

基于改进 A* 算法的无人救援艇路径规划^{*}

王 敏^{1,2} 黎永顺¹ 石明航¹ 田子康¹ 郭晓峰¹

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2. 安徽建筑大学电子与信息工程学院 合肥 230601)

摘要: 针对传统 A* 算法在无人救援艇路径规划中存在节点数量过多、计算效率低、搜索时间长及路径不够平滑等问题,提出了一种改进的 A* 路径规划算法。通过加权优化启发式函数,并改进邻域搜索策略,在保证路径最优的同时有效减少搜索节点和搜索时间;利用贝塞尔曲线对路径进行光滑处理,优化路径的平滑性和稳定性,减少救援艇运动时的震荡,提高了运动效率和安全性。实验结果表明,在多种设计的地图环境中,相较于传统 A* 算法,改进后的 A* 算法在搜索节点数量上分别减少了约 34.3%、56.9% 和 66.8%,在搜索时间上分别缩短了 47.5%、68.9% 和 79.3%。这一优化大幅提升了路径规划的效率与搜索速度,使其在复杂环境下更适用于无人救援艇的路径规划任务。

关键词: A* 算法;路径规划;加权调整;优化邻域搜索;贝塞尔曲线

中图分类号: TN101 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.1044

Path planning for unmanned rescue boats based on improved A* algorithm

Wang Min^{1,2} Li Yongshun¹ Shi Minghang¹ Tian Zikang¹ Guo Xiaofeng¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the problems of the traditional a* algorithm in the path planning of unmanned rescue vehicle, such as too many nodes, low computational efficiency, long search time and unsMOOTH path, an improved a* path planning algorithm is proposed. The weighted heuristic function is optimized and the neighborhood search strategy is improved to effectively reduce the search nodes and search time while ensuring the optimal path; Bessel curve is used to smooth the path, optimize the smoothness and stability of the path, reduce the vibration of the rescue boat, and improve the efficiency and safety of the movement. Experimental results show that compared with the traditional a* algorithm, the improved a* algorithm reduces the number of search nodes by about 34.3%, 56.9% and 66.8%, and shortens the search time by 47.5%, 68.9% and 79.3%, respectively. This optimization greatly improves the efficiency and search speed of path planning, making it more suitable for the path planning task of unmanned rescue vehicles in complex environments.

Keywords: A* algorithm; route planning; weighted adjustment; optimize neighborhood search; Bezier curve

0 引言

无人救援艇的路径规划是确保救援艇能够在复杂、动态的灾难环境中有效执行任务的关键技术之一^[1-3],它涉及到的是从起始位置到达目标点设计一条最优路径,确保救援艇能够代替人类在复杂环境中以高效、安全和可靠的方式完成任务。

无人救援艇能够在危险环境中执行生命搜寻、障碍物识别、灾后评估、物资运输等任务,帮助救援人员减少暴露

于危险中的时间和风险。就目前而已,常见的用于无人救援艇路径规划的算法有 A* 算法^[4-6]、Dijkstra 算法^[7]、RRT (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法^[8-13]、D*^[14-16] 和蚁群算法^[17-18]。其中 A* 算法广泛应用于路径搜索问题,它结合了启发式函数和路径代价,通过评估每个节点的代价来寻找最短路径,适用于静态环境,但计算量较大。随着障碍物数量的增加或环境的不确定性增大,传统 A* 算法的搜索过程可能会变得非常繁琐,导致算法需要处理大量的节点和路径,从而导致路径规划的时间显著增加。这种高

计算成本不仅影响实时性,还可能导致搜索过程中的冗余计算,浪费大量资源。余震等^[19]采用三邻域与八邻域混合搜索策略对传统 A* 算法的搜索策略进行改进,有效缩短搜索时间、减少路径拐点数量并缩短路径长度。但是这种方法可能导致路径不够平滑,转角过于尖锐,影响救援艇的运动稳定性。此外,混合搜索策略仍然可能面临局部最优问题,无法保证全局最优解。唐嘉宁等^[20]通过采用双向定向搜索提升了搜索效率,同时使用路径平滑策略减少了路径冗余。然而,启发函数仍有进一步优化的空间。王其等^[21]采用对角线距离作为启发函数并进行指数加权,通过双向搜索策略进行搜索优化,在搜索扩展节点数,搜索路径时间得到显著的提升,但仍有可改进的空间。

本文提出了一种改进 A* 算法的路径规划新算法。该算法在传统 A* 算法的基础上,通过优化启发函数的权重,并将原有的八邻域搜索改为五邻域搜索,有效减少了搜索节点数量和计算时间。接着,采用贝塞尔曲线对生成的路径进行拟合,从而获得更加平滑的路径。最后,通过实验验证了改进 A* 算法在路径规划中的可靠性。

1 传统 A* 算法

1.1 栅格化地图建模

栅格化地图是路径规划中常用的环境表示方法,通过将环境划分为均匀的栅格单元,将复杂问题转化为简单的二维网格结构。每个栅格的状态(如障碍物、可通行区域等)明确标定,使得救援艇能够根据这些信息快速做出决策。栅格化地图的主要优势在于其计算简便,路径规划算法(如 A*、Dijkstra 等)能在栅格地图上快速搜索到最优路径,因每个栅格的状态已知,且能利用邻接关系进行高效更新。栅格化地图不仅清晰表示障碍物和空闲空间,还能适应动态环境的变化,实时更新障碍物信息,确保路径规划反映环境变化。目前,环境地图建模方法主要包括栅格法^[22]、可视化地图法^[23]和拓扑地图法^[24]等。在 A* 算法地图构建中一般采用栅格法。其简单易实现、高效计算和强适应性的特点能够适应静态和动态环境,实时更新障碍物信息,确保救援艇能够在不断变化的环境中找到安全路径。栅格的大小和精度也可以根据需求灵活调整,提供精细的环境表示或提高计算效率,从而在不同应用场景中达到较好的平衡。

1.2 传统 A* 算法的基本原理

A* 算法(A-star algorithm)是一种广泛应用于路径规划和图形搜索问题的启发式搜索算法。它结合了 Dijkstra 算法的最短路径搜索和贪心算法的启发式搜索策略,能够高效地找到从起点到目标点的最优路径。A* 算法的核心思想是通过计算每个节点的总代价来引导搜索过程,以确保选择代价最小的路径。

A* 算法中的估价函数用于评估从当前节点到目标节点的代价,起到引导搜索过程的作用。它通过计算每个节

点的总代价:

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

式中: $g(n)$ 为从节点 n 到起始节点的实际代价, $h(n)$ 为从当前节点 n 到目标节点 g 的估计代价, 通常采用欧几里得距离或曼哈顿距离等常见的启发式函数。

2 A* 算法的改进方案

2.1 改进启发函数

在传统 A* 算法中,启发函数(通常表示为 $h(n)$)对每个节点的“剩余代价”进行估算,指导搜索过程朝着最有可能的目标前进。具体而言,启发函数的作用是预测从当前节点到目标节点的最短路径距离,从而使得 A* 算法能够优先扩展那些可能更接近目标的节点,减少不必要的探索和计算。本文中的对 $h(n)$ 采用欧几里得距离:

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

式中: x_g 和 x_n 分别为目标节点、当前节点的横坐标。 y_g 和 y_n 分别为目标节点、当前节点的纵坐标。

为提升 A* 算法的搜索效率,本文对启发函数进行了加权处理,引入了一个权重因子 ω ,A* 算法中的估价函数变成了 $f(n) = g(n) + \omega \cdot h(n)$, 根据 A* 算法的特性,启发函数的权重会根据搜索的阶段和与目标的距离进行动态调整。在距离目标较远时,增大启发函数的权重,能够有效引导搜索方向,加速寻找目标区域;而在接近目标时,减小启发函数的权重,确保搜索更专注于优化路径,避免过早地偏向某一方向而错过最优解。通过在速度和精度之间找到合理的平衡,算法能够在缩短搜索时间的同时,保持路径的最优性。在算法的前期阶段,适当增加权重系数,使得搜索过程更加快速地向目标节点逼近;而在后期,适当降低权重系数 ω ,以确保最终能找到最优路径。通过这样的优化,算法在提高搜索效率的同时,兼顾了路径的准确性与精确度。

文献[25]提出了一种基于当前节点到目标节点代价和起始节点到目标节点代价的动态权重系数设计方法。

$$\omega = 1 + \frac{r}{R} \quad (3)$$

式中: r 为当前节点到目标节点的代价, R 为起始节点到目标节点的代价。在传统 A* 算法的基础上引入该动态权重系数,可以在保证路径精确度的同时,实现路径准确性与计算效率的平衡。本文在文献[25]的启发下,提出了一种新的权重系数:

$$\omega = 1 + \log(1 + \frac{a \cdot i}{j + a}) \quad (4)$$

式中: i 表示当前节点到目标节点的距离, j 表示起始节点到目标节点的距离。 ω 为本文提出一种新的动态权重系数, a 为权重影响因子。通过调节影响因子 a ,可以灵活控制算法初期的搜索速度,从而有效提升算法的运行效率。

为了验证本文提出的权重系数的有效性,分别与传统

A*、文献[21]以及文献[25]中提出的权重系数进行了对比实验。从图 1 可以看出,当权重影响因子设置为 8 时,本文提出的权重系数表现最佳。为确保测试结果的可靠性,本文选择了一个 70 m×70 m 的地图作为测试环境,并进行了 15 次仿真实验,以 15 次实验结果的平均值作为最终测试结果,从而尽可能的减少误差。测试结果如图 1 所示,具体的测试数据记录如表 1 所示。

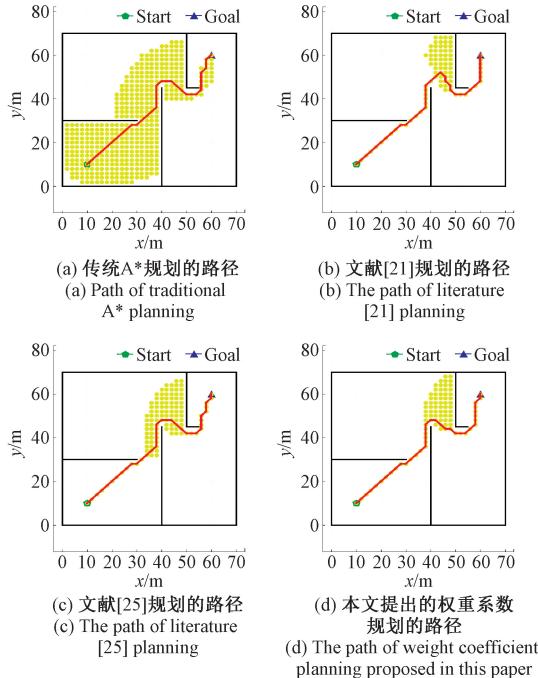


图 1 不同权重系数得到的结果对比

Fig. 1 Comparison of results obtained by different weight

表 1 不同启发函数的仿真实验结果对比

Table 1 Comparison of simulation results of different heuristic functions

方法	搜索时间/s	搜索路径长度/m	搜索节点个数
传统 A* 算法	2.519 00	88.568 5	533
文献[21]权重系数法	0.511 34	92.225 4	196
文献[25]权重系数法	0.740 30	88.568 5	223
本文权重系数法	0.580 08	88.568 5	197
本文提出的启发函数	76.9%	—	63.0%
较传统的 A* 效率提升			

从表 1 中可以看出,在传统 A* 算法中引入文献[25]提出的动态权重系数后,路径规划搜索时间比传统 A* 算法减少了约 70.6% 的同时搜索节点的数量还减少了约 58.1%。在传统 A* 算法引入本文提出的动态权重系数后,路径规划搜索时间比传统 A* 算法减少了约 76.9% 的同时搜索节点的数量还减少了约 63.0%。与文献[25]中提出的动态权重系数相比,本文方法在搜索时间和节点数

量方面也表现出了一定程度的优化。在传统 A* 算法中引入文献[21]提出的动态权重系数后,路径规划搜索时间比传统 A* 算法减少了约 79.7% 的同时搜索节点的数量还减少了约 63.2%,以增加路径长度为代价实现了搜索时间和搜索节点的减少,虽然相较于本文搜索时间和搜索节点有所降低,但导致路径长度产生较大冗余。因此,本文提出的新的权重系数显著不仅可以提高算法的运行效率,还能显著缩短搜索时间并减少搜索节点的数量。

2.2 优化邻域搜索

传统的 A* 算法采用八邻域搜索法进行路径的搜索,具体是以当前节点为父节点,向周围的 8 个方向进行搜索,找到目标节点的方向,当父节点的周围未出现障碍物时候,会朝着周围的上、下、左、右、左上、右上、左下和右下 8 个方向同时展开搜索,找到合适的方向即作为无人救援艇的移动路径。其搜索方向如图 2 所示。

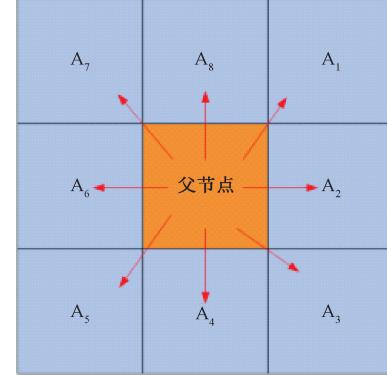


图 2 传统 A* 的八向搜索

Fig. 2 Eight way search of traditional A*

八邻域搜索法在路径规划中提供了较高的灵活性和精确度,尤其适用于复杂环境中,能够减少迭代次数并更精确地逼近目标。然而,它也带来较高的计算量和冗余节点,尤其在障碍物较多时,搜索效率较低。为解决这一问题,学者们提出了如双向定向搜索^[20]、三邻域与八邻域混合搜索^[19]等优化方法,既提高了搜索效率,又减少了路径冗余。受到这些启发,本文将传统 A* 算法中的八邻域搜索优化为五邻域搜索,有效减少路径冗余并降低计算代价。

五邻域搜索是一种简化的路径搜索方法,它在路径规划中通过限制搜索方向来减少计算量,同时保持足够的灵活性和路径优化能力。五邻域搜索的原理是依据当前节点与目标点之间的夹角将传统 A* 中的八邻域搜索优化为五邻域搜索,减少搜索节点数量,提升算法运行效率。具体的搜索流程如下:

步骤 1) 将当前节点当作中心点,建立二维坐标,令当前节点与目标节点之间的夹角(以 x 轴正方向)为 θ 。

步骤 2) 根据夹角 θ ,保留搜索方向,夹角 θ 与搜索方向的对应关系如表 2 所示。

表 2 五向搜索规则表
Table 2 Five way search rules

夹角 θ	保留的 5 个方向	舍弃的 3 个方向
$[0^\circ, 18.434^\circ) \cup [341.565^\circ, 360^\circ)$	A_1, A_2, A_3, A_7, A_8	A_4, A_5, A_6
$[18.434^\circ, 71.565^\circ)$	A_1, A_2, A_6, A_7, A_8	A_3, A_4, A_5
$[71.565^\circ, 108.434^\circ)$	A_1, A_5, A_6, A_7, A_8	A_2, A_3, A_4
$[108.434^\circ, 161.565^\circ)$	A_4, A_5, A_6, A_7, A_8	A_1, A_2, A_3
$[161.565^\circ, 198.434^\circ)$	A_3, A_4, A_5, A_6, A_7	A_1, A_2, A_8
$[198.434^\circ, 251.565^\circ)$	A_2, A_3, A_4, A_5, A_6	A_1, A_7, A_8
$[251.565^\circ, 288.434^\circ)$	A_1, A_2, A_3, A_4, A_5	A_6, A_7, A_8
$[288.434^\circ, 341.565^\circ)$	A_1, A_2, A_3, A_4, A_8	A_5, A_6, A_7

本文在上述提出的改进的 A* 算法中采用五邻域搜索进行救援艇路径搜索,并与传统 A* 八邻域路径搜索进行测试实验。选取地图大小为 70 m × 70 m,作为实验测试对象。对本文提出的改进 A* 五邻域搜索与传统 A* 算法八邻域搜索进行 15 次仿真实验,并以 15 次实验结果的平均值作为最终测试结果,为了验证本文提出的五邻域搜索,相较于八邻域搜索具有一定的优越性。具体的测试数据如表 3 所示。

表 3 八邻域和五邻域的仿真实验结果对比表

Table 3 Comparison of simulation results of eight neighborhood and five neighborhood

搜索方法	搜索 时间/s	搜索路径 长度/m	搜索节点 个数
传统 A* 算法八邻域搜索	2.519 0	88.568 5	533
本文改进 A* 五邻域搜索	1.876 8	88.568 5	413
本文较八邻域搜索的提升	25.5%	—	22.5%

从表 3 中的数据可以看出,采用本文提出的改进 A* 五邻域搜索相比于传统 A* 算法中的八邻域搜索,在搜索时间上减少约 25.5%,而在搜索节点数上减少了约 22.5%。这一结果表明,通过在传统 A 算法中引入以当前节点与目标节点夹角为判断准则的五邻域搜索方式,能够有效减少不必要的搜索方向,从而显著提高算法的运行效率。

2.3 贝塞尔曲线平滑路径

在本文设计的栅格化地图中,使用 A* 算法进行路径规划时,生成的路径常出现过多转弯和折线,导致路径不够平滑,无法有效模拟无人救援艇的实际行进轨迹。尽管这种路径确保了从起点到目标点的可行性,但过多转折增加了路径长度,并可能导致救援艇运动中的速度波动和不稳定,从而降低整体效率。因此,A* 算法生成的路径并非最优,需进一步优化以提升无人救援艇的运动性能和效率。本文采用贝塞尔曲线^[21]对 A* 算法生成的路径进行优化,

以获得更符合无人救援艇实际行驶轨迹的平滑路径。

贝塞尔曲线是一种广泛用于计算机图形学的数学曲线,常用于描述平滑路径。它由一组控制点定义,曲线的形状由这些控制点的位置决定。贝塞尔曲线有不同的阶数,如一次、二次、三次等。一次贝塞尔曲线由 2 个控制点确定,表示直线;二次贝塞尔曲线由 3 个控制点确定,表示平滑的二次曲线;三次贝塞尔曲线由 4 个控制点定义,常用于描述更复杂的路径。贝塞尔曲线是由一组控制点和相应的贝塞尔基函数来定义的。一般 n 次贝塞尔曲线的表达式为:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n C_n^i t^i (1-t)^{n-i} \cdot P_i \quad (5)$$

式中: C_n^i 是二项式系数,表示从 n 个控制点中选取 i 个的组合数。 n 表示曲线的阶数,控制点数为 $n+1$ 个,分别为 P_0, P_1, \dots, P_n ,这些贝塞尔曲线的参数 t 的取值范围是 $[0, 1]$,曲线从 $P_0 (t=0)$ 平滑过渡到 $P_n (t=1)$ 。

在路径规划中,贝塞尔曲线通过调整控制点来精确拟合路径,确保路径既符合需求,又避开障碍物,优化路径长度。与路径规划算法结合时,贝塞尔曲线可对初步路径进行平滑化,进一步提高路径的可行性和效率。与传统路径规划算法(如 A*)结合时,贝塞尔曲线有效平滑初步路径,提升路径可行性、计算效率并减少冗余搜索。具体结果如图 3 所示。

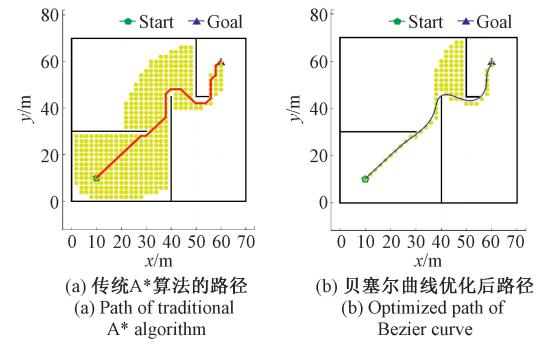


图 3 A* 算法路径平滑的改进对比

Fig. 3 Improved comparison of A* algorithm path smoothing

2.4 本文算法流程的具体改进

本文针对传统 A* 算法进行无人救援艇路径规划中存在的节点数量过多、计算效率低、搜索时间长及路径不够平滑等问题,提出了一种改进的 A* 算法行无人救援艇路径规划方法:首先,对启发函数进行了权重优化,以提高算法的效率和路径质量;其次,将八邻域搜索优化为五邻域搜索,减少了冗余搜索节点;最后,采用贝塞尔曲线对路径进行平滑处理,优化了无人救援艇的移动轨迹,提升了路径的可行性和效率。具体的过程如图 4 所示。

1) 构建实验中所使用的栅格化地图,将环境划分为均匀的网格,每个网格代表一个区域,且标定为可通行区域或障碍物区域。创建两个集合: $openList$ 和 $closedList$ 。

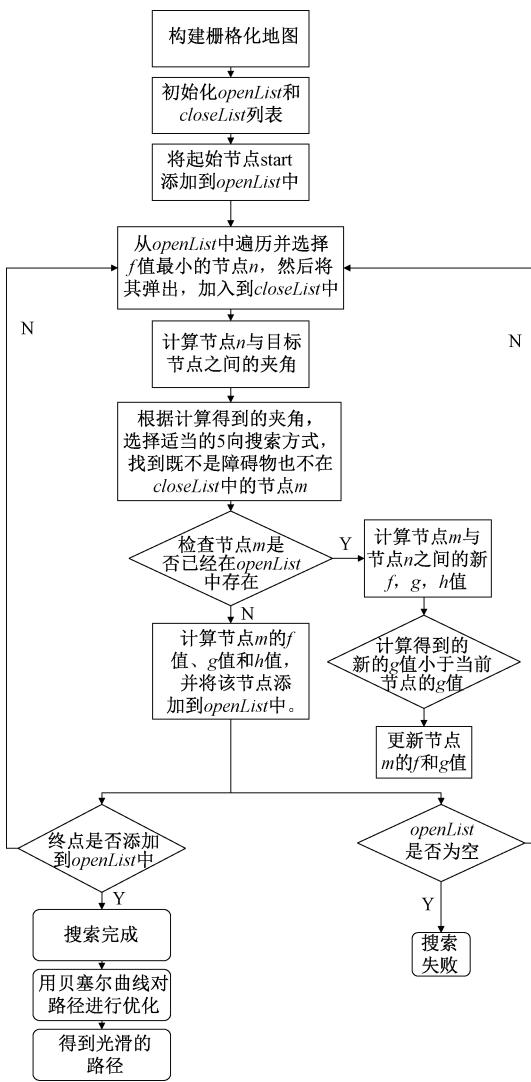


图 4 本文改进 A* 算法的具体流程

Fig. 4 The specific flow chart of the improved A* algorithm in this paper

openList 存储待处理的节点(即已发现但未被扩展的节点);*closedList* 存储已处理过的节点(即已经扩展的节点)。

2) 从 *openList* 中选择 *f* 值最小的节点 *n*(*f* 值由本文提出的优化启发函数计算), 然后将节点 *n* 从 *openList* 中弹出, 并将其加入 *closedList*。计算当前节点 *n* 与目标节点之间的夹角, 并根据该夹角选择合适的五邻域搜索方向, 找到既不为障碍物也不在 *closedList* 中的节点 *m*。

3) 对找到的节点 *m* 进行判断: 若节点 *m* 已经在 *closedList* 中, 则跳过; 若节点 *m* 不在 *openList* 中, 则将其加入 *openList*, 并计算其 *g*、*h* 和 *f* 值; 若节点 *m* 已经在 *openList* 中且新的路径(即更新后的 *g* 值)比原路径更短, 则更新节点 *m* 的 *g* 值和父节点。

4) 如果 *openList* 为空, 则表示未找到可行路径; 如果目标节点被添加到 *closedList* 中, 则表示已找到路径。此

时, 通过回溯每个节点的父节点, 从目标节点开始逐步回溯至起点, 最终得到从起点到目标节点的最优路径。使用贝塞尔曲线对最优路径进行优化, 从而得到更符合无人救援艇实际运动的平滑轨迹。

3 仿真实验分析

实验环境为 Windows11 操作系统, 配置包括 CPU:i7-6800H, 内存: 2×6 GB, 显卡: RTX3060, 开发工具为 Pycharm2023, Python 版本为 3.9。在 3 种不同的栅格化地图上, 分别应用传统 A 算法、文献[21]中改进的 A* 算法、文献[25]中改进的 A* 算法以及本文提出的改进 A* 算法进行无人救援艇路径规划仿真实验。通过比较搜索时间、路径长度和搜索节点个数等性能指标, 分析并得出实验结论。仿真结果如图 5~8 所示。在设计的栅格地图中, 每个栅格大小对应实际地图尺寸为 2 m, 黑色矩形框表示障碍物区域, 白色区域为可通行区域, 绿色圆圈为起始点, 蓝色圆圈为目标点, 黄色圆圈表示搜索过程中扩展的节点, 曲线则为不同路径规划算法得到的最优路径。实验中设计了 3 种不同尺寸的地图: 在 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的地图中, 起点坐标为(2,2), 目标点坐标为(24,24); 在 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的地图中, 起点坐标为(10,10), 目标点坐标为(40,40); 在 $70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ 的地图中, 起点坐标为(10,10), 目标点坐标为(60,60); 在 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 的地图中, 起点坐标为(10,10), 目标点坐标为(80,80)。

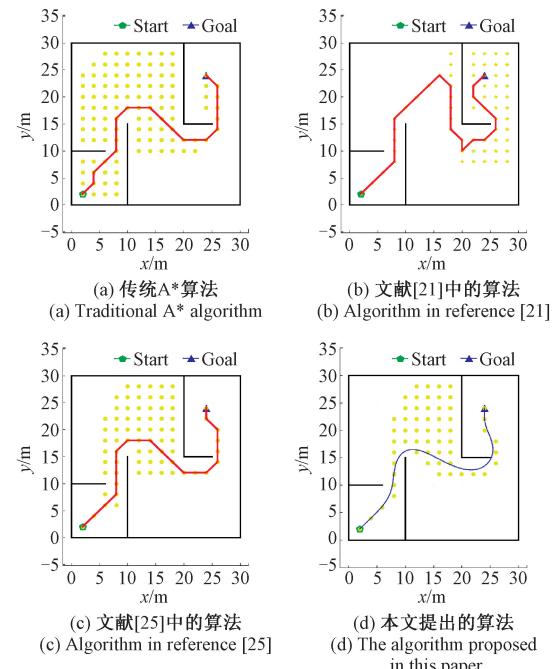
图 5 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 地图中不同 A* 算法生成路径的对比分析

Fig. 5 Comparative analysis of different A* algorithm generation paths in $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ map

从图 5~8 的仿真结果可以看出, 随着地图尺寸的增

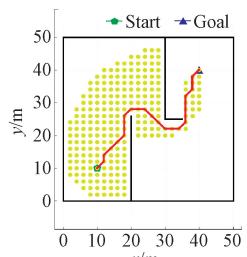
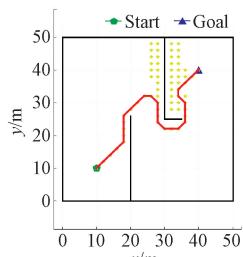
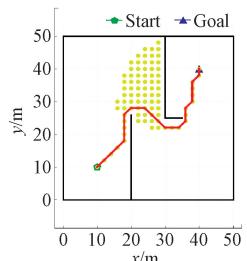
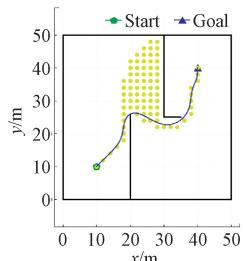
(a) 传统A*算法
(a) Traditional A* algorithm(b) 文献[21]中的算法
(b) Algorithm in reference [21](c) 文献[25]中的算法
(c) Algorithm in reference [25](d) 本文提出的算法
(d) The algorithm proposed in this paper

图 6 50 m×50 m 地图中不同 A* 算法生成路径的对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of different A* algorithm generation paths in 50 m×50 m map

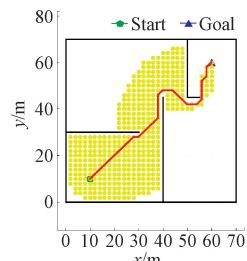
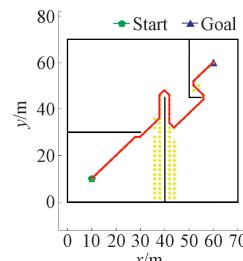
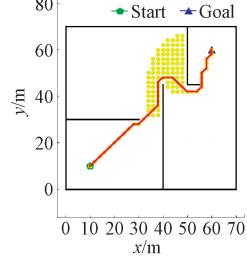
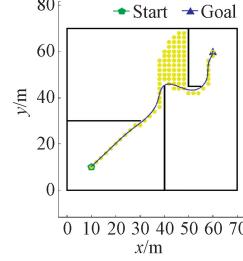
(a) 传统A*算法
(a) Traditional A* algorithm(b) 文献[21]中的算法
(b) Algorithm in reference [21](c) 文献[25]中的算法
(c) Algorithm in reference [25](d) 本文提出的算法
(d) The algorithm proposed in this paper

图 7 70 m×70 m 地图中不同 A* 算法生成路径的对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of different A* algorithm generation paths in 70 m×70 m map

大,本文提出的改进 A 算法与传统 A 算法、文献[25]中的算法相比,显著减少了搜索节点的数量,并提高了搜索效率。同时有效减少了路径的转折点,路径更加平滑。表 4

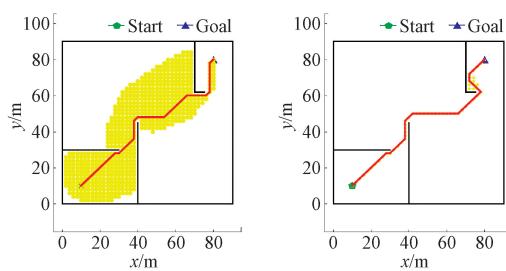
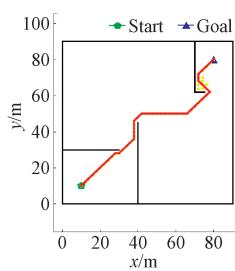
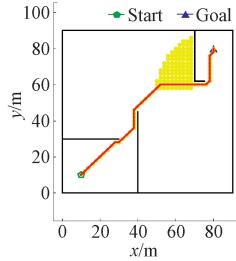
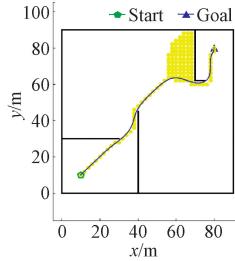
(a) 传统A*算法
(a) Traditional A* algorithm(b) 文献[21]中的算法
(b) Algorithm in reference [21](c) 文献[25]中的算法
(c) Algorithm in reference [25](d) 本文提出的算法
(d) The algorithm proposed in this paper

图 8 90 m×90 m 地图中不同 A* 算法生成路径的对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of different A* algorithm generation paths in 90 m×90 m map

列出了采用不同算法进行路径规划时,在搜索时间、路径长度和搜索节点个数 3 个评价指标上的具体数据(进行 15 次仿真实验,取平均值,减少误差)。

表 4 3 种算法在不同尺寸地图上的性能对比

Table 4 Performance comparison of three algorithms on different size maps

地图	算法名称	搜索时间/s	搜索路径长度/m	搜索节点个数
30 m×30 m	传统 A* 算法	0.477	49.455	8
	文献[21]算法	0.244	63.598	0
	文献[25]算法	0.352	49.455	8
	本文算法	0.250	49.455	8
50 m×50 m	传统 A* 算法	1.279	59.112	7
	文献[21]算法	0.254	67.598	0
	文献[25]算法	0.522	59.112	7
	本文算法	0.397	59.112	7
70 m×70 m	传统 A* 算法	2.535	88.568	5
	文献[21]算法	0.428	107.196	0
	文献[25]算法	0.747	88.568	5
	本文算法	0.524	88.568	5
90 m×90 m	传统 A* 算法	7.803	114.225	4
	文献[21]算法	0.543	119.196	0
	文献[25]算法	1.749	114.225	4
	本文 A* 算法	1.219	114.225	4

从表 4 中可以看出,在 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的地图中,相较于传统 A* 算法,文献[25]算法在搜索时间上减少了 26.3%,搜索节点个数减少了 16.4%;而本文提出的算法在搜索时间上则减少了 47.5%,搜索节点个数减少了 34.3%。在 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的地图中,相较于传统 A* 算法,文献[25]算法在搜索时间上减少了 59.2%,同时搜索节点个数减少了 48.4%;而本文算法在搜索时间上则进一步减少了 68.9%,搜索节点个数减少了 56.9%。在 $70\text{ m} \times 70\text{ m}$ 的地图中,相较于传统 A* 算法,文献[25]算法在搜索时间上减少了 70.5%,搜索节点个数减少了 56.3%;本文算法则在搜索时间上减少了 79.3%,搜索节点个数减少了 66.8%。在 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 的地图中,相较于传统 A* 算法,文献[25]算法在搜索时间上减少了 77.6%,搜索节点个数减少了 63.0%;本文算法则在搜索时间上减少了 84.4%,搜索节点个数减少了 67.5%。从上述实验数据可以看出,本文提出的改进 A 算法在搜索时间和搜索节点个数上相比传统 A 算法均有显著优化,相较于文献[25]的算法也有所提升,且随着地图尺寸的增大,本文算法在优化搜索时间和节点数量上的效果愈加明显。尽管文献[21]中的算法在搜索时间和搜索节点数量方面略优于本文算法,但其路径长度显著增加。综合权衡搜索效率与路径质量,本文算法在整体性能上更具优势。

4 结 论

本文针对传统 A 算法在无人救援艇路径规划中存在的规划时间较长、搜索过程中节点冗余以及路径不光滑等问题,提出了一种通过优化启发式函数的权重、缩减搜索空间以及结合贝塞尔曲线路径平滑处理的改进 A* 算法。通过与传统 A* 算法及文献[25]中方法在不同尺寸的栅格化地图上的仿真实验对比,验证了本文提出的改进算法在搜索时间和搜索节点个数上均有显著提升。同时,结合贝塞尔曲线优化后的路径能够有效减少路径的转折点,使得最终路径更加平滑,符合无人救援艇的实际运动轨迹要求,具有较强的应用潜力,可作为无人救援艇路径规划算法的参考。

参考文献

- [1] 金克帆,王鸿东,易宏,等.海上无人装备关键技术与智能演进展望[J].中国舰船研究,2018,13(6):1-8.
JIN K F, WANG H D, YI H, et al. Key technologies and intelligent evolution of unmanned equipment at sea[J]. China Ship Research, 2018,13(6): 1-8.
- [2] 包涵,杨林初,郁家丞,等.基于改进灰狼算法的无人船路径规划[J].船舶工程,2024,46(10):1-11.
BAO H, YANG L CH, YU J CH, et al. Unmanned ship path planning based on Improved Grey Wolf algorithm[J]. Ship Engineering, 2024,46(10): 1-11.
- [3] 王瑞琛.面向漂浮垃圾的无人船目标感知与路径规划方法[D].南宁:广西大学,2024.
- [4] WANG R CH. Floating garbage oriented target perception and path planning method for unmanned ships[D]. Nanning:Guangxi University, 2024.
- [5] 胡明哲,李旭光,任智颖,等.基于改进启发函数的 A* 算法的无人机三维路径规划[J].兵工学报,2024,45(S1):302-307.
HU M ZH, LI X G, REN ZH Y, et al. UAV 3D path planning based on improved heuristic function A* algorithm[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2024, 45(S1): 302-307.
- [6] 董箭,初宏晟,卢栎樟,等.基于 A 星算法的无人机路径规划优化模型研究[J].海洋测绘,2021,41(3):28-31,51.
DONG J, CHU H SH, LU J ZH, et al. Research on UAV path planning optimization model based on A-star algorithm[J]. Marine Surveying and Mapping, 2021,41(3): 28-31,51.
- [7] 屈宏伟.基站环境下改进 A* 算法的无人机安全路径规划方法[J].电脑与电信,2024(8):45-49.
QU H W. UAV secure path planning method based on improved A* algorithm in base station environment[J]. Computer and Telecommunications, 2024(8):45-49.
- [8] 郭建,杨朋,曾志豪,等.融合改进 Dijkstra 算法和动态窗口法的移动机器人路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2024(3):36-40.
GUO J, YANG P, ZENG ZH H, et al. Path planning of mobile robot based on improved Dijkstra algorithm and dynamic window method[J]. Modular Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2024 (3): 36-40.
- [9] 葛超,张鑫源,王红,等.一种改进 RRT-Connect 算法的路径规划研究[J].电光与控制,2025,32(3):21-26.
GE CH, ZHANG X Y, WANG H, et al. Research on path planning of an improved RRT connect algorithm [J]. Electro Optic and Control, 2025,32(3):21-26.
- [10] 刘奎武.基于改进 RRT 算法的无人机航迹规划方法研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2022.
LIU K W. Research on UAV route planning method based on improved RRT algorithm [D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [11] 梁秀满,刘子良,刘振东.基于深度强化学习的改进 RRT 算法路径规划[J/OL].系统仿真学报,1-12[2024-12-17]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0494>.
LIANG X M, LIU Z L, LIU ZH D, et al. Improved RRT algorithm path planning based on deep reinforcement learning [J/OL]. Journal of System Simulation, 1-12 [2024-12-17] <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0494>.
- [12] 侯宇翔,高焕兵,汪子健,等.改进 RRT 的移动机器人路径规划算法[J].电子测量技术,2022,45(16):47-52.
HOU Y X, GAO H B, WANG Z J, et al. Improved RRT

- algorithm for mobile robot path planning[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(16): 47-52.
- [12] 李文君,李忠伟,罗健.基于RRT*算法的移动机器人安全光滑路径生成[J].电子测量技术,2024,47(2): 51-60.
- LI W J, LI ZH W, LUO L. Secure smooth path generation for mobile robot based on RRT* algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2): 51-60.
- [13] 刘小松,康磊,单泽彪,等.基于双向目标偏置APF-informed-RRT算法的机械臂路径规划[J].电子测量与仪器学报,2024,38(6):75-83.
- LIU X S, KANG L, SHAN Z B, et al. Robot path planning based on bidirectional target biased APF-informed-RRT algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (6): 75-83.
- [14] 鞠慕涵,刘万科,胡捷,等.改进D*算法的未知场景机器人运动规划[J].导航定位学报,2024,12(3): 145-153.
- JU M H, LIU W K, HU J, et al. Robot motion planning in unknown scene based on improved D* algorithm [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2024, 12 (3): 145-153.
- [15] SUAN P, JAM J. Optimizing autonomous UAV navigation with D* algorithm for sustainable development [J]. Sustainability, 2024, 16 (17): 7867-7867.
- [16] 傅亮,刘峰,刘书勇,等.基于改进D* Lite的二维路径连续动态规划算法[J].无线电通信技术,2023,49(6): 1042-1051.
- FU L, LIU F, LIU S Y, et al. Two dimensional path continuous dynamic planning algorithm based on improved D* Lite [J]. Radio Communication Technology, 2023, 49(6): 1042-1051.
- [17] 乔珍,尹传忠,仇鑫.基于改进蚁群算法的长航程无人船路径规划[J].计算机工程与科学,2024,46(10): 1835-1842.
- QIAO ZH, YIN CH ZH, QIU X. Long range unmanned ship path planning based on improved ant colony algorithm [J]. Computer Engineering and Science, 2024, 46(10): 1835-1842.
- [18] 方敏,金世俊.基于蚁群算法和蝙蝠算法的多点路径规划[J].电子测量技术,2024,47(18):47-53.
- FANG M, JIN SH J. Multi point path planning based on ant colony algorithm and bat algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47 (18): 47-53.
- [19] 余震,王栋,王明天,等.基于改进A*算法的AGV全局路径规划[J].武汉科技大学学报,2024,47(3): 234-240.
- YU ZH, WANG D, WANG M T, et al. AGV global path planning based on improved A* algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2024, 47(3): 234-240.
- [20] 唐嘉宁,彭志祥,李孟霜,等.基于改进A*算法的无人机路径规划研究[J].电子测量技术,2023,46(8):99-104.
- TANG J N, PENG ZH X, LI M SH, et al. Research on UAV path planning based on improved A* algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46 (8): 99-104.
- [21] 王其,王磊,倪世松,等.基于改进A*算法的应急救援无人机路径规划[J].计算机仿真,2024,41(6):84-88,353.
- WANG Q, WANG L, NI SH S, et al. Emergency rescue UAV path planning based on improved A* algorithm[J]. Computer Simulation, 2024, 41(6): 84-88,353.
- [22] 姜龙腾,迟瑞娟,马悦琦,等.基于栅格法的农业机器人路径规划方法研究[J].农机化研究,2024,46(6): 19-24.
- JIANG L T, CHI R J, MA R Q, et al. Research on path planning method of agricultural robot based on grid method[J]. Research on Agricultural Mechanization, 2024, 46(6): 19-24.
- [23] 严增勇,曹扬,谢红韬,等.基于可视化地图的产业链图谱系统设计与研究[J].现代信息科技,2024,8(14):81-84,89.
- YANG Z Y, CAO Y, XIE H T, et al. Design and research of industrial chain map system based on visual map [J]. Modern Information Technology, 2024, 8(14): 81-84,89.
- [24] 黄勇强.基于ROS的移动机器人路径规划算法研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2023.
- HUANG Y Q. Research on path planning algorithm of mobile robot based on ROS[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [25] 吴飞龙,郭世永.融合改进A*和动态窗口法的AGV动态路径规划[J].科学技术与工程,2020,20(30): 12452-12459.
- WU F L, GUO SH Y. AGV dynamic path planning based on improved A* and dynamic window method[J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20 (30): 12452-12459.

作者简介

- 王敏,博士,教授,主要研究方向为信号与信息处理、海上设备路径规划、海洋气象、深度学习。
E-mail:yu0801@163.com.
- 黎永顺(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理、海上设备路径规划等。
E-mail:2829146497@qq.com
- 石明航,硕士研究生,主要研究方向为无人艇路径规划、信号与信息处理、海洋数据插值等。
E-mail:1305781778@qq.com
- 田子康,硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理、海上舰船风险评估等。
E-mail:1139461571@qq.com