

# 基于改进 A\* 算法的多无人机协同路径规划

赵丽华 万晓冬

(南京航空航天大学 自动化学院 南京 210016)

**摘要:** 针对复杂地形环境下多架无人机的三维路径协同规划问题,提出了一种改进的双向 A\* 搜索算法,该算法在双向 A\* 搜索的基础上,引入了无人机搜索角度作为双向 A\* 算法搜索的约束,大大缩小了节点的扩展区域,避免对冗余点的访问,缩小了路径规划所用的时间,并对数据的存取进行优化,提高了算法的执行效率。用 MATLAB 对改进后的双向 A\* 算法进行了仿真验证,结果显示,该算法能够快速有效地实现在满足各种约束条件下的多无人机的三维路径规划。

**关键词:** 无人机;路径规划;启发式算法;可行方向法

**中图分类号:** V249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Multi-UAV collaborative path planning based on improved A\* algorithm

Zhao Lihua Wan Xiaodong

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of three-dimensional path cooperative planning of multiple UAVs in complex terrain environment. An improved two-way A\* search algorithm is proposed. Based on two-way A\* search, this algorithm introduces the UAV search angle as two-way A\*. Algorithm search constraints greatly reduce the extended area of nodes, avoid access to redundant points, reduce the time used for path planning, and optimize data access, improving the efficiency of algorithm execution. The improved bidirectional A\* algorithm is simulated by MATLAB. The results show that the algorithm can quickly and effectively realize the 3D path planning of multi-UAV under various constraints.

**Keywords:** drone; path planning; heuristic algorithm; feasible direction method

## 0 引言

近年来,无人机(UAV)已被用作新的任务执行平台。真实的战场中环境都是相当复杂的,除了复杂的地形环境,还要躲避雷达等的检测,这种情况下想要能够完成给定的任务,单架无人机显然不能成功。因此,为了提高任务完成的效率,采用了多架无人机一同执行任务,可以在保证任务实现的前提相对下降低成本,面对障碍物和敌方火力攻击,无人机更容易完成任务。无人机合作作战的核心内容之一是对多架无人机的路径规划,无人机路径规划依靠地形信息和敌人信息来有效避免敌人在一定约束下的威胁和攻击,并找到从出发点至敌方的最佳飞行路径<sup>[1-3]</sup>。

与单架无人机比较,实施多个无人机的路径规划更加受限制,也更加困难。这既是当前路径规划的重点也是难点<sup>[4-5]</sup>。目前,知道的可以实现多无人机路径规划的一些算法有:文献[6]首先在对地形环境进行建模上采用概率图,

利用粒子群优化算法处理多无人机避障问题,算法可以很好的满足在路径规划的时候对实时性的要求。文献[7]使用蚁群算法解决多架无人机路径规划问题,将无人机的出发位置点设为蚁巢,将目标点考虑为食物,利用蚁群中信息素共享的原理寻找各个无人机的最优运动轨迹。文献[8]在算法中引入了协同变量和协同函数,采用 Voronoi 图方法,规划无人机正确的飞行路径,根据协同函数能够保证多无人机同时到达要求的目的地。文献[9]提出了满足时间约束的多无人机协同航迹规划思想,采用时间推进机制解决无人机到达目标的时间间隔问题,同时还能够保证计算的实时性。无人机相互之间还要避免碰撞,把这个因素作为约束加入,建立多目标优化问题。

## 1 协同路径规划问题

### 1.1 问题描述

如图 1 所示,多无人机协同路径规划的算法,在单无人

收稿日期:2019-10-10

• 72 •

机路径规划算法的基础上,考虑了多个无人机协同路径规划的多个约束和目标函数,例如约束条件需要考虑了个体之间的避撞、信息共享等方面的限制,目标函数需要考虑无人机集群消耗的总代价最小或者尽可能实现同时到达目标等要求。

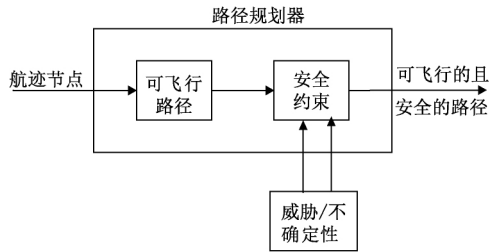


图 1 路径规划

## 1.2 约束条件

路径规划必须参考无人机的实际物理条件。无论用哪一种算法产生的路径都必须符合无人机实际可以飞行的要求。不然,无人机就没办法按照给定的路径飞行。最终会生成飞行路径的影响因素如下<sup>[10]</sup>。

### 1) 最大转弯角约束

当无人机转弯时,根据其物理性能限制,存在最大转弯角度,这限制了计划轨道中转弯点的角度不得大于最大转弯角度。

### 2) 最短路径段长度约束

无人机必须在转弯前保持直线飞行。最短路径长度定义了无人机在上升下降或转弯之前必须以直线飞行的最短距离。假设给无人机规划出来的路径第  $i$  段的长度为  $l_i$ , 最小路径段长度为  $l_{min}$ , 则需满足:

$$l_i > l_{min} \quad (1)$$

### 3) 最低飞行高度约束

当无人机在飞行过程中,难免会遇到有威胁的地方,希望无人机要飞得尽可能低一些,但是假如无人机飞行的高度距离地面很近,那么无人机很容易碰到地面建筑物或山峰,从而坠毁。因此,要把无人机的飞行高度限制在一定范围内。假定无人机的最低飞行高度为  $h_{min}$ , 则无人机的飞行高度  $h_i$  应满足:

$$h_i > h_{min} \quad (2)$$

### 4) 时域约束

时域协同约束是目前多无人机协同路径规划需要解决的主要问题之一,所谓时域协同就是要求每架无人机能够同时出发同时到达或者按照一定的时间间隔依次到达目标点<sup>[11]</sup>。

## 2 A\* 算法

### 2.1 传统 A\* 算法

A\* 算法使用启发式方法将 Dijkstra 算法和贪婪算法结合在一起,该方法结合了两者的优点,从而确保能够找到

最佳路径。A\* 算法是目前路径搜索中一种经典的启发式搜索算法,之所以这么说是因为它在搜索过程中往具体的算法中加入启发信息。其评价函数为:

$$f(i) = g(i) + h(i) \quad (3)$$

式中:  $i$  表示路径搜索过程中的任意节点,  $f(i)$  是生成的路径的评价函数,表示通过节点  $i$  从起点然后到达目标点的路径代价,  $g(i)$  表示无人机在飞行环境中从起点到达节点  $i$  的实际路径代价(距离)。  $h(i)$  是有可能生成路径的启发函数,表示节点  $i$  到目标点的最佳路径估计代价。

A\* 算法在特定条件下一定能找到问题的解决方案,而且是最佳的。想要获得最优解,需要满足的条件是:如果通过 A\* 算法计算出来的启发函数  $h(i)$  小于或者远小于实际路径代价  $g(i)$ , 那么该算法就可以得到最优解;如果  $h(i)$  大于或等于实际路径代价  $g(i)$ , 则无法保证最优解。

传统 A\* 算法完成的流程图如图 2 所示。

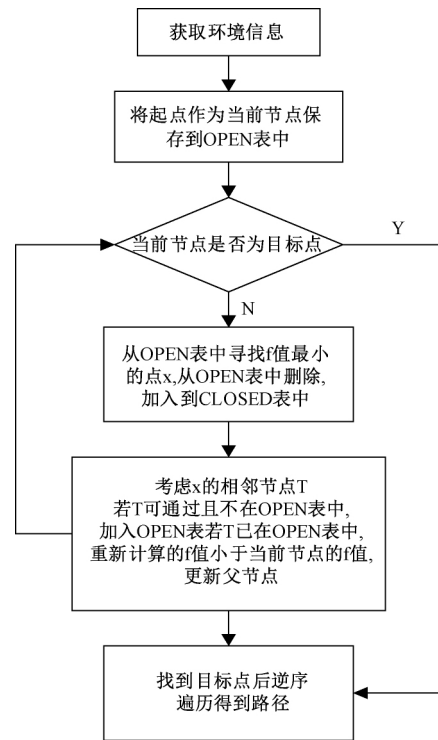


图 2 A\* 算法流程

### 2.2 改进后的 A\* 算法

所谓双向 A\* 搜索算法是指在前向和反向两个方向上同时从起点和终点执行 A\* 搜索的搜索,直到重复两个 OPEN LIST 中的点为止。如图 3 所示,前向搜索是指从起点 A 到目标点 B 的搜索,反向搜索是指从目标点 B 到起点 A 的搜索。在搜索过程中,将在前向搜索生成节点表 CLOSE LIST 中的节点  $x$  作为反向搜索的目标节点。

在传统 A\* 算法<sup>[12]</sup>中,搜索节点的扩展方向没有针对性,搜索的节点为全部方向的,但是综合无人机实际飞行的一些特定的物理条件约束,同时考虑到无人机当下的正在

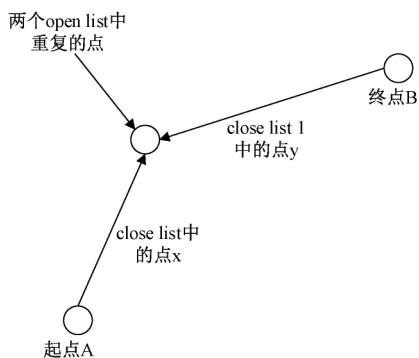


图 3 双向搜索算法

飞行的方向,对无人机的下一次搜索到达的节点区域进行一个限制,即规定无人机下一个搜索的节点满足一定的俯仰角  $\phi_i$  和偏航角  $\psi_i$  的约束,即无人机对下一步飞行搜索的节点范围是一个类锥体区域,该搜索区域为无人机当前节点进行下一步飞行所有可能到达节点的集合。定向搜索过程可以有效避免盲目搜索大量无用节点,以此大大缩小无人机的搜寻领域,可以有效地提高搜索效率,图 4 为定向搜索算法示意图。

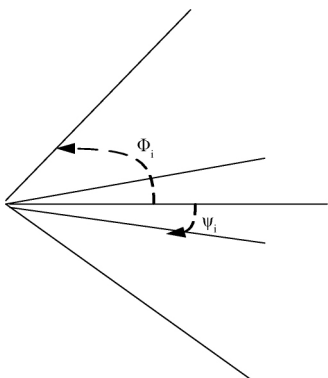


图 4 定向搜索算法

除了对双向 A\* 搜索算法的改进,对 OPEN LIST 中的节点存储方式改为用二叉树的存储方式。最小二叉堆的堆序特性可以保证 OPEN LIST 中节点排列的稳定性,算法搜索 OPEN LIST 中节点的代价函数  $f(n)$  值最小节点的时间复杂度为  $O(1)^{[13]}$ 。

本文算法具体的步骤如下:

- 1) 获取环境信息,将起始点和目标点信息分别保存到 OPEN 表和 OPEN1 表;
- 2) 判断 OPEN 表和 OPEN1 表是否有一个为空,若否则转至步骤 3),若是则跳转到搜索失败处理程序;
- 3) 正向定向扩展子节点,判断是否找到路径,若否则计算子节点的正向评价函数  $f$ ,并将子节点根据正向评价函数的大小存入 OPEN 表,更新正向当前节点,从 OPEN 表中取表中第一个数,存入 CLOSED 表中。若是则转至

步骤 5);

4) 反向定向扩展子节点,判断是否找到路径,若否则计算子节点的反向评价函数  $f$ ,并将子节点根据反向评价函数的大小存入 OPEN1 表,更新反向当前节点,从 OPEN1 表中取表中第一个数,存入 CLOSED1 表中。若是则转至步骤 5);

5) 在 CLOSED 表和 CLOSED1 表中以寻找父节点方式逆序找出最优路径,得到最小代价路径。

### 3 仿真结果及分析

为了验证本文算法的有效性,算法的代码编写和仿真都是在 Windows8 64 位系统 Matlab2014a 软件中实现。环境设置为:任务区域  $70 \text{ km} \times 70 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ ,单位栅格表示长度为  $1 \text{ km}$ , $L$  表示单位栅格倍数,以 3 架无人机为例进行仿真,目标点的三维坐标是  $(10, 56, 20)$ ,将三架无人机的信息初始化如表 1 所示。

表 1 无人机初始化参数

UAV	飞行速度/ (m/s)	飞行起点	俯仰角范围	偏航角范围
1	100	(60, 18, 5)	$[-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}]$	$[-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}]$
2	100	(55, 5, 5)	$[-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}]$	$[-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}]$
3	100	(60, 15, 5)	$[-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}]$	$[-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}]$

图 5 为原始 A\* 算法的路径规划结果,三架无人机的路径长度分别是 81.322, 82.186, 86.392 km 较为相近,满足了多无人机协同同时出发同时到达的条件,虽然躲开了山峰,但是整体路径明显不平整,转向点过多,冗余点过多,采用改进后的算法能够防止冗余点。

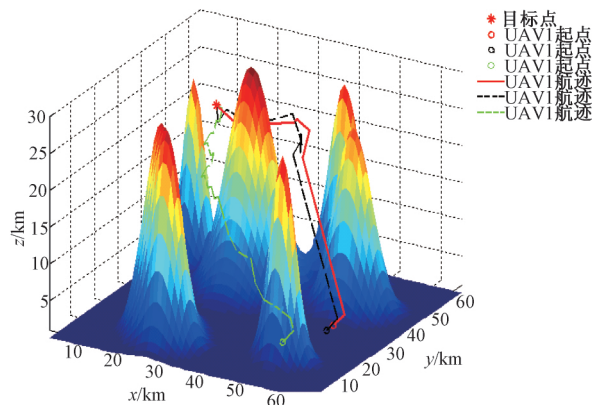


图 5 三维 A\* 算法的路径规划结果

由图 6~7 可以看出:规划出的路径躲开了山峰,采用改进后的算法进行路径规划可以满足飞机以指定角度从起

始点出发并以指定角度到达目标点的要求,并且能生成较为合理的路径,而且规划时间很短,满足 3 架无人机同时出发同时到达的协同路径规划要求。

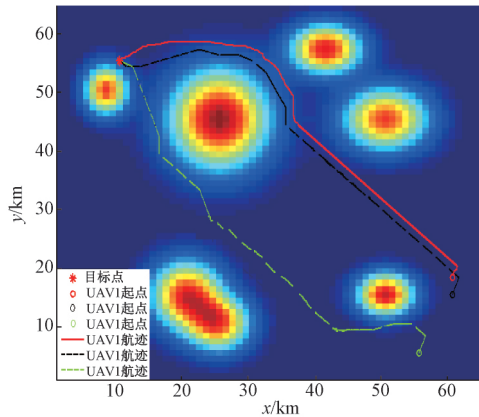


图 6 改进 A\* 算法协同规划的俯视图

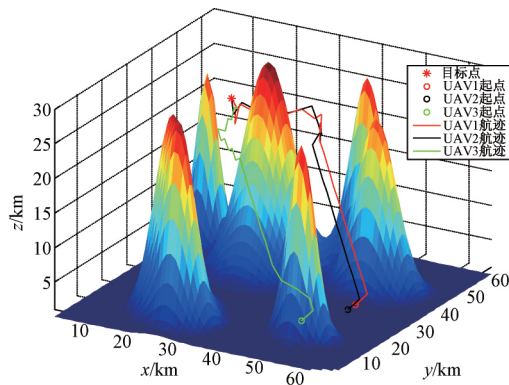


图 7 改进 A\* 算法路径规划结果

表 2 为仿真详细数据,可以看出改进后的算法由于加入对偏航角和俯仰角的约束,避免搜索大量没有用的节点,使得算法在扩展节点以及规划用时方面都比原算法更优,以及规划的路径长度也更短。

表 2 A\* 算法与改进后算法比较

	A* 算法	改进后算法
平均规划总路径/km	83.267	81.462
平均扩展节点	640	450
规划用时/s	5.41	3.12

由表 2 中的数据可以看出,在路径规划的距离上,改进前的算法和改进后的算法没有显著的差别,表示三架无人机同时出发可以同时到达,说明改进后的双向 A\* 算法可以得到最优解。但是改进后的算法,扩展节点数和规划时间几乎缩短了一半,这表明该算法确实可以避免对冗余点的搜索,从而提高了算法的效率。

## 4 结 论

本文以复杂环境下多无人机协同飞行的路径规划问题为背景<sup>[14-15]</sup>,考虑了无人机飞行的物理约束以及多种路径约束,在传统的 A\* 算法基础上,提出了一种改进的双向 A\* 算法,该算法把无人机的最大仰角和偏航角作为搜寻约束,同时以最小二叉堆优化存储方式,仿真结果表明,改进后的算法能够较好的实现多无人机的路径规划,而且在效率以及存储空间上都得到优化。本文研究的多无人机协同路径规划问题为静态或障碍物已知情况下各无人机同时到达的问题,对于其他协同路径规划问题,如地图中未知的动态障碍物情况,本文的算法没有讨论到,这还有待今后进一步探讨。

## 参考文献

- [1] 程晓明,曹东,李春涛.多无人机协同航迹规划技术研究[J].航空计算技术,2014,44(4):71-75.
- [2] 张思宇.多无人机协同航迹规划及其控制方法研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [3] 章国林,李平,韩波,等.多雷达威胁环境下的无人机路径规划[J].计算机工程,2011,37(4):206-209.
- [4] CAUSA F, FASANO G, GRASSI M. Multi-UAV path planning for autonomous missions in mixed GNSS coverage scenarios. sensors [J]. Sensors, 2018, 18(12):4188.
- [5] 刘浩.多无人机协同路径规划技术研究及模拟实现[D].成都:电子科技大学,2016.
- [6] 毕红哲,张洲宇,申功璋,等.无人机感知与规避技术研究进展[J].电子测量与仪器学报,2016,30(5):661-668.
- [7] WANG H, PENG L, ZHANG Z H, et al. Path optimization of UAV patrol and relay process [C]. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Sensors, 2018, 1-5.
- [8] 李世晓,朱凡,刘希,等.基于协同进化的多无人机航迹规划研究[J].计算机仿真,2013,30(9):96-100.
- [9] 丁泽军,张健,李朝旭,等.突发威胁环境下无人机实时航迹规划研究[J].计算机仿真,2015,32(8):113-117,249.
- [10] YANG X, ZHOU W, ZHANG Y. On collaborative path planning for multiple UAVs based on Pythagorean Hodograph curve [C]. 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Nanjing, 2016,971-975.
- [11] 韩泉泉.混合编队无人机的协同控制[D].西安:西安电子科技大学,2011.

(下转第 166 页)

- [8] 王小春. MEMS 微惯性航姿系统的优化设计与集成技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [9] 魏泽松,张嘉易. 温度对 IMU 微机械陀螺仪零偏影响及标定补偿[J]. 国外电子测量技术,2011,30(1):9-13.
- [10] 孔超,孙永荣,李荣冰,等. 多个 MEMS 惯性姿态模块同时标定方法研究[J]. 导航与控制,2015,14(6):75-80.
- [11] 李传明,崔更申,尹鹏,等. 基于 STM32F4 的电机控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2015,23(10):3370-3372,3376.
- [12] 聂梦馨,吕品,赖际舟,等. 一种光纤 IMU 的双轴非定

向标定方法[J]. 电子测量技术,2014,37(8):123-128.

- [13] 焦佳伟. 自动批量化加速度传感器标定系统的设计与实现[D]. 太原:中北大学,2016.
- [14] 侯宏录,李光耀,李媛. 光纤陀螺零偏漂移的温度特性与补偿[J]. 自动化仪表,2019,40(3):59-63,68.
- [15] 张志文,张海涛,李剑. 多惯组同步测试系统设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(11):53-56.

#### 作者简介

王尧,硕士研究生,主要研究方向嵌入式开发、微惯性导航系统。

E-mail:wyao@nuaa.edu.cn

(上接第 49 页)

- [17] 夏爽,李丽宏. 基于 PSO-RBF 神经网络在温室温度预测中的应用[J]. 计算机工程与设计,2017,38(3):744-748.
- [18] 毕玉革. 北方干寒地区日光温室小气候环境预测模型与数字化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [19] 墨蒙,赵龙章,龚媛雯,等. 基于遗传算法优化的 BP 神经网络研究应用[J]. 现代电子技术,2018,41(9):

41-44.

#### 作者简介

李渊朴,硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail:313592912@qq.com

王秀玲(通讯作者),硕士,教授,主要研究方向为信息与通信工程。

E-mail:lyp417418@163.com

(上接第 55 页)

- [15] 狄辉辉,李京华,刘景桑,等. 基于 Qt/E 的嵌入式实时曲线显示界面设计与实现[J]. 电子测量技术,2011,34(12):76-79.

#### 作者简介

陶德臣,硕士在读,主要研究方向为无人直升机飞行控

制技术、嵌入式实时系统软件开发技术等。

E-mail:m15151862183@163.com

祖家奎,副研究员/博士,主要研究领域为无人机飞行控制、嵌入式系统。

高尚文,硕士在读,主要研究方向为飞行控制与仿真技术。

(上接第 75 页)

- [12] 干阳琳. 四旋翼无人机编队自动飞行的避障算法研究[D]. 成都:成都理工大学,2017.
- [13] 杜映峰,陈万米,范彬彬. 群智能算法在路径规划中的研究及应用[J]. 电子测量技术,2016,39(11):65-70.
- [14] 甄士博. 基于 ADS-B 技术的多无人机航迹规划算法研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2018.
- [15] 刘海龙. 多无人机协同覆盖路径规划的算法设计[D].

南京:东南大学,2017.

#### 作者简介

赵丽华,硕士研究生,主要研究方向为多无人机协同路径规划。

E-mail:15851816606@163.com

万晓冬,副研究员、硕士生导师,主要研究方向为军事作战仿真技术。

E-mail:wanxd@nuaa.edu.cn