



电光与控制

Electronics Optics & Control

ISSN 1671-637X, CN 41-1227/TN

## 《电光与控制》网络首发论文

题目: 基于改进 A\*算法的三维无人机路径规划  
作者: 马云红, 张恒, 齐乐融, 贺建良  
网络首发日期: 2019-06-25  
引用格式: 马云红, 张恒, 齐乐融, 贺建良. 基于改进 A\*算法的三维无人机路径规划[J/OL]. 电光与控制.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.tn.20190624.1645.016.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于改进 A\*算法的三维无人机路径规划

马云红<sup>1</sup>, 张恒<sup>1</sup>, 齐乐融<sup>1</sup>, 贺建良<sup>2</sup>  
(1.西北工业大学电子信息学院, 西安 710129;  
2.中航工业洛阳电光设备研究所, 洛阳 471009)

**摘要:** 提出了一种进行三维空间路径规划的改进 A\*算法。针对低空突防中无人机的飞行环境的复杂性, 综合考虑了飞行高度、航迹长度等权重因子, 在目标空间中搜索一条两个航路点之间的最优航线。选用变步长搜索提高 A\*算法搜索效率, 设计了变权值的路径评估函数提升优化效果。同时为了满足无人机俯仰角、偏航角、转弯半径等性能约束, 提出了一系列航线优化算法, 得到最终的可飞航线。仿真结果表明, 提出的方法能够有效地给出更为满意的无人机航迹规划路线。

**关键词:** A\*算法; 变步长搜索; 变权值评估; 三维路径规划

## A 3D UAV Path Planning Based on Improved A\* Algorithm

MA Yun-hong<sup>1</sup>, ZHANG Heng<sup>1</sup>, QI Le-rong<sup>1</sup>, HE Jian-liang<sup>2</sup>

( 1. Electronic Information College, Northwestern Polytechnical University, Shaanxi Xi'an 710129;  
2. China Aviation Industry Luoyang Electrooptical Equipment Research Institute, Luoyang 471009 )

**Abstract:** This paper proposes an improved A\* algorithm for 3D spatial path planning. Since the UAV has to meet the complexity of flight environment in low-altitude penetration, the algorithm took the flight altitude and flight length into consideration to search the optimal flight path between two waypoints. The variable step size search is used to improve the search efficiency of A\* algorithm and the path evaluation function with variable weight is designed to improve the optimization effect. Meanwhile, to satisfy the UAV performance constraints, such as pitch angle, yaw angle and radius of turn, the author suggested a series of optimization algorithms to get the final flyable path. The simulation results show that the proposed method can provide more satisfactory path-planning for UAVs.

**Keywords:** A\* algorithm; variable step length searching; variable weights evaluation; 3D path planning

### 0 引言

无人机(UAV)以其高机动性, 风险小代价低等优点, 常用于执行危险地区的侦察或搜救等任务。为了保证无人机执行作战任务的高效性, 通常在执行任务前需要给出执行任务的最佳飞行路径。为此无人机路径规划成为研究热点。各种航路规划方法中, 采用启发式搜索的 A\*方法及其改进方法获

得了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。

在传统的 A\*算法的基础上, 为提升搜索效率, 文献[5]提出了稀疏 A\*算法(SAS), 采用剔除一些节点减小搜索空间。为提升算法的适用性, 文献[6-7]将其拓展为三维平面, 同时结合约束条件进行剪除搜索空间, 提高运算效率, 减少搜索时间。本文结合无人机空中路径规划的特点, 进一步改进无人机三维空间路径规划算法, 提升效率, 优化路径规划结果, 减少航程代价。

### 1 规划区域障碍描述与危险评估

无人机的飞行区域, 主要包括地形障碍, 如山

作者简介: 马云红(1972-), 女, 山西临猗人, 博士, 副教授, 研究方向为优化算法、飞行器任务规划和智能控制

峰和建筑物。其他的不可飞行区域也可以按照地形障碍类似简化, 还有恶劣气象导致的涡流等。

### 1.1 地形

在无人机的飞行路径规划中, 地形主要是对山体的描述, 近似表示为 (1):

$$z(x, y) = h_i * e^{-[(x-a_i)/k_i]^2 - [(y-b_i)/k_i]^2} \quad (1)$$

其中  $x, y$  为山体表面某一点在水平面投影的坐标值,  $z$  为该点的高度,  $a_i$  和  $b_i$  表示山体中心的投影坐标值。  $h_i$  为控制高度的参数,  $k_i$  为控制地形坡度的参数, 当这些参数取不同的值时, 会得到不同的山峰。

山体对无人机的危险度表示为  $T_{mountain}$ :

$$T_{mountain} = \begin{cases} 0 & d_m > 10 + R_m \\ [10 - (d_m - R_m)]/4 & d_m \in [4 + R_m, 10 + R_m] \\ \inf & d_m < 4 + R_m \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d_m$  表示无人机到山体中心的距离,  $R_m$  表示山体的半径。(2) 式表示了当无人机与山体边缘间距离超过 10m, 视为安全, 危险度为 0, 当无人机与山体边缘间距离介于 4m 和 10m 之间, 距离越近, 危险度越大。当无人机与山体边缘间距离小于 4m 时, 则危险度为无穷大。

### 1.2 恶劣气象涡流

将恶劣气象区域表示为一个球体。球体半径为涡流的范围, 记为  $R_{max}$ 。涡流的危险度表示为式 (3)。

$$T_{vortex} = \begin{cases} 0 & d_v \geq R_{max} \\ \frac{1}{d_v^4} & d_v < R_{max} \end{cases} \quad (3)$$

当无人机载涡流外, 危险度为 0, 涡流内, 则与到涡流中心的距离有关, 距离越近越危险。式中,  $R_{max}$  是涡流的最大半径,  $d_v$  是无人机到涡流中心的距离。

## 2 改进 A\* 算法

### 2.1 A\* 算法基本思想

A\* 算法是一种启发式搜索算法。通过在搜索空间不断评估路径的估价函数值来启发式搜索节点来构造最优路径。通常 A\* 算法的常用估价函数表示

为<sup>[8-9]</sup> (4):

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (4)$$

当前节点为  $n$ , 其中  $f(n)$  是从初始点经由节点  $n$  到目标点的估价函数,  $g(n)$  是在状态空间中从初始节点到节点  $n$  的实际代价,  $h(n)$  是从节点  $n$  到目标节点的估计代价。

A\* 搜索算法的搜索效率由搜索方向和搜索步长决定。为了提升搜索效率, 需要从搜索方向、搜索节点确定改进。路径的优劣则主要依赖于估价函数的设计。

### 2.2 基于搜索方向和步长的搜索节点确定

搜索方向分别设定为前向, 俯仰方向, 偏航方向三种方向进行剩余区域扩展搜索, 在俯仰方向和偏航方向上, 以无人机的机动性能约束为限制条件, 最大范围地进行俯仰和偏航方向上的搜索。

在前向搜索上, 为了提升搜索效率, 提出变步长搜索<sup>[10]</sup>。即以无人机机载雷达的探测范围距离对最大搜索步长进行限制, 同时为了能够应对突发气象威胁, 例如突发空间涡流等, 将搜索步长进行一定区间的调整。选择在最小转弯半径和最大步长之间调整搜索。变步长 A\* 算法搜索空间示意图如图 1 所示:

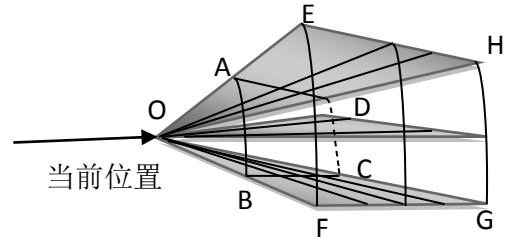


图 1 改进 A\* 算法搜索示意图

Fig. 1 The searching schematic of improved A\* algorithm

图中, O 点是当前节点, OA 是指扩展搜索的最小步长, 与最小转弯半径相关, OE 是最大步长。  $\angle FON = \theta$  是最大偏航角,  $\angle HOM = \varphi$  是最大爬升角,  $\angle EOH = 2\theta$  是偏航范围,  $\angle FOG = 2\varphi$  是俯仰范围。

则以当前节点 O 的搜索区域为当前位置的可行搜索空间在一个由四棱锥面和两个球面包围的区

域内。按照栅格化思想,将该区域划分为一些节点,分别从俯仰方向,偏航方向,前向,进行  $p, q, t$  等距离划分,形成  $(p+1)*(q+1)*(t+1)$  个搜索节点。对每个节点进行启发式搜索评估,选取最优的那个节点作为下一个节点,直至到达目标点。

### 2.3 路径评估代价函数的设计

#### (1) 变权值评估函数

设当前的节点为  $n$ , A\*算法中当前节点的代价通常表示为式:  $f(n) = g(n) + h(n)$ 。

考虑到在路径搜索的过程中,  $g(n)$  和  $h(n)$  对路径评估的影响不同,选择加权评估方法,如式(5):

$$f(n) = w_g g(n) + w_h h(n) \quad (5)$$

式中,  $w_g$  是从起点到达当前节点的实际代价  $g(n)$  的权值,  $w_h$  是当前节点到达目标的估计代价的权值。满足  $w_g + w_h = 1$ 。合理的选择  $w_h$  和  $w_g$  有利于路径的合理。事实上,通过仿真发现,在路径的不同阶段  $g(n)$  和  $h(n)$  对路径评估的影响是不同的。调整  $w_h$  和  $w_g$  的值会引起路径的变化。通过实验发现,当  $w_g$  偏大时,路径规划的后半段较为理想,当  $w_h$  偏大时则前半段较为理想。本文提出实时调整权值  $w_g$  和  $w_h$  的方法,优化评估函数。调整方法为式(6)。

$$w_g = w_{g_{\min}} + (w_{g_{\max}} - w_{g_{\min}}) * (1 - \frac{h(n)}{D}) \quad (6)$$

式中  $w_{g_{\min}}$  为  $w_g$  的初始值;  $w_{g_{\max}}$  为  $w_g$  的最大值,  $h(n)$  为当前位置到目标点的欧氏距离,  $D$  为起点到目标点的欧氏距离。通过调整,使得当无人机靠近目标时,  $g(n)$  的权值  $w_g$  变大,从而保证路径的合理性。

#### (2) 加入高度的评估

无人机路径规划时,往往对飞行路径的高度有要求。当长距离飞行时,需要平稳飞行,尽量选择高度相同的平面飞行,当无人机为了达到隐身效果时,需要低空飞行,为了应对不同任务的路径规划,在路径评估函数中引入高度评估,如式(7)所示:

$$g(n) = w_L L(n) + w_C C(n) + w_T T(n) \quad (7)$$

式中  $L(n)$  为从初始节点到当前节点的航程代价,  $C(n)$  为高度代价,  $T(n)$  为威胁代价,选择为

$\max(T_{\text{vortex}}(n), T_{\text{mountain}}(n))$ ,  $w_L$ 、 $w_C$ 、 $w_T$  对应为其权重系数。

启发函数  $h(n)$  表示为无人机当前节点到目标点的欧氏距离,如式(8):

$$h(n) = \sqrt{(x_g - x_n)^2 + (y_g - y_n)^2 + (z_g - z_n)^2} \quad (8)$$

其中当前位置为  $(x_n, y_n, z_n)$ , 目标点坐标为  $(x_g, y_g, z_g)$ 。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 规划区域定义

实验基于 MATLAB R2016A 软件,按比例缩小 10 倍进行仿真。设置无人机的出发点坐标为  $(0, 0, 0)$ , 目标点坐标为  $(1000, 1000, 200)$ 。定义无人机初始航向角为  $45^\circ$ , 爬升角为  $45^\circ$ , 规划区域已有的山峰和气象涡流的参数如表 1, 表 2 所示, 表 1 山峰地形参数, 表 2 为可能的气象涡流参数:

表 1 山体参数

Table 1 Parameters for mountain

序号	中心点坐标	高度/km	坡度
1	(820, 750)	3.3	110
2	(340, 300)	3.3	110
3	(600, 250)	3.3	70
4	(507, 650)	3.5	111
5	(820, 550)	3.5	60

表 2 涡流参数

Table 2 Parameters for eddy

序号	中心点坐标	最大涡流半径/km
1	(550, 500)	2
2	(250, 200)	1

### 3.2 改进 A\*搜索算法路径规划的结果

论文设置  $p = q = t = 3$ , 即在偏航方向, 俯仰方向和前向分别进行 4 等分确定搜索节点, 实现三维路径规划。并在此基础上进行了不同因素对路径规划的影响比较分析。

#### 1. 步长对航线的影响

设置无人机最小步长  $l_{\min} = 80$  m, 机载雷达最大搜索半径为  $r = 100$  m。令  $w_g = 0.3$ ,  $w_h = 0.7$ , 最大转弯角为  $35^\circ$ , 最大爬升角为  $30^\circ$ , 最大步长



$l_{\max} = l_{\min} + \lambda(r - l_{\min})$ ，分别取  $\lambda = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ ，仿真结果如表 3。

表 3 不同步长下的规划路径

Table 3 Path planning of different steps			
$\lambda$	规划步数	规划时间 /s	规划总航程 /km
0(定步长)	195	3.69	15.610
0.2	183	3.52	15.376
0.4	175	3.37	15.396
0.6	172	3.36	15.822
0.8	159	3.10	15.203
1.0	162	3.10	18.519

从表 4 的数据可以看出，通过改变最大步长，可以有效减小规划步数与规划时间。当  $\lambda = 0.8$  时，规划总航程最短。

2. 评价函数中  $w_g$  和  $w_h$  对路径的影响

选取不同的  $w_g$  和  $w_h$  进行路径规划，仿真结果如下：

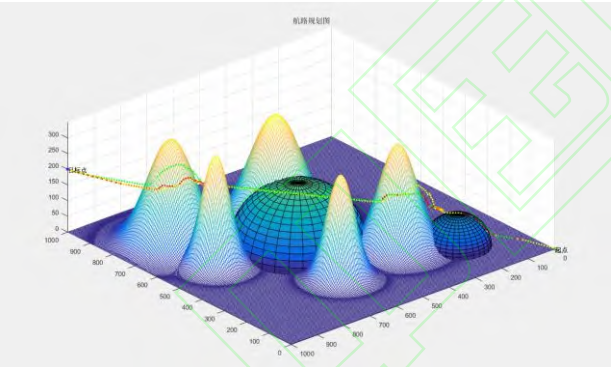


图 2 不同权值下航迹对比

Fig. 2 Flight path comparison of different weights

图中黄色曲线为  $w_g=0.7, w_h=0.3$  时无人机的路径，绿色曲线为  $w_g=0.3, w_h=0.7$  时无人机的路径。可以看出当  $w_g$  偏大时规划路径的前半段在绕过山体威胁时会出现飞行高度过高并且不够平滑的现象，后半段较为理想， $w_h$  偏大时相反。红色曲线为  $w_{g_{\min}}=0.3, w_{g_{\max}}=0.7$ ，参照公式（6）对权值进行实时调整后的规划路径。各权值规划出航迹的参数如下：

表 4 不同权值下路径参数表

Table 4 Path parameters of different weights			
权值	规划总航	规划时	规划步

	程/km	间/s	数
$w_g=0.7, w_h=0.3$	15.666	4.08	196
$w_g=0.3, w_h=0.7$	15.610	4.02	195
$(w_{g_{\min}}=0.3, w_{g_{\max}}=0.7)$	15.414	3.86	194
实时调整权值			

通过对比表中数据，可以发现对权值  $w_g$  和  $w_h$  进行实时调整后，缩短了规划路径总长度和规划时间。

3.3 改进 A\*搜索的规划路径

采用本文改进 A\*搜索算法规划的三维路径如图 4 所示。

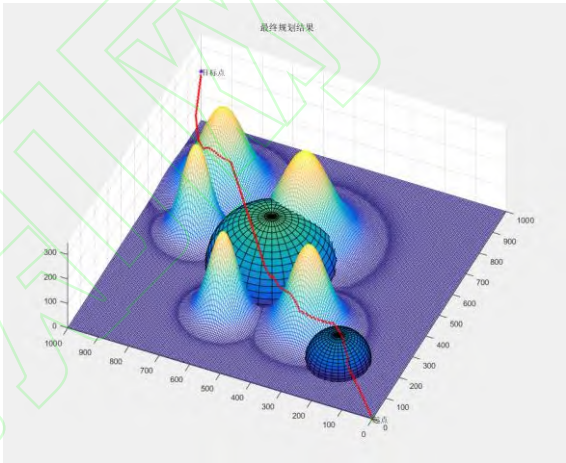


图 3 改进 A\*算法规划路径

Fig. 3 The planning path of improves A\* algorithm

改进 A\*算法与其他方法的比较结果如表 5。分别进行了三种情况的比较：一是固定步长和固定评价函数权值，二是确定步长调整范围和评价函数权值固定，三是变步长结合评价函数权值调整。比较了三种情况下的路径长度，规划时间以及规划步数，比较结果图表 5 所示。

表 5 改进前后数据对比

Table 5 Data comparison			
权值 固定步长为8,	规划总航 程/km	规划时 间/s	规划步 数
$w_g=0.3, w_h=0.7$	15.610	4.02	195
最小步长为8, $\lambda=0.8$ ; 实时调整权值	15.203	3.10	159
$(w_{g_{\min}}=0.3, w_{g_{\max}}=0.7)$	15.091	3.08	158

4 结论

本文提出了一种改进 A\*算法。算法采用球形节

点拓展法，分别从前向，俯仰方向，偏航方向进行搜索节点的确定，将搜索方向拓展到三维空间。同时算法采用基于最小步长与最大步长之间的变步长搜索方法，同时采用实时调整实际代价和估计代价的权值的路径评价函数，提升了优化效率和优化结果。仿真结果验证了本文的改进 A\*算法可以有效缩短规划时间，减少规划步数，缩短路径长度，是一个有效的三维路径规划算法。

### 参考文献

- [1]. 马立.基于改进 A\*算法的无人机动态航迹规划[J].现代导航,2018,9(1):60-64.
- [2]. 冯国强,赵晓林,高关根,寇磊.基于 A\*蚁群算法的无人机航路规划[J].飞行力学,2018,36(5):49-52+57.
- [3]. 田阔,刘旭.基于多策略 SSO 和改进 A\*算法的无人机动态航迹规划[J].电光与控制,2017,24(11):31-37.
- [4]. 王森弛. 基于 A\*算法的移动机器人路径规划[D].沈阳工业大学,2017.
- [5]. Robert J S, Peggy G I S. Clickstein, and Noah Ternullo, Robust algorithm for algorithm for real-time route planning[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 2000, 36(3): 869— 878
- [6]. 张帅,李学仁,张鹏,李博.基于改进 A\*算法的无人机航迹规划[J].飞行力学,2016,34(3):39-43.
- [7]. 张得舒,黄长强,丁达理,丁锋.基于 A\*算法的无人机攻击轨迹解算[J].电光与控制,2011,18(3):18-20+65.
- [8]. LiXia1,XieJun,Cai Manyi, XieMing, Wang Zhike , Path Planning for UAV Based on Improved Heuristic A\* Algorithm[A]. IEEE Beijing Section、Chinese Institute of Electronics(CIE). Proceedings of 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments ( ICEMI'2009 ) Vol.3[C]. 2009:6.
- [9]. 刘群芳. 基于稀疏 A\*算法与进化算法的无人机动态航迹规划研究[D].南昌航空大学,2016.
- [10]. 吴剑,喻玉华,周继强,黄一敏.无人机航路规划中的变步长 A\*算法[J].电光与控制,2011,18(5):1-6+10.