

doi: 10.7690/bgzd.2021.03.004

基于稀疏 A* 算法的微型固定翼无人机航迹规划

时 浩¹, 田聪玲¹, 任 意², 贾 芳¹

(1. 中国兵器工业第 208 研究所, 北京 102202; 2. 陆军装备部装备项目管理中心, 北京 100072)

摘要: 为在微型固定翼无人机嵌入式平台上应用航迹规划, 设计一种基于稀疏 A* 算法的自动航迹规划方法。根据微型固定翼无人机的应用环境、特点和运动约束, 建立航迹规划的环境模型和运动模型, 利用单元分解法实现飞行区域环境建模和无人机运动建模, 使用稀疏 A* 算法进行航迹规划, 给出其操作使用流程, 并对 2 种不同的启发函数进行仿真分析。结果表明: 该方法能提高航迹规划的安全阈值, 优化算法。

关键词: 无人机; 固定翼; 航迹规划; 稀疏 A* 算法; 启发函数

中图分类号: TP181; V249 **文献标志码:** A

Route Planning of Small Fixed-wing UAV Based on Sparse A* Algorithm

Shi Hao¹, Tian Congling¹, Ren Yi², Jia Fang¹

(1. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China;

2. Equipment Project Management Center, Army Equipment Department, Beijing 100072, China)

Abstract: For using route planning on embedded system of small fixed-wing UAV, design an automatic route planning method based on sparse A* algorithm. According to the application environment, characteristics and motion constraints of small fixed-wing UAV, establish the environmental model and the motion model of route planning. Use unit decomposition method to realize environmental model of flight area and the motion model of UAV. Use sparse A* algorithm for route planning, and give the operation program. Two different heuristic functions were simulated and analyzed. The results show that the safety of route planning is improved and the algorithm is optimized.

Keywords: UAV; fixed-wing; route planning; sparse A* algorithm; heuristic function

0 引言

近年来, 对智能化、自主化领域的研究成为无人机系统研究工作中的热点。无人机开始脱离传统的指令控制模式, 逐步实现自主的航迹规划、环境感知、障碍规避, 完成智能机动控制。无人机航迹规划是指无人机在工作任务、环境条件、飞行性能等约束条件下, 寻找一条从起始点到目标点的最优路径的过程, 可分为全局航迹规划和运动规避控制 2 部分, 其中全局规划重点关注全局飞行策略和最优航迹的选取, 是无人机实现自主飞行的关键要素。

针对无人机航迹规划问题, 近年来国内外的重点研究方向主要包括人工势场法、遗传算法、蚁群算法、A* 算法和 D* 算法等^[1-4]。文献[5]介绍了状态空间搜索方法、遗传/进化算法和群优化算法等全局路径规划方法并提出了小、微型飞行器感知、规划、控制的特点; 文献[6]建立了固定翼无人机动力学模型并提出了一种使用计算机自动规划航迹的方法; 文献[7-9]介绍了基于 A* 算法的航迹规划方法, 并对其进行了多种改进和优化, 重点介绍了稀疏 A* 算法

在无人机航迹规划中的应用。从当前研究成果来看, 多数文献将航迹规划的研究平台局限于四旋翼无人机或大型固定翼无人机, 使用电子计算机等平台完成航迹规划算法, 较少考虑在微型固定翼无人机嵌入式平台上航迹规划算法的应用。笔者基于微型固定翼无人机嵌入式平台, 设计了一种在无人机手持控制终端上实现的计算量小、实时性强的快速自动航迹规划算法。

1 研究问题和求解框架

1.1 研究问题

在低成本微型固定翼无人机的航迹规划研究中, 考虑的主要问题有: 1) 系统模型的建立; 2) 航迹规划算法设计与优化; 3) 运算能力与运算实时性要求; 4) 安全性分析及优化。

1.2 求解框架

文中的无人机系统由手持控制终端和无人机机体组成, 由无人机手持控制终端自动实现全局航迹规划的任务, 并将航迹上传到无人机。

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2020-12-10

基金项目: 国防基础科研计划项目(JCKY2019209C004)

作者简介: 时 浩(1985—), 男, 河北人, 硕士, 高级工程师, 从事导航、制导与控制、智能弹药研究。E-mail: dahao10@126.com。

求解框架步骤为：1) 结合无人机模型和航迹约束条件，采用空间单元分解方法建立环境模型和无人机运动模型；2) 研究适合微型固定翼无人机的启发式全局航迹规划算法，探索其启发函数的选取；3) 结合微型固定翼无人机特点，探讨提高航迹规划安全阈度的方法。

2 系统建模与空间单元分解

重点介绍微型固定翼无人机航迹规划时的系统建模方法。首先分析得到一种适合嵌入式系统应用的环境建模方法，然后进行无人机运动建模，推导进行单元分解时节点的离散化尺寸计算方法。

无人机手持控制终端进行环境建模时，空间单元分解的离散化尺寸是需要考虑的重要因素：若离散化尺寸过大，可能造成规划失败或无法找到最优航迹；若离散化尺寸过小，可能造成运算量倍增、效率降低或航迹不可行。空间分解时，需要结合无人机的数学模型等多种因素进行综合设计。

2.1 环境模型

采用单元分解法进行环境建模，无人机飞行环境为一个有界的 $L_x \times L_y \times L_z$ 3 维空间区域 S 。由于微型无人机算力有限，因此，将上述环境简化为无人机在预设高度 L_z 飞行时 2 维平面的航迹规划避障问题，即将 $L_x \times L_y$ 的有界 2 维空间表示为包括 $n_x \times n_y$ 个节点单元的离散化平面中的问题。

将飞行区域内 L_z 高度上的数字地图进行离散化，将超过飞行高度的山体等障碍单元设置为禁飞区，无人机操作手还可以在手持控制终端地图界面上设置其他已知的禁飞区域。地图离散化后，禁飞区域的空间节点值设为 1，安全区域的空间节点值设为 0，即可得到此飞行高度上的环境模型。图 1 为飞行区域等高线地图，其中灰色区域为操作手在地图界面上设定的禁飞区域，若设定飞行高度为 100 m，图 2 为手持控制终端自动完成地图离散化后环境建模的结果。

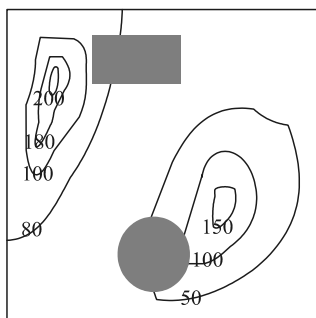


图 1 飞行区域 2 维地图

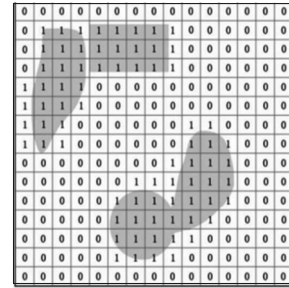


图 2 环境建模结果

2.2 无人机运动模型

首先，若不考虑无人机的运动学约束，在离散化平面内，运动体做典型的布朗运动，其 $o(t) \in \{0,1,2,3,4,5,6,7\}$ 可描述如图 3 所示，其方向定义为 $\{0(\text{北}), 1(\text{东北}), 2(\text{东}), 3(\text{东南}), 4(\text{南}), 5(\text{西南}), 6(\text{西}), 7(\text{西北})\}^{[10]}$ 。

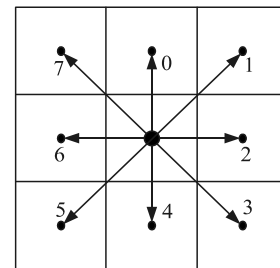


图 3 运动体运动模型

固定翼无人机的 2 维质点简化模型^[11-12]为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \phi \\ \dot{y} &= v \sin \phi \\ \dot{\phi} &= \omega \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$0 < v_{\min} \leq v \approx \bar{v} \leq v_{\max}; \quad (2)$$

$$\omega \leq \omega_{\max}. \quad (3)$$

式(1)中： $[x \ y]^T \in S$ 为无人机平面坐标位置； v 为飞行速度； ϕ 为航迹方向角； ω 为航向角速度。式(2)、式(3)描述了固定翼无人机飞行速度和航向角速度的限制。式(2)中 \bar{v} 为操作手在航迹规划时设定的速度指令，是无人机飞行速度的跟踪值。式(3)中 ω_{\max} 为无人机最大航向角速度，是无人机的固有参数，预设手持控制终端中。

由上述模型可推导出固定翼无人机的最小转弯半径

$$R_0 = v/\omega_{\max} \approx \bar{v}/\omega_{\max} = \bar{v}/(g \cdot \tan \phi_{\max}). \quad (4)$$

在上述无人机模型约束下，随着环境模型中空间单元的分解尺寸不同，无人机的运动模型也将有所不同，不再是图 3 所描述的 8 个方向。定义无人机运动模型：在下一步长处有 3 个可能的位置，直线前进、左转前进、右转前进，即 $o(t+1) \in \{o(t)-1,$

$o(t), o(t)+1 \} \bmod 8$ 。图 4 描述了无人机当前节点向北飞行，即 $o(t)=0$ 时下一步长 $o(t+1)$ 的可能位置。

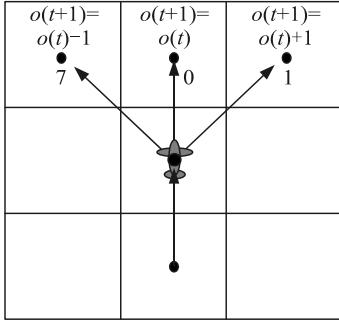


图 4 固定翼无人机运动模型

2.3 空间单元分解方法

在无人机运动模型下，无人机转弯的过程包括 2 种一般性情况，分别为：

$$\left. \begin{aligned} o(t) &\in \{0, 2, 4, 6\} \\ o(t+1) &\in \{o(t)-1, o(t)+1\} \bmod 8 \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} o(t) &\in \{1, 3, 5, 7\} \\ o(t+1) &\in \{o(t)-1, o(t)+1\} \bmod 8 \end{aligned} \right\}。 \quad (6)$$

第 1 种情况如图 5 所示，即无人机在当前步长由水平或垂直相邻节点移动到本节点，下一步长转弯移动到对角线相邻节点。

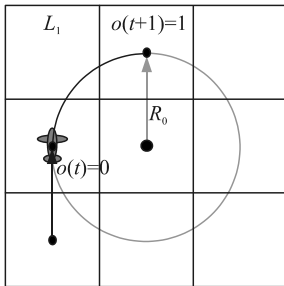


图 5 无人机转弯——第 1 种一般情况

可以推导出该情况下空间的离散化尺寸 L_1 与无人机最小转弯半径 R_0 的关系为

$$L_1 \geq R_0。 \quad (7)$$

第 2 种情况如图 6 所示，即无人机在当前步长由对角线相邻节点移动到本节点，下一步长转弯移动到水平或垂直相邻节点。

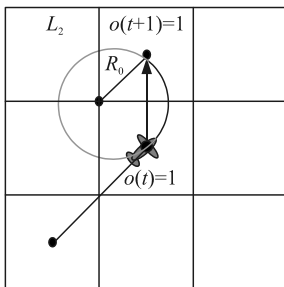


图 6 无人机转弯——第 2 种一般情况

可以推导出该情况下空间的离散化尺寸 L_2 与无人机最小转弯半径 R_0 的关系为

$$L_2 \geq \sqrt{2}R_0。 \quad (8)$$

结合微小型固定翼无人机性能和任务覆盖区域要求，空间的离散化尺寸 L 可以取上述 2 种情况下均能满足约束条件的最小值，即满足

$$L = \max(L_{1\min}, L_{2\min}) = \sqrt{2}R_0 \approx \sqrt{2}\bar{v}/\omega_{\max}。 \quad (9)$$

在微小型无人机手持控制终端实际解算过程中，只需操作手输入无人机速度指令 \bar{v} ，即可结合终端内预存的无人机最大航向角速度 ω_{\max} 计算得到空间的离散化尺寸 L ，完成系统建模。实际应用表明，微小型固定翼无人机使用该空间单元离散化方案进行航迹规划，在算法效率、可行性等方面都能满足系统要求。

3 微小型固定翼无人机航迹规划

3.1 基于稀疏 A*算法的航迹规划方法

无人机航迹规划的方法主要包括启发式算法和数学优化算法。A*算法是一种常用的有向图启发式航迹规划算法，具有计算简单、算法完备、搜索效率高的特点，是一种高效的全局航迹规划算法。A*算法采用的代价函数^[1]为

$$F(n)=G(n)+H(n)。 \quad (10)$$

式中： $G(n)$ 为起始节点到当前节点的真实代价； $H(n)$ 为当前节点到目标节点的启发函数； $F(n)$ 为起始节点到目标节点的估计代价。

Szczerba 等提出了稀疏 A*算法 (sparse A* search, SAS)。该算法将无人机机动约束结合到搜索算法中，在保证航迹可行性的同时有效缩短了搜索时间。微小型固定翼无人机手持控制终端中，使用 SAS 算法实现全局航迹规划，2.2 节建立的无人机运动模型即为 SAS 算法的约束条件，应用于本系统的 SAS 算法扩展节点为无人机运动模型中所描述的 3 个节点。

SAS 算法使用 OpenList 和 CloseList 2 个数据结构实现搜索。其中，OpenList 存放待扩展的节点信息，CloseList 存放已被扩展的节点信息。

微小型固定翼无人机航迹规划操作流程如图 7 所示。操作手首先在终端内设置起始点、目标点、允许飞行区域、飞行高度和飞行速度，手持控制终端自动完成数字地图离散化，建立环境模型，开始航迹规划。航迹规划算法步骤为：

- 1) 将起始节点添加到 OpenList 中；

2) 判断 OpenList 是否为空, 若为空, 则航迹搜索失败, 调整飞行区域或高度, 重新规划航迹;

3) 若 OpenList 不为空, 从 OpenList 中选择 F 值最小的节点移入 CloseList 作为当前节点;

4) 判断当前节点是否为目标点, 如果是目标点, 则算法结束, 开始路径回归, 得到无人机规划航迹;

5) 对当前节点满足约束要求的 3 个节点进行扩展, 若节点可通过且未在两表中, 则将其添加到 OpenList, 将当前节点作为其父节点, 同时更新它的 F 、 G 和 H 值; 若节点已存在 OpenList 中, 则将其当前 G 值与 OpenList 中的原 G 值进行比较, 若小于原 G 值, 则将当前节点作为其父节点, 并更新它的 F 和 G 值, 否, 则不更新。

6) 转至步骤 3)。

7) 航线规划完成后, 手持控制终端提取航向变化的节点作为航迹点, 解算航迹点经纬度坐标, 将其上传到无人机。

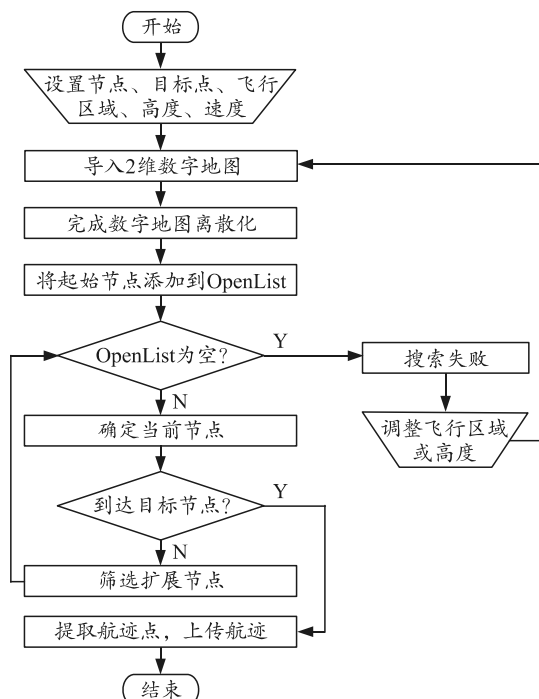


图7 微型固定翼无人机航迹规划操作流程

3.2 启发函数的选取

启发函数 $H(n)$ 的选取是 SAS 算法的关键环节, $H(n)$ 的设计对算法能否找到可行解及算法的效率, 都起到至关重要的作用。经证明, $H(n)$ 应满足的容许条件为

$$H(n) \leq H^*(n). \quad (11)$$

式中 $H^*(n)$ 是节点到目标点的真实最小代价。理论上,

只要 $H(n)$ 满足上式, 并且在搜索空间中存在可行解, 那么 SAS 算法一定能找到最优解。实际应用中, $H(n)$ 的选取并不容易: 若取值过小, 则会降低搜索效率; 取值过大, 则有可能错过最优解。

在 2 维航迹规划中, 启发函数 $H(n)$ 即为当前节点与目标节点之间的估计距离, 常用的距离算法包括曼哈顿距离、欧几里得距离和对角线距离。其中曼哈顿距离算法需要运动体在相邻 2 个节点间进行直角转向, 不满足固定翼无人机的运动学约束; 因此, 重点针对欧几里得距离和对角线距离算法进行分析。

欧几里得距离即为欧式空间中 2 点的最短距离, 计算方法为

$$H(n) = L \times \sqrt{(n_x - \text{goal}_x)^2 + (n_y - \text{goal}_y)^2}. \quad (12)$$

式中: L 为相邻节点间距, 即 2.3 节中描述的空间离散化尺寸; n_x 、 n_y 为当前节点的横纵坐标; goal_x 、 goal_y 为目标节点的横纵坐标。

对角线距离将无人机在节点间的水平或垂直运动距离与对角线距离分别进行计算, 计算方法为:

$$H(n) = L_S \times h_{\text{diagonal}}(n) + L \times (h_{\text{straight}}(n) - 2h_{\text{diagonal}}(n)); \quad (13)$$

$$h_{\text{diagonal}}(n) = \min(|n_x - \text{goal}_x|, |n_y - \text{goal}_y|); \quad (14)$$

$$h_{\text{straight}}(n) = |n_x - \text{goal}_x| + |n_y - \text{goal}_y|. \quad (15)$$

式中: $h_{\text{diagonal}}(n)$ 为 2 个节点之间沿对角线移动的步数; $h_{\text{straight}}(n)$ 为 2 个节点间水平或垂直运动的步数; $L_S = \sqrt{2}L$ 为对角线节点距离。

对以上 2 种算法作为 $H(n)$ 进行仿真分析。仿真参数为: 飞行区域 L_x 、 L_y 均为 2 000 m; 结合某无人机转弯半径, 由式(9)计算出空间离散化尺寸 L 为 20 m; 空间分解为 100×100 个节点单元。2 种算法对比结果如图 8、图 9 所示。

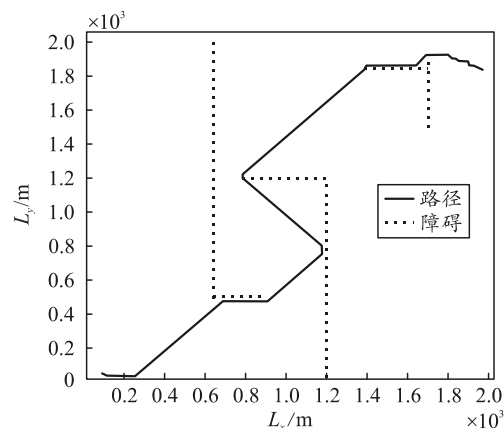


图8 欧几里得距离航迹规划结果

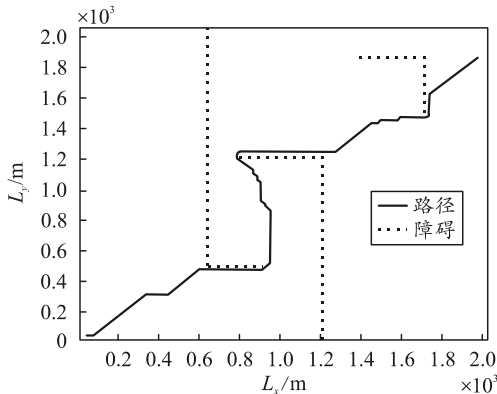


图 9 对角线距离航迹规划结果

在 2 种距离算法中，欧几里得距离是最小的，使用欧几里得距离作为 $H(n)$ 能保证满足容许条件式 (11)，理论上应有更好的规划效果，但是在文中的无人机运动模型约束下，仿真条件下的欧几里得距离效果并不如对角线距离，搜索范围和耗时也更长。因此采用对角线距离作为启发函数 $H(n)$ 。

相对而言，对角线距离算法的缺点在于航线的平滑性较差，无人机转向更为频繁，后续可以通过平滑算法进行航迹优化，在此不深入讨论。

3.3 障碍区域的扩展

文中所述的航迹规划算法在实际应用过程中，规划得到的航线常常出现沿障碍节点边缘运动的情况。微型固定翼无人机飞行过程中，受到离散化模型误差、阵风等环境因素、传感器测量误差等诸多因素的影响，实际飞行航迹势必与规划航迹存在跟踪误差，严重者将会导致安全性问题；笔者提出一种应用于嵌入式系统的障碍区域扩展方法，提高航迹规划的安全阈值。

航迹跟踪误差的最主要来源为离散化模型误差。结合 2.3 节所述的无人机 2 种转弯情况，分析无人机的航线跟踪误差。在第 2 种情况下，尽管存在一定跟踪误差，但是无人机不会飞离预设航线节点所在栅格。在第 1 种情况下，无人机实际飞行时会飞离预设航线的节点，其最大偏离值 d_{max} 为无人机实际航线与规划航迹组成弓形的高，即

$$d_{max} = (1 - \sqrt{2}/2)L \tag{16}$$

综上所述：由于航线跟踪误差，无人机转弯时有可能飞入相邻节点。若相邻节点单元为障碍物，则存在安全隐患。

此外，微型固定翼无人机受体积、成本所限，存在一定传感器测量误差，包括定位、姿态测量、高度测量和速度测量等误差。这些误差都会直接或

间接影响无人机的航线跟踪精度。对于微型无人机来说，其中最主要的误差为 GPS/北斗定位误差，实际研究时需要特别重视。

综合上述因素影响，航线跟踪误差在一个节点以内。笔者设计了一种简便的障碍区域扩展方法，将障碍区域边缘沿直线和对角线向外扩展一个节点。该方法可有效提高无人机飞行的安全性和可靠性，具体航迹规划结果如图 10 所示。

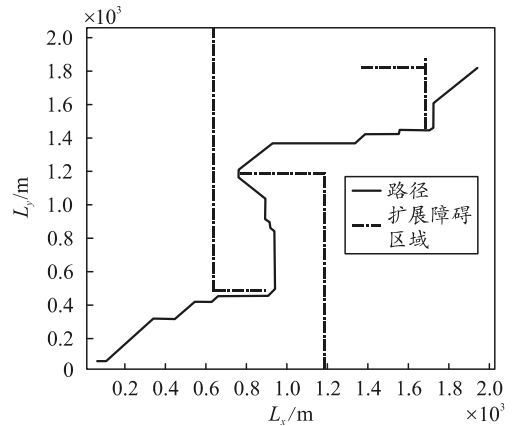


图 10 障碍区域扩展后航迹规划结果

4 结束语

在新一代无人机系统设计过程中，自动航迹规划问题是一项重要技术问题。笔者根据微型固定翼无人机的应用环境、特点和运动约束，建立了其航迹规划的环境模型和运动模型，在此基础上设计了一种适合无人机手持控制终端等嵌入式平台应用的基于稀疏 A^* 算法的固定翼无人机自动航迹规划算法，并对算法进行了启发函数分析设计和安全性优化。该算法具有资源需求量少、运算效率高、可行性强等特点，适合多种微型固定翼无人机系统应用。

参考文献：

- [1] 蔡自兴, 刘丽珏, 蔡竞峰, 等. 人工智能及其应用[M]. 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2016: 61-87, 327-343.
- [2] 郑昌文. 飞行器航迹规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003: 3-14.
- [3] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 961-967.
- [4] 邵长旭, 王茂森, 戴劲松, 等. 基于蚁群算法的无人机最短航路规划[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 93-96.
- [5] 吕洋, 康童娜, 潘泉, 等. 无人机感知与规避: 概念、技术与系统[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 520-537.