

文章编号:1001-9081(2006)02-0494-02

## 无人直升机路径规划算法研究

余翔,王新民,李俨

(西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710072)

(yuxiangxx\_1110@163.com)

**摘要:**提出了一种基于已知威胁点分布的 Voronoi 图的无人直升机路径规划算法。利用 Dijkstra 算法搜索出无人直升机初始最短路径,在此基础上利用威胁加权划分威胁区域对路径进行二次规划,在无人直升机机动特性的限制条件下对路径进行平滑处理,且考虑到突发威胁体出现的条件下再次对路径进行局部重规划求解最佳路径。通过 Matlab 6.5 对算法进行仿真验证了算法的可行性。

**关键词:**无人直升机;路径规划;威胁加权;突发威胁体;局部重规划

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

## Study of a path planning algorithm for unmanned helicopter

YU Xiang, WANG Xin-min, LI Yan

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shannxi 710072, China)

**Abstract:** Path Planning methods based on known threats for an unmanned helicopter were proposed, an initial shortest path of an unmanned helicopter was developed by Dijkstra Algorithm. The path was re-planning when minatory districts were divided through threat weighting, and the path was smoothed under the conditions of maneuverability characteristics of an unmanned helicopter. If there was a pop-up threat, the path will be re-planning locally, so as to get the best path. And the correctness of the algorithm proposed was proved by the simulation in Matlab 6.5.

**Key words:** unmanned helicopter; path planning; threat weighting; pop-up threat; path re-planning locally

## 0 引言

无人直升机 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)因其飞行的灵活性、控制的复杂性而备受研究者的重视。直升机可以利用其横飞、倒飞、悬停、协调转弯等功能完成地形测量、侦察等战术任务。飞机设计工作的最终目标是尽可能取得高性能,对于无人直升机来说,航迹特性是其飞行性能的基本内容。路径规划的目的是要根据任务要求、威胁分布、机动特性等选择一条能使无人直升机能避开敌方威胁、完成预定任务的飞行路径。

从上世纪 80 年代开始,欧洲各国相继开展了战术飞行轨迹优化方面的研究<sup>[1]</sup>,优化算法包括动态规划法、启发式搜索算法、神经网络、模拟退火法、专家系统及机器学习等<sup>[2]</sup>,各种算法各有优缺点。无人直升机一方面飞行方式多样,另一方面其飞行速度一般远大于地面机器人和空中漂浮机器人,本文提出一种包括路径优化、威胁加权、路径平滑、突然出现威胁点等情况的较全面的无人直升机路径规划方法。

## 1 算法描述

### 1.1 路径规划算法思想简介

Voronoi 图是计算几何中一种重要的几何结构,通过已知的威胁点构造 Voronoi 图,边界就是所有可飞路径,在此基础上利用 Dijkstra 算法对路径进行初步规划,构成粗略最短路径。

由于威胁点实际上是有着不同威胁程度的威胁点,故粗略最短路径并不能反映威胁程度不同状况下的飞行路径,本文采用划分威胁区域的方法对粗略最短路径进一步处理。考虑到无人直升机的转弯半径等机动特性对路径中不可飞的尖角采用不过点法进行协调转弯。最后本文提出的路径规划算法还考虑了出现突然威胁点的路径规划情况,并进行了仿真验证。

### 1.2 路径规划算法描述

#### 1.2.1 威胁分布的构造及初始路径的规划

已知威胁点若干,通过 Voronoi 图构造出敌方威胁图。基于 Voronoi 图的航迹规划算法一般是分两步进行,第一步生成初始航迹。首先通过已知的敌方雷达或威胁构造 Voronoi 图,对于有  $M$  个雷达站或威胁的威胁场, Voronoi 图将威胁场划分为  $M$  个凸多边形,每个凸多边形仅包含一个雷达站或威胁。多边形内任一点到相应雷达站的距离最近。Voronoi 图中的每条边是相邻雷达站或威胁的垂直平分线。Voronoi 图的边界就是所有可飞的航迹。在此基础上利用 Dijkstra 算法搜索最短路径,找到从初始点到目标点经过威胁区域的最短路径。图 1 就是在 Matlab 6.5 下仿真的威胁图及初始最短路径。

图中黑色圆点表示已知威胁点的分布,黑色实心点表示可行路由点,黑色五角星点表示经过 Dijkstra 算法搜索可行路由点。S 表示起始点, T 表示目标点。经过威胁区域从起始点到目标点所有可行路径的集合用图中黑色虚线表示,图中

收稿日期:2005-09-02;修订日期:2005-10-27

**作者简介:**余翔(1981-),男,湖南株洲人,博士研究生,主要研究方向:飞行器控制、导航、计算机控制;王新民(1951-),男,江苏扬州人,教授,博士生导师,主要研究方向:飞行器控制、导航与制导、先进控制技术及仿真;李俨(1973-),男,河南郑州人,副教授,博士,主要研究方向:飞行器控制、鲁棒控制等。

黑色实线表示经过 Dijkstra 算法搜索的初始最短路径。

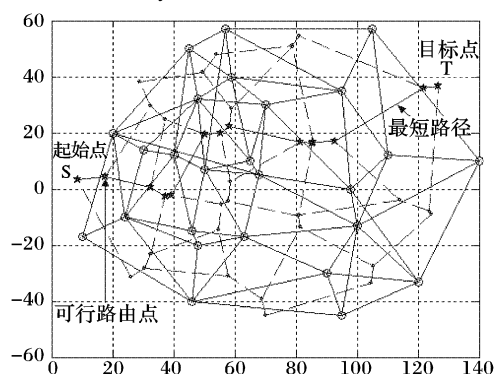


图1 威胁点分布及初始路径

### 1.2.2 不同威胁程度的威胁点的威胁区域划分

通过已知的威胁点构造 Voronoi 图,在实际中各个威胁点的威胁程度是不同的。在此问题上,国内外学者也做过一些相关研究。文献[3]提出了一种机群协同时分布规划航迹的方法。首先基于威胁所在和目标要求构造了 Voronoi 图,采用了威胁程度和耗油量两个指标的加权和形式来衡量航迹的优劣,权值的选取可以依据具体任务要求而定,这样通过搜索得到最初的航迹后将其进行所谓的“离散化”,即分割成长度一定的单元环节,可形象的称之为“链条化”。文献[4]建立具有不同威胁体的局部空域路径选择原则,描述了基于图形模型的进化优化算法。

本文提出不同于上述划分威胁体的方法,采取划分威胁区域进行仿真研究。图2中两个威胁点A和B,其威胁系数分别为 $r_1$ 和 $r_2$ ,其中 $r_1 > r_2$ 。威胁点A的坐标为 $(x_A, y_A)$ ,威胁点B的坐标为 $(x_B, y_B)$ ,那么威胁点A、B之间的欧式距离为 $D = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$ 。文中划分威胁点A的威胁区域为以 $d_1$ 为半径的半圆区域, $d_1 = \frac{r_1}{r_1 + r_2} \times D$ ,威胁点B的

威胁区域为以 $d_2$ 为半径的半圆区域, $d_2 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} \times D$ 。

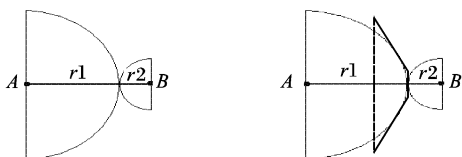


图2 不同威胁体的威胁区域划分 图3 划分威胁区域后的路径比较

在初始航迹中,路径均是相邻威胁的垂直平分线。无人直升机路径从路由点与威胁区域大的半圆相切的直线,平行于初始路径的直线和直线与威胁区域大的半圆相切的直线之间的连线构成了威胁区域划分后的无人直升机路径。图3中黑色虚线表示 Dijkstra 算法搜索的初始最短路径,黑色实线表示威胁区域划分后规划出的无人直升机路径。

### 1.2.3 路径平滑

根据已知的威胁分布情况下,取威胁中心点构造威胁分布的 Voronoi 图,在此 Voronoi 图的基础上,利用 Dijkstra 算法搜索出初始最短路径,构造出不同威胁点的威胁区域后进行算法进一步优化,其主要缺点是包含不可飞的尖角。本文利用不过点方法对规划的路径进行平滑处理,无人直升机能通过协调转弯功能通过路由点,且在无人直升机转弯半径大于最小转弯半径和在威胁区域之外的条件下进行路径平滑。

### 1.2.4 突发威胁体的处理

由于情报不尽准确等方面的客观原因,无人直升机在威胁区域内飞行时遇到突发的威胁体是不可避免的。在算法中能处理突发威胁体的情况是路径规划中很有必要的功能。本节讨论了两种突发威胁体的情况。如图4所示,第一种假设威胁点1、2均是已知威胁体,威胁点3是突发威胁体,威胁点1的威胁系数是威胁点2、3的1.5倍。 $L_1$ 与 $L_2$ 之和是威胁点1、2之间的欧式距离, $L_3$ 与 $L_4$ 之和是威胁点1、3之间的欧式距离。

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{1.5}{1} \quad (1)$$

$$\frac{L_3}{L_4} = \frac{1.5}{1} \quad (2)$$

其中 $L_1$ 表示连线点1、2上威胁点1至路由点之间的距离, $L_2$ 表示连线点1、2上威胁点2至路由点之间的距离, $L_3$ 表示连线点1、3上威胁点1至路由点之间的距离, $L_4$ 表示连线点1、3上威胁点3至路由点之间的距离。那么威胁点1相对于突发威胁点3的威胁区域为以威胁点1为圆心、 $L_3$ 为半径的圆域。同理,威胁点1相对于威胁点2的威胁区域为以威胁点1为圆心、 $L_1$ 为半径的圆域。图4中已知威胁点和突发威胁点构成一个三角区域,威胁点1相对于威胁点3的威胁区域,威胁点1相对于威胁点2的威胁区域用黑色虚线圆弧表示,在三角形区域内路径选择威胁点1的两圆弧与三角形两条边的交点之间的连线,图中用黑色实线表示,则出现突发威胁点后重规划的无人直升机的路径为图中黑色实线。第二种假设威胁点1、2均是已知威胁体,威胁点3是突发威胁体,威胁点1、3的威胁系数是威胁点2的1.5倍。第二种假设的处理情况与第一种假设处理情况类似。图5为突发威胁体的处理结果。

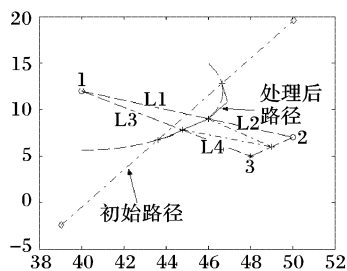


图4 突发威胁点处理情况一

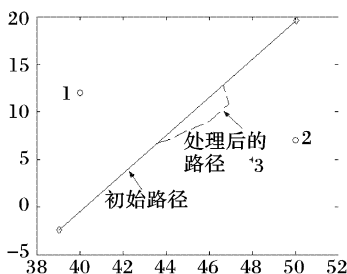


图5 处理结果

## 2 仿真结果

在 Matlab6.5 中对本文算法进行仿真,仿真程序包括战场威胁体建模、初始路径搜索、威胁区域划分、路径尖角平滑处理、突发威胁处理(局部路径规划)等五个模块。流程图见图6。

(下转第499页)

### 3 实验结果及分析

我们对本文的算法进行了大量的测试,将算法分别在工业控制计算机(P<sub>IV</sub>, 1.5G, 内存 256M)和 DSP (Ti 的 TMS320DM642)开发板上运行,在京珠高速公路广韶南路段同时检测和跟踪双向六车道的车辆,共进行了十次统计,每次 30 min,其中包含了阴影、雷雨、闪电等多种情况,统计结果如表 1(表中车辆跟踪正确率 = 跟踪正确辆数 / 检测车辆量)。

由统计结果可知,在多种环境下车流检测的总正确率高于 96%,对已检测到的车辆进行跟踪的总正确率优于 97%,说明了本文算法具有较好的可靠性和鲁棒性。当然在有积水和闪电的情况下,检测和跟踪的正确率有一定的下降,主要是该环境下,存在反光、闪光等现象,采集的图像干扰信号太强,如何识别、去除这些干扰是作者接下来的研究内容。

### 4 结语

本文在分析高速公路特点的基础上,提出了一种基于视频的高速公路车辆检测和跟踪算法。该算法根据高速公路车辆行驶的要求设计了一种基于像素的背景更新方法,很好地实现背景的动态更新,同时对基于虚拟线的检测方法进行了改进,提高了检测精度。算法还将一般算法中的工作区划分为车辆检测和车辆跟踪二个部分,在车辆检测区建立跟踪对象,在车辆跟踪区对存在的跟踪对象进行预测跟踪,这样减少

了跟踪的盲目性,有利用提高算法的计算速度和精度。根据该算法设计的视频检测器已用于实际交通参数的采集,使用和实验统计的结果表明该算法具有很好的实时性和可靠性,采集的交通参数能满足管理部门的需求。

#### 参考文献:

- [1] ANZAI Y, KATO T, HIGASHIKUBO M, *et al.* Development of an integrated video imaging vehicle detector [J]. SEI Technical Review, 2005, 59(6): 43-7.
- [2] 魏武,张起森,王明俊,等. 基于计算机视觉和图像处理的交通参数检测[J]. 信息与控制, 2001, 30(3): 257-261.
- [3] MAQEE DR. Tracking multiple vehicles using foreground, background and motion models [J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(2): 143-55.
- [4] BARRON JL. Performance of optical flow techniques [J]. International Journal Computer Vision, 1994, 32 (12): 42-771.
- [5] JAIN R. Difference and accumulative difference pictures in dynamic scene analysis [J]. Image and Vision Computing 1984, 2(2): 99-108.
- [6] LIPTON A, FUJIYOSHI H, PATIL R. Moving target classification and tracking from real-time video [A]. Proc. of the Workshop on Application of Computer Vision[C]. IEEE, October, 1998. 8-14.
- [7] 中华人民共和国道路交通安全法实施条例[S]. 北京: 人民交通出版社: 2004. 5.

(上接第 495 页)

在图 7 中,黑色五角星号点 S 表示无人直升机的起始点,黑色五角星号 T 表示无人直升机的目标点,黑色星号点 P 表示突发威胁体,黑色实心点表示具有不同威胁系数的威胁体。黑色虚线表示无人直升机初始路径,黑色实线表示经过划分威胁区域路径二次规划、平滑处理和突发威胁体处理后的无人直升机最优路径。

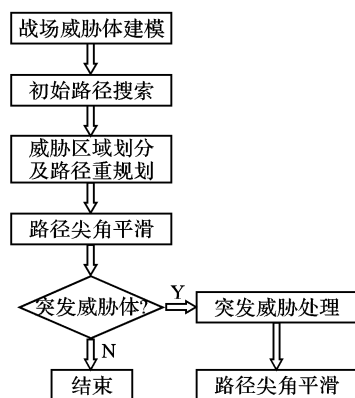


图6 仿真程序流程图

### 3 结语

本文研究了基于不同威胁体的无人直升机路径规划,提出了基于 Voronoi 图下基于威胁体加权的路径优化搜索算法,并考虑到实际战场出现突发威胁体的情况进行相应处理,最后利用 Matlab6.5 对算法进行了仿真。仿真结果表明本文提出的基于最短路径 Dijkstra 算法和增加新增威胁体处理更加

符合实际战场中的突变情况发生和更加符合无人直升机的机动特性,且能够在算法寻找的最短飞行路径基础上根据环境的变化使得威胁最小。仿真结果说明本文所提方法正确可行。

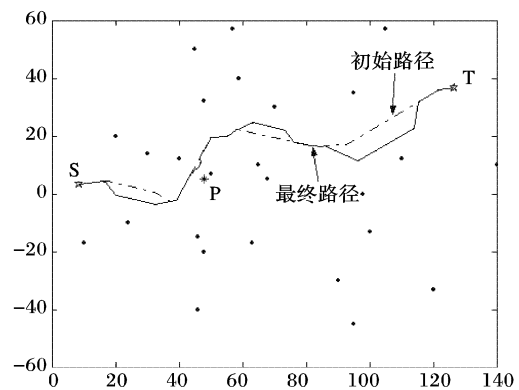


图7 最优无人直升机飞行路径

#### 参考文献:

- [1] NAH S, VADAL R. Fuel-Optimal, Low-Trust, Three Dimensional Earth-Mars Trajectories [Z]. AIAA, 2001, 24(6).
- [2] 唐强. 无人机自主航迹规划及相关问题研究 [D]. 西安: 西北工业大学博士学位论文, 2004.
- [3] MCLAIN TW, *et al.* Trajectory Planning for Coordinated Rendezvous of Unmanned Air Vehicles [Z]. AIAA-2000-4369.
- [4] 高晓光, 杨有龙. 基于不同威胁体的无人作战飞机初始路径规划 [J]. 航空学报, 2003, 24(5): 435-438.