

# Collision-free Path Planning of Unmanned Aerial Robots Based on A\* Algorithm

Xiangrong Xu\*, Hao Xu, Xiaosheng Zhu, Yan Li, Liming Jia, Shuang Li (\*xuxr@ahut.edu.cn)  
School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui, China 243002

**Abstract**—Trajectory planning of robots is not only an important research field of robotics, but also an challenging combination of artificial intelligence and robotics. Trajectory planning is a key technology of Unmanned Aerial Vehicle (UAV). It is also a prerequisite for autonomous navigation of UAV. Under the static environment distributing of obstacles, seeking a shortest path from the starting point to the target point for global path planning has important scientific significance. This paper presents a method for collision-free trajectory planning and design of UAV. Using grids to process the trajectory environment of UAV and then find the shortest path from the initial point to the target point based on rasterization environment using A\* algorithm. The simulation of trajectory planning is implemented under the Microsoft Visual C++ 6.0 development environment. From the simulation of trajectory planning, we can clearly prove that UAV can seek a shortest path from the initial point to the target point based on A\* algorithm.

**Keywords**—UAV trajectory planning; A\* algorithm; the simulation based on Visual C++

## 基于 A\*算法的空中机器人(UAV)无碰撞轨迹规划

徐向荣, 徐浩, 朱小生, 李妍, 贾黎明, 李双  
安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山, 安徽, 中国 243032

**摘要:** 机器人轨迹规划是机器人学的一个重要研究领域, 是人工智能与机器人学的一个交叉结合点。轨迹规划是空中机器人(UAV)关键技术之一, 也是实现空中机器人(UAV)自主导航的前提。在分布有障碍物的静态环境下对空中机器人(UAV)从起始点到目标点进行全局轨迹规划, 寻求一条最短路径具有十分重要的意义。本文主要对空中机器人(UAV)轨迹进行规划设计, 将空中机器人(UAV)的轨迹环境采用栅格化处理, 在基于栅格划归的轨迹环境下运用 A\*算法寻求空中机器人从初始点到目标点的无碰撞最短路径, 并在 Microsoft Visual C++ 6.0 开发环境中进行轨迹仿真。通过计算机轨迹仿真显示, 基于 A\*算法的空中机器人(UAV)可寻求一条从初始点到目标点的最短无碰撞路径。

**关键词:** 空中机器人(UAV); 轨迹规划; A\*算法; Visual C++ 仿真

### 1. 引言

空中机器人(UAV)的轨迹规划一般指在确定空中机器人(UAV)起飞位置、目标位置和飞行途中的目标任务后的一系列优化问题, 根据空中机器人(UAV)的机动性能, 飞行的地理环境及威胁等信息规划出一条满足飞行条件的最优或者次优路径。优化得到的航迹应该能够保证空中机器人(UAV)有效避开敌方雷达探测及攻击威胁, 且可有效避开飞行环境中的障碍物及险要地形等不利因素。空中机器人(UAV)参考规划好的轨迹飞行时还应该能够在

规定的时间内及时到达任务目标点, 当已知的飞行环境或者飞行任务发生变化时, 轨迹规划系统应该能够实时规划出新的可飞行的轨迹来代替参考轨迹。

机器人轨迹规划是机器人学的一个重要研究领域, 也是人工智能与机器人学的一个令人感兴趣的结合点。机器人轨迹规划问题可以建模为一个有约束的优化问题, 都要完成轨迹规划、定位和避障等任务。轨迹规划是机器人导航中最重要的任务之一, 根据机器人对环境信息掌握的程度和障碍物的不同, 移动机器人的轨迹规划基本上可分为以下几类: 1) 已知环境下的对静态障碍物的轨迹规划; 2) 未知环境下的对静态障碍物的轨迹规划; 3) 已知环境下对动态障碍物的轨迹规划; 4) 未知环境下的对动态障碍

国家自然科学基金项目支持(资助号: 31300125)

物的轨迹规划。也可根据对环境信息掌握的程度不同将移动机器人轨迹规划分为 2 种类型, 1 是基于环境先验完全信息的全局轨迹规划, 2 是基于传感器信息的局部轨迹规划, 后者环境是未知或部分未知的, 即障碍物的尺寸、形状和位置等信息必须通过传感器获取。全局轨迹规划是指根据先验环境模型找出从起始点到目标点的符合一定性能的可行或最优路径, 它涉及的基本问题是世界模型的表达和搜寻策略。

无论机器人轨迹规划属于哪种类别, 采用何种规划算法, 基本上都要遵循以下步骤:

1) 建立环境模型, 即将现实世界的问题进行抽象后建立相关的模型;

2) 路径搜索方法, 即寻找合乎条件的路径的算法。

全局轨迹规划包括环境建模和路径搜索策略 2 个子问题, 其中局域轨迹规划按世界模型表达方法的不同存在 3 种比较典型的环境建模方法: 构型空间法、自由空间法、和栅格法等。局部轨迹规划的主要方法有: 人工势场法、遗传算法、模糊逻辑算法、蚁群算法等<sup>[1] [2] [3]</sup>。

本文空中机器人轨迹规划设计要求为: 空中机器人(UAV) 轨迹规划的核心目的就是寻找一条满足各种要求的轨迹, 其中的要求条件包括隐蔽性要求, 飞行任务要求及实时性要求等。针对空中机器人轨迹规划设计要求, 本文重点是飞行环境建模方法的改进和利用 A\*算法对空中机器人进行导航, 同时使用 Visual C++ 对轨迹进行仿真。

2. 空中机器人轨迹规划总体方案和环境描述.

2.1 空中机器人(UAV) 自主飞行管理系统

常见的空中机器人(UAV) 自主飞行管理系统主要由三层组成, 包括有任务规划层、决策规划层和执行规划层<sup>[4]</sup>。简化的空中机器人(UAV) 自主飞行管理系统框图如图 2.1 所示。

2.2 空中机器人(UAV) 轨迹环境描述

设空中机器人(UAV) 的工作空间为二维平面上的有限平面区域 D, 其中分布着有限个静态障碍物, 并且障碍物的位置、大小已知。轨迹规划的目的是使机器人由起点  $g_{begin}$  安全地避碰地沿一条较短路径到达终点  $g_{end}$ 。为使问题简化, 假定机器人运动过程中, 障碍物的位置、大小均不发生变化<sup>[5] [6]</sup>。

2.2.1 栅格法简介

栅格法是由 W. E. Howden 在 1968 年提出的, 他在进行路径规划时采用了栅格(Grid) 表示地图。设环境的最大长度为 L, 宽度为 W, 栅格的尺度(长, 宽) 均为 b,

则栅格数为  $(L / b) \times (W / b)$ , 环境 Map 由栅格  $map_i$  构成:

$$Map = \{ map_i, map_i = 0 \text{ 或 } 1, i \text{ 为整数} \}$$

其中  $map_i = 0$  表示该格为自由区域,  $map_i = 1$  表示该格为障碍区域。

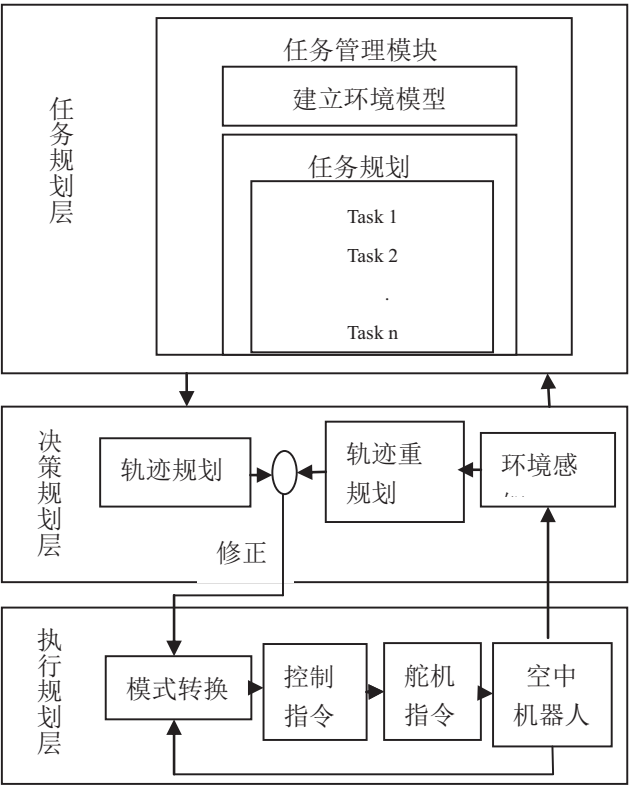


图 2.1 空中机器人(UAV) 自主飞行管理系统框图

栅格法将机器人规划空间分解成一系列的具有二值信息的网络单元, 工作空间分解成单元后则使用启发式算法在单元中搜索安全路径。搜索过程多采用四叉树或八叉树表示工作空间。栅格的一致性和规范性使得栅格空间中邻接关系的简单化。赋予每个栅格一个通行因子后, 路径规划问题就变成在栅格网上寻求两个栅格节点间的最优路径问题。栅格法以基本元素为最小栅格粒度, 将地图进行栅格划分, 基本元素位于自由区取值为 0, 处在障碍物区或包含障碍物区为 1, 这样在计算机中建立一幅可用于路径规划的地图<sup>[7]</sup>。

2.2.2 环境模型的建立

1. 栅格地图设计

在进行轨迹规划时, 采用栅格(grid) 为基本单位表示环境信息。栅格的大小通常与空中机器人的飞行步长相

适应，即机器人的飞行就可以转化为从一个完全可行栅格移动到另外一个完全可行栅格。设机器人能自由运动的范围为 $[0, R_a]$ 。根据栅格与不可行区域的交集，可将栅格分为三种：

- (1) 完全可行栅格，栅格内所有区域都是安全可行的。
- (2) 完全不可行栅格，栅格内的所有区域都不是安全可行的。
- (3) 不完全可行栅格，栅格内的一部分区域是安全可行的，另一部分区域不是安全可行的。

本文首先将不完全可行栅格归于完全不可行栅格，这样可以避免将不完全可行栅格细分，导致整个环境栅格数量增加，从而增加搜索路径的困难。为此，先粗略搜索到次优路径后，再将不完全可行栅格还原到原工作环境中。在第一步的搜索过程中，首先将安全可行栅格表示为空白方格，完全不可行栅格表示为涂黑方格，机器人的整个活动环境如图 2.2 所示（图 2.2 表示的是将不完全可行栅格归于完全可行栅格后的整个活动环境图）。

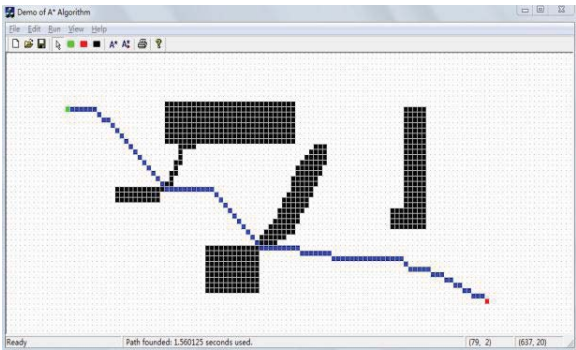


图2.2 不完全可行栅格归于完全可行栅格后的整个活动环境图

栅格法以每个栅格为基本单元，栅格图中每两个相邻的单元栅格是否能安全通过，用数值表示出来。两个栅格之间完全不可行时，取值为 0，完全可行时，取值为 1，即可由如下公式表示：

$$map_i = \begin{cases} 0 & \text{栅格}u,v\text{之间完全不可行} \\ 1 & \text{栅格}u,v\text{之间完全可行} \end{cases} \quad (2-1)$$

### 2. 栅格标识

栅格标识可采用下述两种方法：

(1) 直角坐标法。如图 2.3 所示，以栅格阵左上角为坐标原点，水平向右为 x 轴正方向，竖直向下为 y 轴正方向，每一栅格区间对应坐标轴上的一个单位长度。任一栅格均可用直角坐标 (x, y) 唯一标识。

(2) 序号法。如图 2.3 所示，按从左到右，从上到下的顺序，从栅格阵左上角第一个栅格开始，给每一个栅格

一个序号 n(从 0 开始计)，则序号 n 与栅格块一一对应。

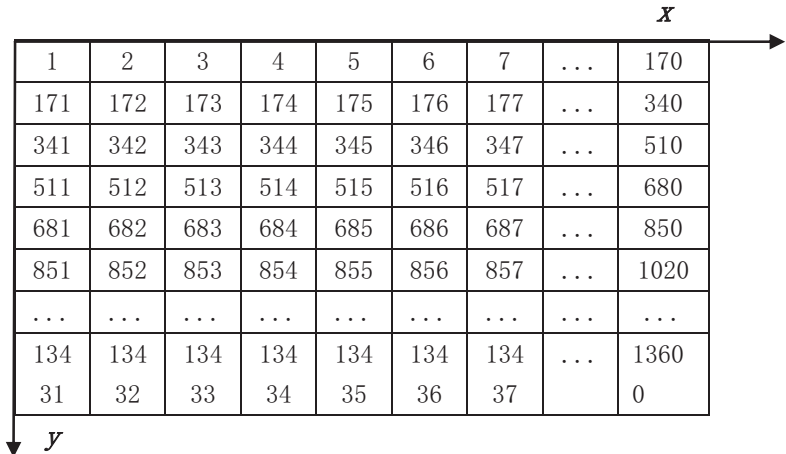


图 2.3 栅格坐标与序号的关系

上述两种标识，互为映射关系：

$$n = x + N_x y \quad (2-2)$$

$$\begin{cases} x = \text{mod}(n, N_x) \\ y = \text{int}(n, N_y) \end{cases} \quad (2-3)$$

其中， $N_x$  为每行的栅格数， $N_x = x_{\max} / R_a$ ， $N_y$  为每列的栅格数，式 (2-3) 中， $\text{mod}$  表示取  $n / N_x$  之余数， $\text{int}$  表示取  $n / N_y$  之整数。

### 2.2.3 问题的描述与假设

将工作环境 D 的左上角视为坐标原点，横坐标为 X 轴，纵坐标为 Y 轴，依次划分为  $\text{row} \times \text{col}$  个大小相同的正方形栅格，边长为 1，由这些栅格构成一个连通图，机器人要在这个连通图上搜索一条从起始栅格到目标栅格的轨迹 [10]。

针对问题，作如下假设：

假设 1：考虑机器人和障碍物的大小，在二维的平面 D 上，将它们视为圆形，直径分别为  $D_R$  和  $D_0$ （其中  $D_R < l/2$ ， $D_0 < l/2$ ）。

假设 2：机器人只有 8 个运动方向，如图 2.4 所示

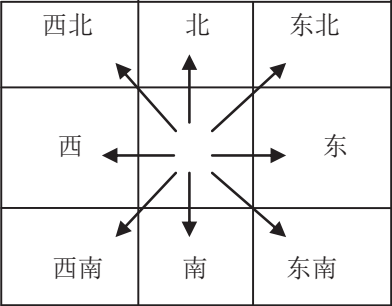


图 2.4 机器人运动方向示意图



假设 3: 机器人的移动速度是  $V_R$ , 且  $V_R$  恒定。

假设 4: 机器人每走一步即走一个栅格的中心点, 任意时刻机器人能探测到从前栅格中心为中心的区域内的环境信息。

### 2.3 空中机器人(UAV)轨迹规划算法的选择

空中机器人(UAV)轨迹规划, 解决了环境模型的建立问题, 另一个主要问题便是轨迹规划算法的选择。选择怎样的算法, 对于轨迹规划至关重要。目前国内外在空中机器人(UAV)轨迹规划方面已经研究了很多种算法, 这些算法总体可以概括为传统经典算法和现代智能算法。传统经典算法包括数学规划法、动态规划法、最优控制法、牛顿法和梯度法; 现代智能算法包括启发式寻优搜索、群体智能法、遗传算法、神经网络法、模拟退火法、专家系统法<sup>[11]</sup>。

空中机器人(UAV)轨迹规划算法的选择是机器人的关键技术, 需要选取满足设计要求的算法。本文的设计要求是隐蔽性要求、飞行任务要求及实时性要求等, 针对这些要求, 综合考虑各种算法的优缺点, 同时考虑作者自身研究条件, 最后选择 A\*算法作为空中机器人(UAV)轨迹规划算法。

A\*算法能够解决本文所述的在已知环境下寻找一条从初始点到目标点的分布有有限个静态障碍物的轨迹。此算法简单, 容易理解, 且具有很多优点, 完全可以胜任本文要求的轨迹规划。故而, 下文重点详述基于 A\*算法的空中机器人轨迹规划设计与仿真。

## 3 基于 A\*算法的空中机器人轨迹规划设计

A\*算法是一种典型的启发式搜索方法, 以估价函数指导搜索的进行, 由该函数可以获得各点的代价, 求出状态空间搜索的最短路径。本文针对空中机器人在具有障碍物的空间环境中的轨迹问题, 利用栅格化的环境模型, 使用 A\*算法进行轨迹规划。<sup>[12]</sup>

### 3.1 A\*算法基本概念

在启发式搜索算法的领域中, A\*算法是其中应用极为广泛的一个, 许多研究者对使用该算法进行轨迹规划进行了深入的探讨与研究。此算法主要采用一个评价函数  $f(n)=g(n)+h(n)$ , 来对 OPEN 表中的扩展节点进行指导和选择。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  $n$  节点的实际代价(即已发现最优路径的代价),  $h(n)$  是从节点  $n$  到目标节点最佳路径的估计代价。

因此, 就把使用评价函数  $f(n)=g(n)+h(n)$  来排序节点的图搜索算法称为 A 算法。如果对轨迹搜索问题中的所有节点  $n$ , 存在  $h(n) \leq h^*(n)$ , 它表示偏于保守的估计, 则 A

算法一定会找到一条从起始点到达目标点的最佳路径。

在 A 算法中, 如果采用  $h^*(n)$  的下界  $h(n)$  作为启发函数, 则该算法称为 A\*算法。在  $h=0$  的情况下, A\*算法就成为了有序搜索算法。

### 3.2 评价函数

现在令评价函数  $f$ , 使得在任意节点上其函数值  $f(n)$  能够估算出从初始节点到节点  $n$  的最小代价路径的代价, 与从节点  $n$  到某一个目标节点的最小代价路径的代价之总和, 换句话说, 即  $f(n)$  是约束通过节点  $n$  的一条最小代价路径的代价的一个估计。所以, OPEN 表上具有最小  $f$  值的那个节点, 就是所估计的加有最少严格约束条件的节点。而且, 下一步如果要扩展这个节点, 就是合情合理的。

把函数  $g^*(n)$  定义为从已知起始节点到任意节点  $n$  的一条最佳路径的代价, 函数  $h^*(n)$  定义为整个目标节点集合上所有从节点  $n$  到目标节点最小代价路径的代价, 在这里, 从节点  $n$  到目标节点能够获得  $h^*(n)$  的任意一条路径, 就是一条从节点  $n$  到某个目标节点的最佳路径, 对于那些完全不能够到达目标节点的节点  $n$ , 把他到目标节点的路径长度定义为无穷大。

接下来, 定义函数  $f^*(n)$ , 使得在任意一个节点  $n$  上, 其函数值就是从初始节点到节点  $n$  的一条最佳路径的实际代价加上从节点  $n$  到某个目标节点的一条最佳路径的代价之和, 用公式表示如下式(3-1), 即

$$f^*(n) = g^*(n) + h^*(n) \quad (3-1)$$

对上式来说, 函数  $f^*(n)$  的值就是从初始节点开始, 约束地通过了节点  $n$  的一条最佳路径代价, 从初始节点和节点  $n$  两个综合起来时, 上面的公式(3-1)的表达式就是

$$f^*(n) = h^*(n) \quad (3-2)$$

此时表示一条从初试节点到目标节点, 其中无约束的一条最佳路径的代价。

所以, 前面所述的评价函数  $f(n) = g(n) + h(n)$  是  $f^*(n)$  的一个估计, 其中,  $g(n)$  是  $g^*(n)$  的一个估计, 也就是说,  $g(n)$  是  $g^*(n)$  的一个估价函数, 并且, 他们之间满足  $g(n) \geq g^*(n)$ 。同理, 也就是  $h(n)$  是  $h^*(n)$  的一个估计, 也就是  $h^*(n)$  的一个估价函数。

算法的效率受到如下三个重要因素的影响:

- ①被发现路径的代价;
- ②在发现路径中被用来扩张的节点数;
- ③用来计算的计算量的多少。

选择恰当的启发式函数, 可以使影响算法效率的综合因素达到一个合理值。对于有些实际问题, 可能要扩张的

节点非常多，导致计算量很大，以至于在很短时间内计算困难，此时，要使影响效率的各个因素的综合达到一个合理值，不能片面要求所花费的时间少。

A\*算法的关键在于评价函数的定义，从找到一条最小代价的思路出发，在计算可以把评价函数值分为从初始节点到节点 n 的代价，和从节点 n 到达目标节点的代价两部分来进行计算和分析。

3.3 A\*算法的性质以及改进方式

A\*算法自身具有下面两条性质<sup>[13]</sup>：

- 1. 可接纳性
- 2. 一致性

在求解路径搜索类问题时，有时候会在搜索过程中就把最优路径给舍弃了。具体来说，主要是最优路径上的一些节点，由于启发信息的不够全面，当时还不知道这些点是属于最优路径上的，以至于舍弃了最优路径上的一些节点，这将导致最终找到的路径就不会成为最优秀的，进而多走了一些路程，对从初始节点到达目标点占用了过多时间。为发现问题和解决问题，进而找到切实可行的解决方法，我们使用多次搜索的方法，找到最优路径，以提高效率，节省时间。

4 空中机器人轨迹规划仿真

A\*算法作为解决空中机器人轨迹规划搜索类问题的一个主要方法，我们在对该算法进行了分析与研究的基础之上，通过有效的方法与措施对其进行了优化与改进，使其搜索的效率有了很大地提高。接下来，我们将对该算法所作的研究，通过在 Microsoft Visual C++ 6.0 开发环境中进行编程，来进行模拟与实现，以验证其有效性。

4.1 算法流程

在算法具体模拟与实现过程中，对于 OPEN 表和 CLOSED 表来说，他们中的节点除含有其他的状态描述外，还包含有该节点的代价估计值 g 和 f，后继元素，以及一个主链的前趋指针，指明该节点在通向初始节点的最佳通路上的父节点，有了主链，我们就可以在找到目标节点后，很容易的只要沿着主链的指针追踪到初始节点，就可以获得整个搜索求解的路径。具体模拟如图 4.1<sup>[12]</sup>。

4.2 空中机器人轨迹规划仿真图

通过对算法的仿真，得出对于分布有静态障碍物时算法的搜索程序仿真图。如图 3.2 所示，图中的绿色点表示搜索的初始节点，红色点表示需要达到的目标节点，黑色点表示在搜索过程中遇到的障碍物，蓝色点表示对于这个搜索问题所求解到的解，也就是从初始节点到目标节点的路径。经过对算法的编辑，通过仿真图，我们会发现：

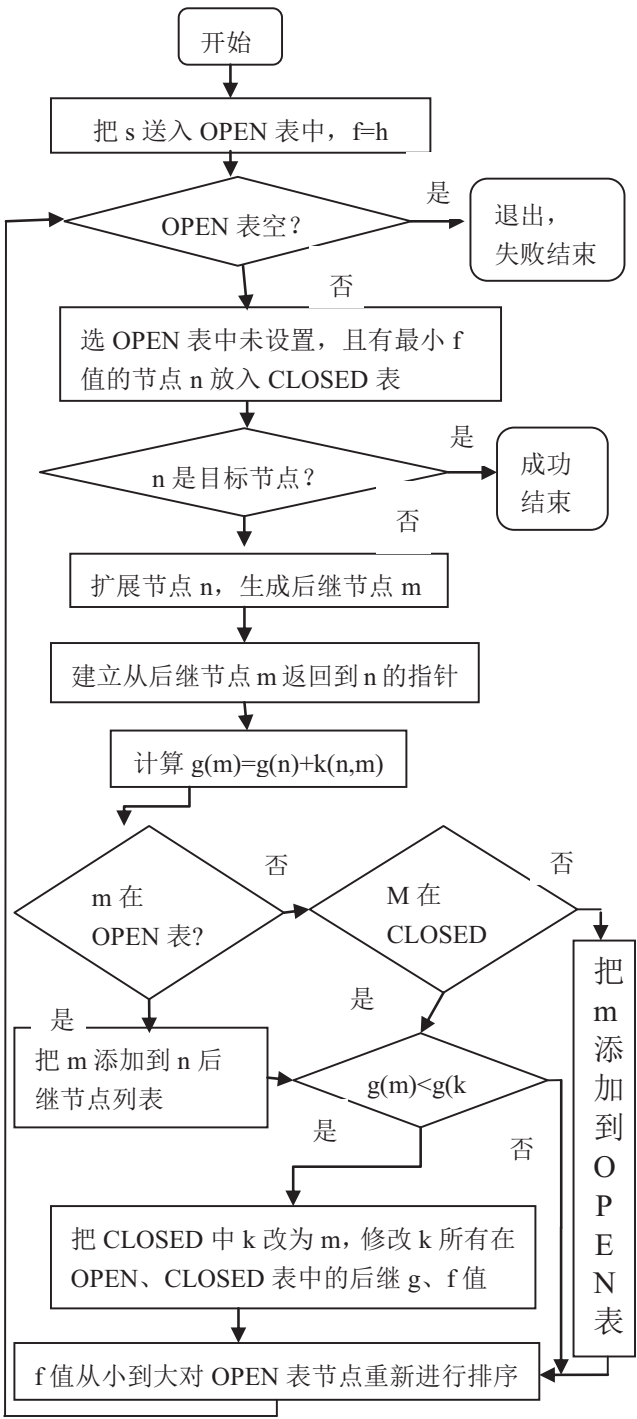


图 4.1 仿真流程框图

(1) 在路径搜索过程中，有时候会在搜索过程中就把最优路径给舍弃，主要是最优路径上的一些节点，这就说明这个算法在对前面某些点进行扩展后，放弃了最优路径上

的某一个节点。针对这种情况,我们通过依次屏蔽搜索节点,进行多次搜索,从而避免多走许多冤枉路,使得最优路径上的节点没有被舍弃掉。

(2)对于一些凹凸形状的地形环境,由于图形的复杂性,仿真的过程中,计算量较大,轨迹规划的时间相对长些。

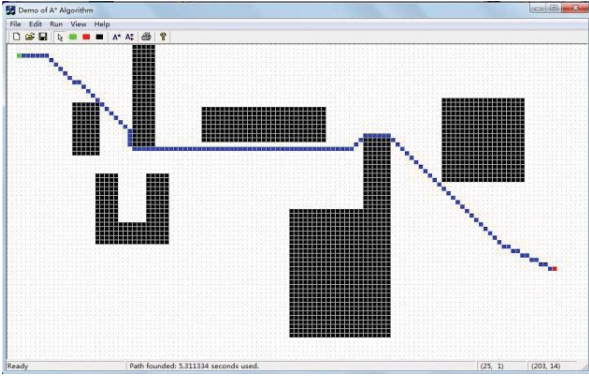


图 4.2 空中机器人(UAV)轨迹规划仿真图 1

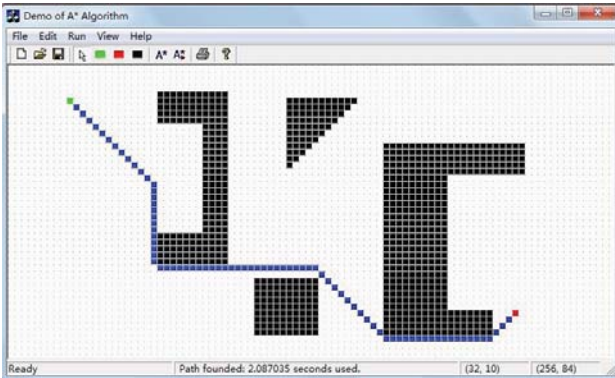


图 4.3 空中机器人(UAV)轨迹规划仿真图 2

## 5 结论与展望

本文主要对空中机器人(UAV)轨迹进行规划设计,将空中机器人(UAV)的轨迹环境采用栅格化处理,在基于栅格划归的轨迹环境下运用A\*算法寻求空中机器人从初始点到目标点的最短路径,并在Microsoft Visual C++ 6.0 开发环境中进行轨迹仿真。

本文只针对轨迹规划问题中2D环境下分布有有限个静态障碍物的运行环境中寻找最优路径,而在实际情况下,轨迹规划问题是3D环境,同时是分布有静态和动态障碍物的复杂环境。对于这些复杂的情况,是本文继续研究的方向。

## 参考文献

- [1] 柏艺琴, 贺怀清. 移动机器人路径规划方法简介[J]. 中国民航学院学报, 2003, 21(2): 206-209
- [2] 董宇欣. 移动机器人路径规划方法研究[J]. 信息技术, 2006, 6: 108-111
- [3] 朱明华, 王霄, 蔡兰. 机器人路径规划方法的研究进展与趋势[J]. 机床与液压, 2006, NO. 3: 5-8
- [4] 李璠. 无人机轨迹规划算法研究[D]. 辽宁: 大连理工大学. 2011. 7-8
- [5] Dongqing Shi, Emmanuel G. Collins, Jr., Damion Dunlap, "Robot Navigation in Cluttered 3-D Environments Using Preference-Based Fuzzy Behaviors," IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, VOL. 37, NO. 6, pp. 1486-1499, DECEMBER 2007
- [6] C. Balaguer, A. Oliver, R. Aracil & A. Barrientos (1994): Planning collision-free paths in a three-dimensional partially known environment, Advanced Robotics, 9:1, 15-27
- [7] 王娟娟, 曹凯. 基于栅格化的机器人路径规划[J]. 农业装备与车辆, 2009, No. 4: 14-17
- [8] 乔茹, 章小兵, 赵光兴. 基于改进蚁群算法的移动机器人全局轨迹规划[J]. 安徽工业大学(自然科学版), 2009, 26(1): 77-80
- [9] 刘亮. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[D]. 武汉: 武汉科技大学. 2007. 3-4
- [10] 谢园园, 朱庆宝. 动态环境下基于蚁群算法的机器人路径规划[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2006, 6(3): 45-50
- [11] 王俊, 周树道, 朱国涛, 程龙, 罗伟. 无人机航迹规划常用算法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(8): 5-8
- [12] 郝向荣. 在智能搜索中A\*算法的应用与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学. 2007. 23-32
- [13] 刘浩, 鲍远律. A\*算法在矢量地图最优路径搜索中的应用[J]. 计算机仿真. 2008. 25(4): 253-257