

## 基于改进 A\* 算法的无人机路径规划研究\*

唐嘉宁<sup>1,2</sup> 彭志祥<sup>1</sup> 李孟霜<sup>1</sup> 刘志聪<sup>1</sup> 谢翠娟<sup>1</sup>

(1. 云南民族大学电气信息工程学院 昆明 650000; 2. 云南民族大学无人自主系统研究院 昆明 650000)

**摘要:** 针对传统 A\* 算法在无人机路径规划时效率低下、路径点存在大量冗余,且路径转折较多的缺点,提出一种基于双向机制的改进 A\* 算法。首先引入双向搜索机制,分别以对向搜索的起点作为终点,然后判断终点位于起点的象限进行双向搜索,从而提高搜索效率。最后引入路径平滑策略,将双向搜索获取的初始路径进行平滑处理,减少冗余路径点和转折点。通过 MATLAB 平台对传统 A\* 算法和改进 A\* 算法进行对比实验,实验结果表明,相比于传统 A\* 算法,提出的改进 A\* 算法,路径规划时间平均减少了 61.61%,路径点平均减少了 83.09%,路径转折点平均减少了 46.97%,能够有效提高无人机工作效率,生成平滑路径。

**关键词:** A\* 算法;路径规划;双向搜索;双向搜索;路径平滑

**中图分类号:** V249;V279;TP18 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Research on UAV path planning based on improved A\* algorithm

Tang Jianing<sup>1,2</sup> Peng Zhixiang<sup>1</sup> Li Mengshuang<sup>1</sup> Liu Zhicong<sup>1</sup> Xie Cuijuan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Yunnan Minzu University, Kunming 650000, China;

2. Unmanned Autonomous Systems Institute, Yunnan Minzu University, Kunming 650000, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the traditional A\* algorithm in UAV path planning, such as low efficiency, a large number of redundant path points, and many path transitions, an improved A\* algorithm based on two-way mechanism is proposed. First, a bidirectional search mechanism is introduced, which takes the starting point of the opposite search as the end point, and then determines that the end point is located in the quadrant of the starting point for bidirectional search, so as to improve the search efficiency. Finally, the path smoothing strategy is introduced to smooth the initial path obtained by the bi directional search to reduce redundant path points and turning points. The traditional A\* algorithm and the improved A\* algorithm are compared through the MATLAB platform. The experimental results show that compared with the traditional A\* algorithm, the improved A\* algorithm proposed reduces the average path planning time by 61.61%, path points by 83.09%, and path turning points by 46.97%, which can effectively improve the working efficiency of UAVs and generate smooth paths.

**Keywords:** A\* algorithm; path planning; bidirectional search; bidirectional search; path smoothing

## 0 引言

近年来,无人机技术的飞速发展,使得无人机飞出实验室,并出现在许多实际应用中<sup>[1]</sup>,而无人机自主路径规划成为该领域的一项热门研究,通常根据规划环境信息的已知程度将路径规划分为:全局规划和局部规划<sup>[2]</sup>。

无人机在全局路径规划中需获取全部环境信息,然后根据获取的已知环境信息进行规划最佳无碰撞路径。全局路径规划的算法主要包含 A\* 算法<sup>[3-4]</sup>,遗传算法<sup>[5-6]</sup>,蚁群算法<sup>[7-8]</sup>、快速搜索随机树算法<sup>[9-10]</sup>等。A\* 算法是一种静态

路网中求解最短路径最有效的直接搜索算法,它通过启发函数引导其搜索方法,使其在最短路径的搜索效率上存在一定优势。A\* 算法已经广泛应用于多种场景,包括室内外无人机自主导航,室内机器人的路径规划等。但是 A\* 算法在搜索最短路径时存在遍历栅格多同时会出现很多冗余的扩展栅格,从而导致搜索时间长、路径点冗余且路径转折较多。目前已有许多学者针对 A\* 算法存在的不足,对 A\* 算法进行相应的改进。孔继利等<sup>[11]</sup>通过引入双向搜索机制,优化评价函数,以达到减少冗余扩展节点,提高搜索过程中的计算效率。祁玄玄等<sup>[12]</sup>通过目标性拓展,目标可见

收稿日期:2022-08-18

\* 基金项目:国家自然科学基金(61963038)项目资助

性判断、改变 A\* 算法的启发函数、改变扩展节点的选取方略四个方面改进 A\* 算法,从而使得 A\* 算法在运行时间和遍历栅格数均有大幅减少。王维等<sup>[13]</sup>通过对估计路径代价进行指数衰减的方式加权,使得 A\* 算法有目标性的扩展节点,从而减少其遍历栅格数和搜索时间。吴鹏等<sup>[14]</sup>通过采用双向搜索方式,正向、反向搜索过程分别以对方所扩展的最优节点作为自己的目标节点,从而缩短搜索计算时间。高民东等<sup>[15]</sup>通过从起点和终点同时运行时效 A\* 算法搜索路径,并采用多近邻栅格路径计算方案,从而减少算法搜索时间。姜月秋等<sup>[16]</sup>通过利用 IDA 算法进行路径规划,并对传统 A\* 算法的启发函数进行改进,提高了节点搜索效率。上述方法主要关注于路径规划过程中的冗余扩展节点和搜索时间的优化,对冗余路径点和路径转折较多不平滑问题考虑较少。

综上,本文提出一种双定向搜索 A\* 算法,首先,从搜索方式上对传统 A\* 算法进行改进,以减少冗余扩展点、提高搜索效率;然后通过路径平滑策略对路径进行平滑处理,从而减少冗余路径点和转折点;最后在不同的多障碍的地图环境下进行仿真实验,验证了所改进算法在提高搜索效率、减少冗余扩展节点、路径节点和路径转折点上产生明显效果。

## 1 A\* 算法路径规划

在无人机进行路径规划中,首先需要无人机搭载的传感器获取周围环境信息,建立周围环境的地图模型。然后在建立好的地图模型中引入规划算法,生成路径。

### 1.1 环境的表示方法

栅格地图在描述环境信息方面简单有效,易于计算,因此被广泛用于路径规划中。本文将采用由边长为 1 m 的栅格地图来表示无人机周围的环境信息,如图 1 所示。栅格法将无人机的周围工作环境用一系列相同尺寸的栅格表示,用栅格中心位置表示栅格节点位置<sup>[17]</sup>,并根据环境信息将栅格分成占据和空闲两种状态。其中图中的黑色栅格表示环境中的障碍物,对应占据状态,表示无人机不能通过的区域;图中的空白栅格表示环境中的安全区域,对应空闲状态,表示无人机可以到达的区域。

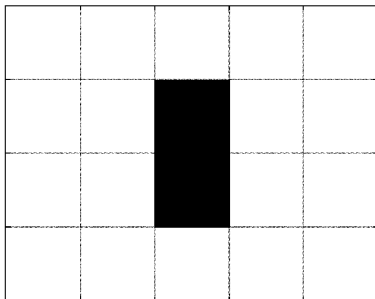


图 1 栅格地图

本文假设其环境地图信息都是在考虑无人机的尺寸的

情况下建立的,因此在进行规划路径时,可以将无人机当成栅格地图中的质点,且只能在栅格范围内进行飞行移动。规划算法在搜索过程中只能在周围 8 个相邻方向进行搜索,如图 2 所示,并且其周围环境保持不变。

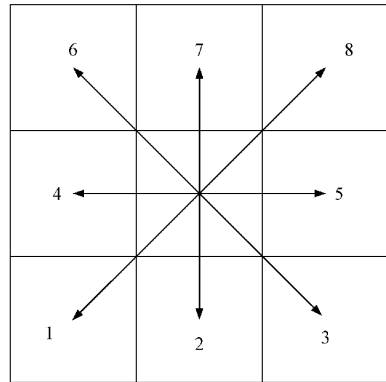


图 2 栅格搜索方向图

### 1.2 A\* 算法

A\* 算法作为最经典的路径规划搜索算法,在障碍物信息已知的环境中进行简单直接的全局搜索<sup>[18]</sup>。该算法结合了 Dijkstra 算法<sup>[19]</sup>和广度优先搜索算法的优势特点,能够实现保证搜索效率的同时能够搜索到最短路径。A\* 算法的核心为评价函数。其评价函数综合考虑两个代价值,其中一个代价值为起点到当前点的真实距离代价,另一个代价值为当前点到目标的估计距离代价。算法根据其评价函数不断引导其向目标点方向进行搜索。

A\* 算法的评价函数的一般形式如下:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中:  $f(n)$  为当前节点  $n$  的总路径代价,  $g(n)$  为起点到当前节点  $n$  的真实距离代价,  $h(n)$  为从当前节点到终点的估计距离代价。其中启发函数  $h(n)$  在总路径代价函数中起着关键性的作用,影响 A\* 算法的整个规划的路径长度和搜索路径的效率,因此选择合适的  $h(n)$  可以在得到最优路径的同时保证其搜索路径的效率。在路径规划应用中, A\* 有 3 个常见的启发式函数:曼哈顿距离,对角线距离,欧几里得距离,分别表示为:

$$h(n) = abs(n_x - g_x) + abs(n_y - g_y) \quad (2)$$

$$h(n) = \max(abs(n_x - g_x), abs(n_y - g_y)) \quad (3)$$

$$h(n) = \sqrt{(n_x - g_x)^2 + (n_y - g_y)^2} \quad (4)$$

其中,  $(n_x, n_y)$ 、 $(g_x, g_y)$  分别表示当前节点  $n$  和终点的坐标。

A\* 算法与 Dijkstra 算法一样,在搜索计算过程中也存在两个列表。Close 列表定义为记录已被计算过的节点, Open 列表定义为用来保存所有已访问而未计算的节点。A\* 算法的搜索过程可以简单概括为:从起点开始扩展访问节点,将已访问但未计算搜索的节点存入 Open 列表,将已被计算搜索的节点存入 Close 列表,然后选择 Open 列表中总路径代价最小的节点作为下一个搜索节点,直到搜索到

目标点,最后从目标点向起始点回溯节点得到相应的最终路径。其流程如图 3 所示。

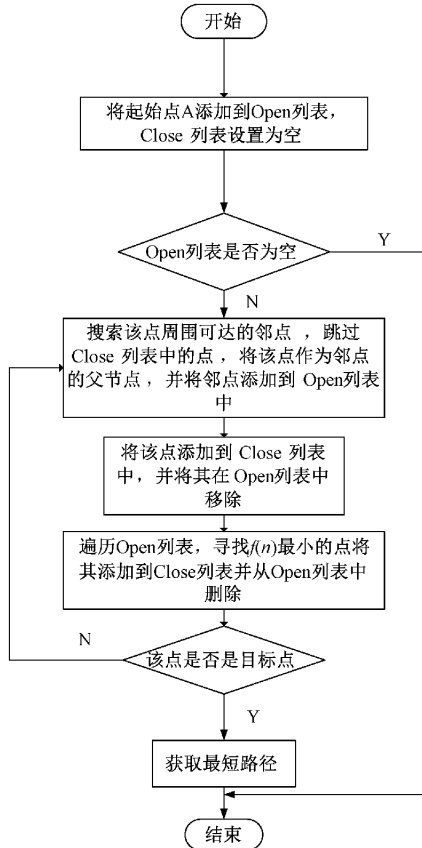


图 3 A\* 算法流程

## 2 改进 A\* 算法

传统 A\* 算法为从起点开始搜索终点的单向搜索,需遍历的栅格节点较多,计算效率较低。本文提出的改进 A\* 算法基于双向搜索机制,通过判断起点与终点的相对位置进行定象限的双向搜索,以减少搜索过程中冗余栅格节点并提高搜索效率。

### 2.1 双向搜索

与传统 A\* 单向搜索不同,本文中的双向搜索分别将起点 A 作为正向搜索的起点,终点 B 作为正向搜索的终点,并设置正向搜索的 Open1 列表、Close1 列表、代价函数;将终点 B 作为反向搜索的起点,起点作为反向搜索的终点,并设置反向搜索的 Open2 列表、Close2 列表、代价函数。然后算法将在正反方向同时搜索,将其相应遍历的栅格节点分别存入 Open1 列表、Close1 列表和 Open2 列表、Close2 列表中,当正反搜索中的 Open1 列表与 Open2 列表中有相同的节点时结束搜索算法,以提高搜索效率。其流程如图 4 所示。

### 2.2 定向搜索

传统 A\* 算法在搜索扩展节点时在节点周围的 8 个邻

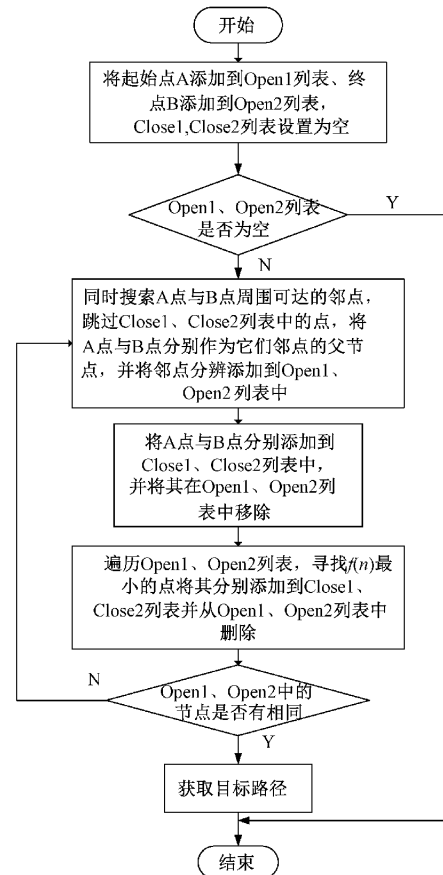


图 4 双向 A\* 算法流程

节点方法进行扩展,会导致其扩展的节点产生冗余。而提出的定向搜索 A\* 算法通过判断目标所在方向,然后定向搜索扩展该方向的邻节点。其中判断目标所在方向以起点作为坐标原点建立直角坐标系,然后通过式(5)和(6)计算判断终点位于起点坐标的象限。

$$\begin{cases} dx = goal_x - start_x \\ dy = goal_y - start_y \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} dx \geq 0, dy \geq 0 \rightarrow \text{第一象限} \\ dx \leq 0, dy \geq 0 \rightarrow \text{第二象限} \\ dx \leq 0, dy \leq 0 \rightarrow \text{第三象限} \\ dx \geq 0, dy \leq 0 \rightarrow \text{第四象限} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $(start_x, start_y)$  为起点的坐标,  $(goal_x, goal_y)$  为目标点坐标。dx, dy 分别由目标点在 x 和 y 坐标方向与起点做差得到,以用来确定其目标点象限和需扩展的邻节点,以减少其在搜索过程中遍历节点个数。

如图 5 所示的象限分布图,当目标点位于起点的第一或第四象限时,节点搜索扩展方向为第一、四象限,扩展邻节点为 {2, 3, 5, 7, 8}; 当目标点位于起点的第二或第三象限时,节点搜索扩展方向为第二、三象限,扩展邻节点为 {1, 2, 4, 6, 7}。

### 2.3 双向定向搜索

基于双向搜索机制的改进 A\* 算法虽然通过能够提高

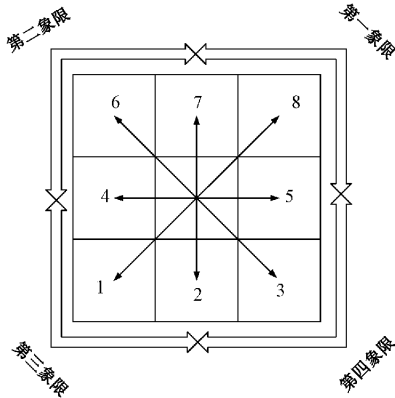


图 5 象限分布图

A\* 算法搜索路径的效率,但是其搜索过程仍然遍历许多冗余栅格。针对基于双向搜索机制改进 A\* 算法存在的不足,提出双定向搜索改进 A\*,以达到提高搜索效率的同时减少遍历栅格的数量,使其冗余栅格更少。

双定向搜索结合了双向搜索机制与定向搜索机制,其分别将起点与目标点作为正反向搜索的起点,通过计算判断目标点位于起点的哪个象限,然后根据目标的象限判断起点位于目标点的象限,最后根据象限进行正反向同时定向搜索路径。其中,在正向搜索计算判断目标点位于的象限过程中,是以起点为原点建立直角坐标系进行计算判断,而反向搜索过程中,无需再一次以目标点为原点建立直角坐标系进行计算判断。只需根据目标点位于起点的象限,判断起点位于目标点象限,如目标点位于起点的第二象限,那么对应的起点位于目标的第四象限;如目标点位于起点的第三象限,那么起点位于目标点的第一象限;目标点位于起点的第四象限,则起点位于目标点的第二象限。

双定向搜索使得传统 A\* 算法在进行路径规划时能够正反向搜索的同时减少扩展邻节点数,从而解决传统 A\* 算法在进行路径规划中存在的遍历冗余节点栅格问题,降低寻路时间,提高算法效率。

2.4 路径平滑策略

针对算法在规划生成路径时,路径存在大量转折点,导致路径转折较多问题,本文提出一种路径平滑策略。当通过定双向搜索算法确定初始路径点后,该平滑策略首先通过式(7)和式(8)计算筛选出初始路径点中的转折点,其中当路径点不满足式(7)和式(8)时则该点为转折点,然后通过直连策略进行再次筛选转折点,最后确认筛选过后的路径点和路径。

$$cur_x - par_x == nbr_x - cur_x \quad (7)$$

$$cur_y - par_y == nbr_y - cur_y \quad (8)$$

式中:  $(cur_x, cur_y)$  为当前路径点坐标,  $(par_x, par_y)$  为当前路径点的前一个路径点坐标,  $(nbr_x, nbr_y)$  为当前路径点的下一个路径点坐标。

该直连策略为将起点依次与其他转折点相连,直至终点。当直连路径中没有障碍物,则该路径为可通行路径,其最终的路径点为起点与终点,路径为起点与终点的直连路径。当直连路径中有障碍物时,则保留该拐点以及起点和该拐点前一个拐点,然后将该转折点作为直连策略的新的起点,继续进行直连计算,直至终点,最终确认路径点与路径。

3 实验结果及分析

为了验证本文提出改进 A\* 算法的可行性和有效性,采用 MatlabR2021a 仿真平台,Windows10 操作系统,处理器为 AMD-Ryzen-7-5800H,主频 3.20 GHz,运行内存为 16 GB 的硬件平台。对传统 A\* 算法、改进 A\* 算法进行路径规划实验。实验在 2 组不同障碍物分布的 40×40 栅格地图下分别进行,如图 6、7 所示。

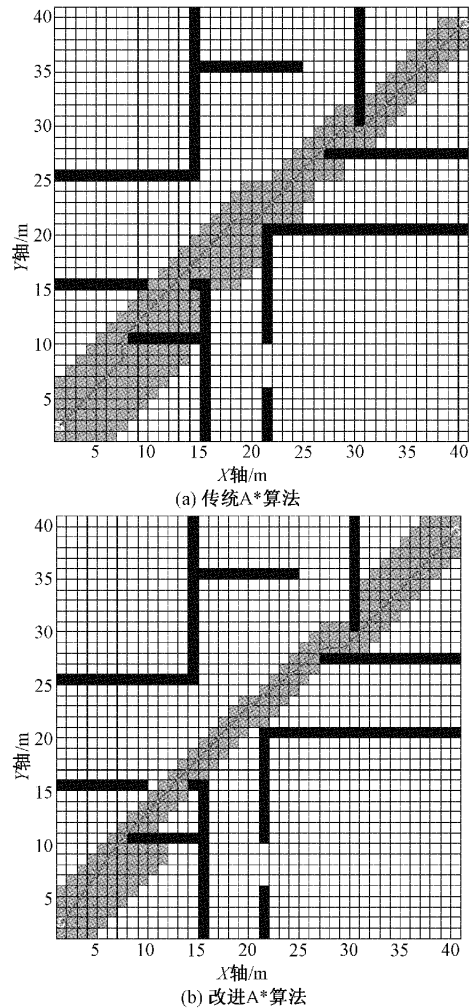
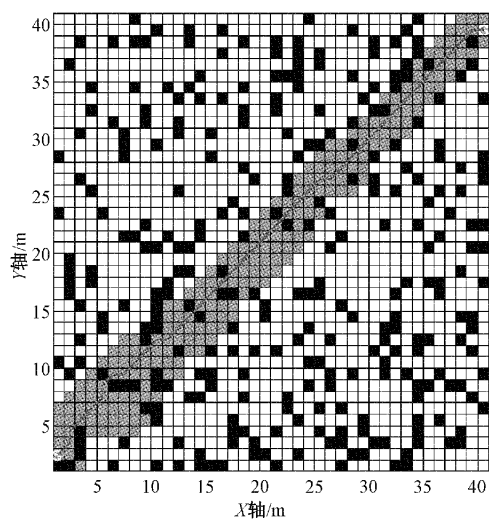


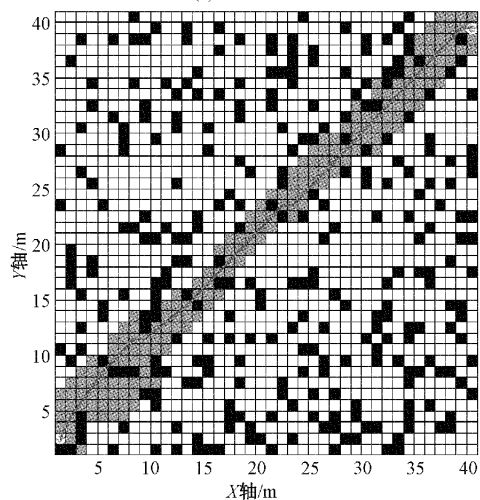
图 6 集中障碍物环境下传统 A\* 算法和改进 A\* 算法路径搜索对比

3.1 集中障碍物环境

图 6 为传统 A\* 算法和改进 A\* 算法在相同的 40×40



(a) 传统A\*算法



(b) 改进A\*算法

图7 随机障碍物环境下传统A\*算法和改进A\*算法路径搜索对比

的集中障碍物环境规划过程对比图,图中灰色部分代表的是路径规划过程中遍历的栅格,蓝色线条是规划的路径。起点和终点都是一样的分别为  $S(1,2)$ ,  $G(40,39)$ 。图6(a)中的灰色栅格个数为241,规划时间1.2330s,最优路径长度为55.4975,路径点个数为40,转折点个数为6。图6(b)中的灰色栅格个数为210,规划时间0.4282s,最优路径长度为54.5269,路径点个数为4,转折点个数为2。通过数据可以很清晰看出通过双向搜索方法改进的A\*算法在保证最短路径的前提下,遍历栅格个数和规划时间有明显减少,同时在平滑策略的优化下,路径点个数和转折点个数有一定的减少。并且从图6中可以看出改进的A\*算法由于平滑策略,将中间没有障碍物的转折点直连,使路径中的转折减少,从而使得路径变得平滑。

表1为改进A\*算法和传统A\*算法在相同的40×40集中障碍物环境下相同的起点(1,2)和终点(40,39)的实验数据对比情况。改进A\*算法相比传统A\*算法,在路径长

度上减少约1.74%,路径点数量上减少约90.00%,转折点数量上减少约66.67%,遍历栅格数量上减少约23.07%,规划时间上减少约64.16%。实验数据表明,改进A\*算法相较于传统A\*算法在规则的集中式障碍物环境中规划效率有明显的提高,并且有效的减少路径转折,验证了改进A\*算法的有效性。

表1 集中障碍物环境下的实验数据

| 算法     | 路径长度/<br>m | 路径点数量 | 转折点数量 | 遍历栅格数 | 规划时间/<br>s |
|--------|------------|-------|-------|-------|------------|
| 传统A*算法 | 55.4975    | 40    | 6     | 241   | 1.2330     |
| 改进A*算法 | 54.5269    | 4     | 2     | 210   | 0.4282     |

### 3.2 随机障碍物环境

图7为传统A\*算法和改进A\*算法在相同的40×40的随机障碍物环境规划过程对比图,图中灰色部分代表的是路径规划过程中遍历的栅格,蓝色线条是规划的路径。起点和终点都是一样的分别为  $S(1,2)$ ,  $G(40,39)$ 。图7(a)中的灰色栅格个数为216,规划时间0.9715s,最优路径长度为55.4975,路径点个数为42,转折点个数为11。图6(b)中的灰色栅格个数为186,规划时间0.3976s,最优路径长度为54.8340,路径点个数为10,转折点个数为8。通过数据可以很清晰看出通过双向搜索方法改进的A\*算法在保证最短路径的前提下,遍历栅格个数和规划时间有明显减少,同时在平滑策略的优化下,路径点个数和转折点个数有一定的减少。

表2为改进A\*算法和传统A\*算法在相同的40×40随机障碍物环境下相同的起点(1,2)和终点(40,39)的实验数据对比情况。改进A\*算法相比传统A\*算法,在路径长度上减少约1.19%,路径点数量上减少约76.19%,转折点数量上减少约27.27%,遍历栅格数量上减少约13.88%,规划时间上减少约59.07%。实验数据表明,改进A\*算法相较于传统A\*算法在无规则随机分布障碍物环境中的规划效率同样也有明显的提高,并且有效的减少路径转折,提高了路径的平滑性。同样也说明了改进A\*算法在简单和复杂的环境中都能有效的提高路径规划效率,减少路径点和转折点并产生平滑路径,因此验证了改进A\*算法的可行性和普适性。

表2 随机障碍物环境下的实验数据

| 算法     | 路径长度/<br>m | 路径点数量 | 转折点数量 | 遍历栅格数 | 规划时间/<br>s |
|--------|------------|-------|-------|-------|------------|
| 传统A*算法 | 55.4975    | 42    | 11    | 216   | 0.9715     |
| 改进A*算法 | 54.8340    | 10    | 8     | 186   | 0.3976     |

## 4 结 论

本文提出改进 A\* 算法, 基于双定向搜索路径并平滑策略将初始路径进行平滑处理, 使得路径减少了转折点, 且使其路径的方向不限于相邻的 8 个方向, 同时减少了大量的冗余路径点, 并缩短了路径长度。在提高搜索规划效率方面, 从搜索方向出发, 增强搜索的方向性, 减少搜索范围, 从而减少搜索过程中遍历的栅格数, 提高效率。本文研究的无人机路径规划算法是以静态或障碍物已知为基础的路径规划问题, 接下来将重点研究以未知的动态障碍物环境为基础的路径规划问题。

### 参考文献

- [1] ZHOU X, WANG Z, YE H, et al. Ego-planner: An esdf-free gradient-based local planner for quadrotors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 6(2): 478-485.
- [2] 王中玉, 曾国辉, 黄勃. 基于改进双向 A\* 的机器人路径规划算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11): 141-143, 147.
- [3] 姜媛媛, 张阳阳. 改进 8 邻域节点搜索策略 A\* 算法的路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 234-241.
- [4] 赵丽华, 万晓冬. 基于改进 A 算法的多无人机协同路径规划[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 72-75, 166.
- [5] 杨博, 刘树东, 鲁维佳, 等. 改进遗传算法在机器人路径规划中的应用[J]. 现代制造工程, 2022(6): 9-16.
- [6] 吴振, 吴红兰. 基于改进遗传算法的无人机航路规划[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 52-58.
- [7] 刘加奇, 王泰华, 董征. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(5): 140-143.
- [8] 李志锟, 黄宜庆, 徐玉琼. 改进变步长蚁群算法的机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 15-21.
- [9] 侯宇翔, 高焕兵, 汪子健, 等. 改进 RRT 的机器人路径规划算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16): 47-52.
- [10] 陈侠, 刘奎武, 毛海亮. 基于 APF-RRT 算法的无人机航迹规划[J]. 电光与控制, 2022, 29(5): 17-22.
- [11] 孔继利, 张鹏坤, 刘晓平. 双向搜索机制的改进 A\* 算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(8): 231-237.
- [12] 祁玄玄, 黄家骏, 曹建安. 基于改进 A\* 算法的无人车路径规划[J]. 计算机应用, 2020, 40(7): 2021-2027.
- [13] 王维, 裴东, 冯章. 改进 A\* 算法的机器人最短路径规划[J]. 计算机应用, 2018, 38(5): 1523-1526.
- [14] 吴鹏, 桑成军, 陆忠华, 等. 基于改进 A\* 算法的机器人路径规划研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(21): 227-233.
- [15] 高民东, 张雅妮, 朱凌云. 应用于机器人路径规划的双向时域 A\* 算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(3): 792-795, 800.
- [16] 姜月秋, 李紫嫣, 关启学, 等. 基于改进 A\* 算法的无人机路径规划研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 160-164.
- [17] 张建光, 张方, 陈良港, 等. 基于改进 A\* 算法的自动引导车的路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(1): 123-128.
- [18] 孙淑光, 孙涛. 基于融合 A\* 算法的无人机路径规划研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 82-91.
- [19] 郑弈, 谢亚琴. 基于 Dijkstra 算法改进的飞行器航迹快速规划算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(12): 73-79.

### 作者简介

唐嘉宁, 博士, 研究员, 主要研究方向为协同制导与控制技术, 多无人机协同与探索技术等。

E-mail: tjn1216@163.com

彭志祥, 硕士, 主要研究方向为无人机路径规划。

E-mail: 915110904@qq.com