胁中心点构造出威胁分布的 Voronoi 图<sup>[4]</sup>;在此 Voronoi 图的基础上,利用 dijkstra 算法在图中搜索路径,构成粗略最短路径,其主要缺点是包含不可飞的尖角。下一步是,在粗略最短路径的基础上,寻找无人机可飞的最优路径。主要是通过一系列的三次样条,把复杂的优化问题分解为更小更简单的问题。这有利于利用计算资源,并且可以对突发威胁进行规划。对于这些更小更简单的优化问题,用序列二次规划(Sequential Quadratic Programming)的方法,求得最优解。

## 2 算法的描述

2.1 威胁分布的 Voronoi 图构造<sup>[3]</sup>

根据已知的威胁分布情况,构造出威胁分布的 Voronoi 图,如图 1 所示:

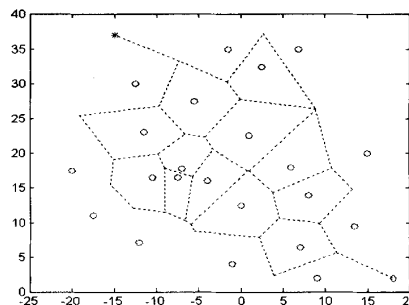


图 1 威胁分布的 voronoi 图

收稿日期:2002-11-07

修回日期:2003-02-17

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20020699001)

作者简介:符小卫(1976-),男,陕西宝鸡人,博士生,研究方向为航空火力控制理论、智能优化理论;高晓光(1957-),女,辽宁鞍山人,教授,博导,博士,研究方向为航空火力控制理论,航空武器系统作战效能分析。

图中小圆圈表示威胁中心点, 星号表示目标点, 菱形表示无人机出发点, 虚线表示 Voronoi 边, 也就是基本路径集合。再把出发点和目标点分别与距离自身最近的 Voronoi 顶点连起来。连接出发点到目标点的这些 Voronoi 边的组合构成了备选路径集, Voronoi 图的顶点构成初始路径的转弯点, 即主要中途航路点。路径规划的任务是找出从出发点 to 目标点无人机能回避敌方威胁, 安全完成预定任务的飞行路径。

可以看出, 通过构造 Voronoi 图, 将路径规划问题从无限维空间的搜索问题到简化到有限维空间搜索的问题, 即路径规划只要在 Voronoi 图所确定的路径集合中进行。

## 2.2 用 Dijkstra 算法选择粗略最短路径<sup>[3]</sup>

Voronoi 图构造好之后, 利用 Dijkstra 算法选择粗略最短路径的关键问题是分配路径代价。

对于上述想定的情形, 单个无人机沿着每一条边飞行, 每一点都将具有一定的代价, 这些代价包括危险性代价和燃油代价。危险性代价指的是无人机暴露在敌方雷达下的程度。燃油代价是指燃油消耗代价。由于无人机以恒定速度飞行, 路径上某一点的危险性代价与无人机当前位置到威胁距离的 4 次方的倒数成正比, 燃料需求代价与经过的路径长度成正比。一条 Voronoi 边的危险性代价  $J_{threat}$  可以用边上  $M$  个离散路径点到  $N$  个威胁的距离量化得到, 燃油代价  $J_{fuel}$  可以用该边的长度  $L$  量化得到。如图 2 所示。

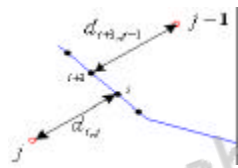


图 2 威胁代价量化

$$J_{threat} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{1}{(d_{ij})^4}$$

$$J_{fuel} = L$$

所以, 一条边的总代价为:

$$J = (1-k)J_{threat} + kJ_{fuel}$$

$$= (1-k) \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{1}{(d_{ij})^4} + kL$$

其中,  $k$  是权重系数, 取值范围 0 到 1。根据任务需求调整  $k$  的大小,  $k$  越接近 1 表示越重视燃油消耗情况, 越接近 0 表示越重视危险性代价。

路径代价确定后, 粗略最短路径的选择是利用 Dijkstra 算法进行图搜索。得到如图 3 红色实线所示粗略最短路径。一旦粗略最短路径选择完成, 接下来的任务就是路径修正和优化。

## 2.3 最短路径修正与优化

最短路径修正与优化的任务是用三次样条曲线对最短路径中不可飞的尖角进行修正, 在修正过程中, 用序列二次规划 (SQP) 寻求最优解。

从出发点到粗略最短路径的第一条 Voronoi 边的最优路径构造和从粗略最短路径的最后一条 Voronoi 边到目标点的最优路径构造是一个相反的过程。所以只说明如何构造从出

发点到第一条 Voronoi 边的最优路径。

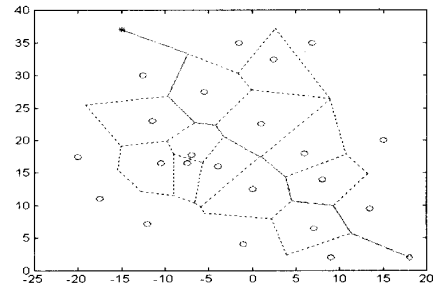


图 3 粗略最短路径

以无人机出发点和第一条 Voronoi 边中点为三次样条曲线的两个节点, 中间节点插入到两条边的相交位置附近, 定义为  $(x, y)$ 。这三个结点用一个三次样条曲线连接起来。样条的起始部分方向由指定的无人机初始航向确定, 终止部分与第一条 Voronoi 边相切。这样能满足无人机初始航向要求, 相应地, 对于从粗略最短路径的最后一条 Voronoi 边到目标点的最优路径的终止部分方向, 可以由无人机进入角确定。

对于从粗略最短路径的第一条 Voronoi 边中点到粗略最短路径的最后一条 Voronoi 边中点之间的最优路径, 也是用三次样条曲线进行连接。相邻两条 Voronoi 边的中点为三次样条曲线的两个节点, 中间节点为这两条 Voronoi 边的相交位置附近, 记为  $(x, y)$ 。样条的起始部分和终止部分分别与这两条 Voronoi 边相切。

接下来, 通过改变  $(x, y)$ , 寻求上述每段满足无人机最小转弯半径限制的样条曲线的最优解。这可以用一个序列二次规划 (SQP) 问题描述:

通过改变:  $(x, y)$

$$\text{使得: } \min: J = (1-k) \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{1}{(d_{ij})^4} + kL$$

并满足:  $R - R_{\min} \geq 0$

即: 在满足  $R - R_{\min} \geq 0$  的情况下, 通过改变  $(x, y)$ , 使得  $J$  最小。其中,  $R_{\min}$  是由无人机自身动力学限制确定的最小转弯半径。  $R$  是样条曲线上每一点的曲率半径。其中,

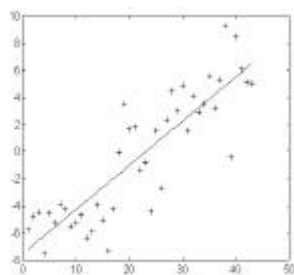
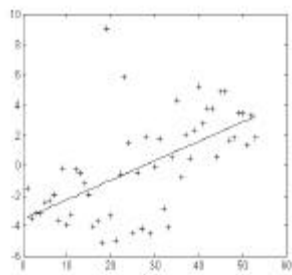
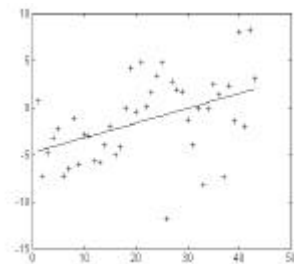
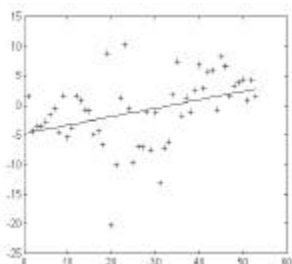
$$R_{\min} = \frac{V_{\min}^2}{g \cdot \sqrt{n_{y\max}^2 - 1}}$$

$$R = \left| \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''} \right|$$

式中,  $V_{\min}$  为无人机最小飞行速度,  $n_{y\max}$  为无人机最大法向过载。  $y'$ 、 $y''$  分别为样条曲线每一点的一阶导数和二阶导数。

## 3 仿真结果

在 MATLAB6.1 中 利用样条工具箱和最优化工具箱<sup>[5]</sup>, 对本文所述算法进行了仿真实验。程序中包含 Voronoi 图生成模块、粗略最短路径搜索模块、最短路径修正与优化模块。图 4 是对图 3 的粗略最短路径进行优化的结果, 图中虚

图 7 目标方位走向, 估计张角  $13.70^\circ$ , 均方误差  $2.34^\circ$ 。图 8 目标方位走向, 估计张角  $6.62^\circ$ , 均方误差  $3.94^\circ$ 。图 9 目标方位走向, 估计张角  $6.69^\circ$ , 均方误差  $2.66^\circ$ 。图 10 目标方位走向, 估计张角  $7.41^\circ$ , 均方误差  $5.33^\circ$ 。

在舷角为  $30^\circ$  时, 目标的几何视在真实张角为  $5.25^\circ$ , 在  $S/N = 5$ ,  $0\text{dB}$  时估计张角分别为  $6.69^\circ$ ,  $7.41^\circ$ , 对应偏差分别为  $1.44^\circ$ ,  $2.16^\circ$ , 并且其估计均方差均较小。由仿真试验统计结果可见在舷角  $30^\circ$ ,  $S/N = 5\text{dB}$  时, 其估计偏差小于

$1.5^\circ$ , 此种情况下能完成尺度识别功能。

由多航次仿真试验统计结果可见: 发射信号脉宽在  $40 \sim 50\text{ms}$  时, 利于时间分割自适应方法识别目标尺度; 在舷角为  $30^\circ$  左右的方位上识别效果较好; 在正横方位附近, 识别效果较差; 适于在较低  $S/N$  下工作, 在  $S/N = 0\text{dB}$  时仍可完成目标尺度识别功能。

### 3 结论

本文研究了基于分裂波束目标视在张角特征量的目标尺度识别方法, 给出自适应算法及结构, 算法对目标多卜勒有良好的适应性, 可在较低信噪比下有较好的识别性能; 给出了仿真结果及其适用条件, 同时得出了目标视在张角的估计方差。仿真表明: 发射信号脉宽在  $40 \sim 50\text{ms}$ , 舷角为  $30^\circ$  左右的方位上, 在  $S/N = 0\text{dB}$  时仍具有良好的目标识别能力。

### 参考文献:

- [1] 汤渭霖. 声纳目标回波的亮点模型[J]. 声学学报, 1994.
- [2] Yongmin Jiang. A study on underwater target near field echo characteristics[C]. UDT' 96, London UK.
- [3] 郑兆宁, 向大威. 水声信号被动检测与参数估计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [4] Simon Haykin. Adaptive filter theory[M]. Prentice Hall, Inc, 1996.
- [5] Piersol A G. Time delay estimation using phase data[C]. IEEE Trans.ASSP, 1981.

(上接第 19 页)

### 参考文献:

- [1] A J Bell, T J Sejnowski. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution [J]. Neural Computation, 1995, 7(6): 1129-1159.
- [2] T W Lee, et al. Independent component analysis using an extended infomax algorithm for mixed sub-Gaussian and super-Gaussian

sources [J]. Neural Computation, 1999, 11(2): 409-433.

- [3] A Hyvarinen, et al. A fast fixed-point algorithm for independent analysis [J]. Neural Computation, 1997, 9: 1483-1492.
- [4] Linsker R. An application of the principle of maximum information preservation to linear systems [A]. Touretzky D S. Advances in Neural Information Processing System 1 [C]. Morgan-Kaufman, 1989.
- [5] Amari. Natural gradient works efficiently in learning [J]. Neural Computation, 1998, 10: 251-276.

(上接第 21 页)

线表示粗略最短路径, 实线表示最优路径。无人机初始航向和进入角均为  $45^\circ$ , 规划区域为  $40\text{km} \times 40\text{km}$ 。

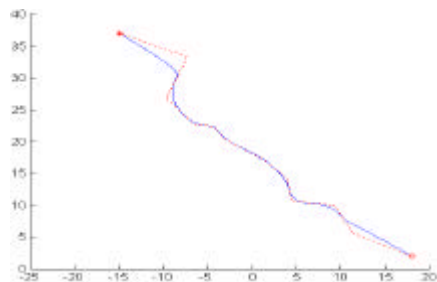


图 4 最优飞行路径

### 4 结论

规划结果表明, 此算法能在满足无人机初始航向和进入

角限制以及最小转弯半径要求的前提下, 规划出无人机可飞的最小代价路径。

对于有突发威胁的情况, 可以通过局部重构 Voronoi 图进行路径的局部重规划。

### 参考文献:

- [1] 张海, 周德云, 佟明安. 对地攻击的路线规划方法[J]. 电光与控制, 1999, (1): 37-42.
- [2] 高晖, 陈欣, 夏云程. 无人机航路规划研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 135-138.
- [3] McLain Timothy W, Beard Randal W. Trajectory Planning for Coordinated Rendezvous of Unmanned Air Vehicles[C]. AIAA-2000-4369.
- [4] 普霍帕拉塔 F P, 沙莫斯 M I, 等. 计算几何导论[M]. 庄心谷译. 北京: 科学出版社, 1992: 250-273.
- [5] 苏金明, 阮沈勇. MATLAB6.1 实用指南(下册) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.



论文写作，论文降重，  
论文格式排版，论文发表，  
专业硕博团队，十年论文服务经验



SCI期刊发表，论文润色，  
英文翻译，提供全流程发表支持  
全程美籍资深编辑顾问贴心服务

免费论文查重：<http://free.paperyy.com>

3亿免费文献下载：<http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重：[http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载：<http://ppt.ixueshu.com>

---

阅读此文的还阅读了：

- [1. 1-Wire总线器件ROM搜索算法与即插即用技术研究](#)
- [2. 多目标规划方法综述](#)
- [3. 提高无人机飞控系统数据采集准确度的算法准则](#)
- [4. 国外无人机自主飞行控制研究](#)
- [5. 利用动态规划算法求解最短路径](#)
- [6. 合乘出行信息检索的路径匹配算法](#)
- [7. 基于贝叶斯优化的无人机路径规划算法](#)
- [8. 图的广义M-中心的一类应用](#)
- [9. 无人机飞越大西洋](#)
- [10. 图的广义M-中心的一类应用](#)
- [11. 基于线性不等式组的选课模型](#)
- [12. EMR系统机器人自主规划技术的研究](#)
- [13. 一种求路径的算法](#)
- [14. 基于最短路径的城市干道网规划的算法研究](#)
- [15. 一种改进的UAV三维航迹实时规划算法](#)
- [16. 基于Bellman-Ford算法的无人机路径规划研究](#)

- [17. 一种无人机路径规划的混沌遗传算法](#)
- [18. 一种多约束条件下路径规划算法研究](#)
- [19. 双臂空间机器人的通用运动学路径规划算法](#)
- [20. 电力光纤通信网络的最佳路径选择](#)
- [21. s-t路径确定方法的研究](#)
- [22. 一种基于遗传算法一模式搜索法的无人机路径规划](#)
- [23. 有里程和时间窗约束的一体化车辆调度智能优化](#)
- [24. 一种无人机的航迹规划和自主导航算法](#)
- [25. 天然气管网系统规划研究](#)
- [26. Floyd算法求解最短路径的简明方法](#)
- [27. 多无人机协同路径规划研究综述](#)
- [28. 面向地面运动目标的无人机协同航迹规划](#)
- [29. 基于改进分散搜索算法的无人机路径规划](#)
- [30. 基于改进蚁群算法的低空突防航迹规划](#)
- [31. 无人机航迹规划算法的初步研究](#)
- [32. 一种确定定长路径的有效算法\(英文\)](#)
- [33. 全部路径之枚举算法](#)
- [34. 一种无人机路径规划算法研究](#)
- [35. 基于视觉信息的无人机自主着陆过程姿态角简化计算方法](#)
- [36. 一种时间依赖路网最小时间路径规划算法研究](#)
- [37. 基于改进A-Star算法的无人机航迹规划算法研究](#)
- [38. 基于改进遗传算法的多无人机路径规划](#)
- [39. 采用退火遗传算法的配电网优化方法](#)
- [40. 特殊工件精密磨削加工方案的一种规划算法](#)
- [41. 基于专家PID的小型无人机导航算法设计](#)
- [42. Floyd算法求解最短路径时的路径确定](#)
- [43. 基于桥CA方案认证的路径构造及验证系统设计](#)
- [44. 采用退火遗传算法的配电网优化方法](#)
- [45. 超级独角兽现象与阿里巴巴路径](#)
- [46. 求最大带宽路的一种新算法](#)
- [47. 一种安全约束经济调度广义网络流规划算法](#)
- [48. 基于线性不等式组的选课模型](#)
- [49. 遗传算法在时间最优路径规划中的应用](#)
- [50. 用户供电可靠性规划算法的探讨](#)