

基于双向搜索的改进 A* 算法路径规划

张湘,余捷,于廷海,王奕辉,叶盛

(福建省汽车电子与电驱动技术重点实验室,福建福州 350118)

摘要: 为改善传统路径规划 A* 算法搜索速度慢的问题,提出了一种基于双向搜索改进 A* 算法。新型算法选用欧几里得距离作为启发式函数并引入双向搜索策略,采用了 24 邻域搜索法和自适应地图的动态权重系数实现对启发式函数的自动调节,提高算法的路径规划效率及其对不同地图的适应性。在不同环境下的进行了两组仿真实验,结果表明,与现有 4 种算法比较,该算法在搜索节点数量和规划时间方面具有较大的性能提升。

关键词: 双向 A* 算法;启发式函数;路径规划;移动机器人

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0567-06

Path planning of improved A* algorithm based on bidirectional search

ZHANG Xiang, YU Jie, YU Tinghai, WANG Yihui, YE Sheng

(Fujian Provincial Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to address the issue of slow search speed in the traditional A* algorithm for path planning, a novel approach based on bidirectional search, known as the improved A* algorithm, is proposed. This new algorithm utilizes the Euclidean distance as the heuristic function and incorporates bidirectional search strategy. Additionally, it employs a 24-neighborhood search method and dynamically adjusts the weight coefficients of the heuristic function using an adaptive map, thereby enhancing the efficiency of path planning and adapting to different maps. Two sets of simulation experiments were conducted in different environments. Results demonstrate significant performance improvements of the algorithm in terms of the number of search nodes and planning time, as compared with the four existing algorithms.

Keywords: bidirectional A* algorithm; heuristic functions; path planning; mobile robots

路径规划是机器人实现最优移动路线的重要基础^[1-2],针对已知的静态场景,A*算法是解决栅格地图中最短路径的有效和直接的搜索方法^[3]。为了进一步提升传统 A* 算法的性能,很多学者对 A* 路径规划算法的改进开展了研究。Wang Z 等^[4]引入了方向角约束,使算法得到更优路径,但在复杂环境下难以保证路径的精度。Zheng H 等^[5]提出了引入航向角和转弯半径参数的混合 A* 算法,使得到的路径符合车辆运动学模型。Wang H 等^[6]提出了一种引入扩展距离、

双向搜索及启发式函数优化的 EBHSA* 算法,通过避免碰撞和消除直角转弯来提高算法的鲁棒性,并减少了扩展节点和运行时间以提高算法效率。张澳等^[7]改进了评价函数和优化搜索节点。王中玉等^[8]等引入了智能采样函数和精英搜索策略,减少无用区间搜索。张学锋等^[9]提出一种 24 邻域的 8 搜索方向方法,大幅提升了算法的搜索节点数量和规划效率,但同时也增加了搜索路径的长度。Li M 等^[10]提出了一种双向动态加权 A* 算法,将搜索节点从 8 扩展到 16 个相邻节点,

收稿日期:2024-04-07

基金项目:福建理工大学科研启动基金(GY-Z21025)

第一作者简介:张湘(2000—),福建三明人,硕士研究生,研究方向:AGV 自然导航。

通信作者:余捷(1984—),男,福建福清人,副教授,博士,研究方向:新能源与智能网联汽车技术。

以较低的计算时间找到最短距离,并引入了一种新的障碍物判断公式来分析障碍物。Wang P 等^[11]提出了一种自适应双向 A* (ABA*) 算法,该算法能够适应环境变量并利用双向搜索找到最优路径。Zhong T 等^[12]提出了一种基于双向 A* 搜索策略的模拟全局点 A* 算法 (FGP-A*), 在全局路径规划中可实现快速部署,同时减少了计算负载,获得了更合理的路径。基于上述研究,本研究通过调整 A* 算法的搜索策略、搜索邻域和评价函数来优化搜索机制,以期实现最优路线规划下的搜索效率提升。

1 传统 A* 搜索算法原理

A* 算法^[13]的基本思想是从起点开始通过评价函数对周围的点进行评估,以获取周围节点中代价值最小的点作为下一步扩张的起点,依此循环,直至找到目标点。最后从目标点根据搜索路径返回至起点,保存代价值最小的路径^[14],A* 算法的评价函数为:

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

式中, $g(n)$ 表示从起始节点到当前节点 n 的实际代价函数, $h(n)$ 表示从当前节点 n 到目标节点的预估代价函数, $f(n)$ 表示当前节点 n 的总代价函数。A* 算法通常使用曼哈顿距离、欧几里得距离和切比雪夫距离作为启发函数^[15]。欧几里得距离函数估计的路径比其他函数更接近实际路径^[16]。本研究采用欧几里得距离作为启发函数,其公式为:

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

式中, x_n 为当前节点的横坐标, y_n 为当前节点的纵坐标, x_g 为目标节点的横坐标, y_g 为目标节点的纵坐标。采用欧几里得距离的传统 A* 算法路径规划效果如图 1 所示。

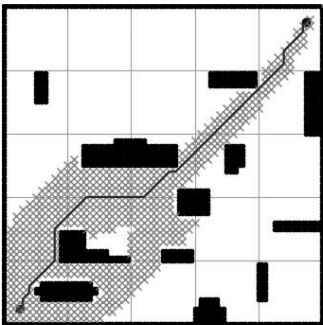


图 1 传统 A* 路径规划算法

Fig.1 Traditional A* path planning algorithm

图 1 中黑色栅格代表被障碍物所占据的区域,左下方圆点为设定的机器人运动起始点,右上方圆点为机器人任务目标终点,灰色区域代表 A* 算法所遍历的节点。传统 A* 算法进行路径规划时通常考虑当前节点的 8 个邻域节点进行搜索^[17],如图 2 所示,其中 PARENT 表示父节点即当前节点,箭头指向的是当前父节点的子节点。

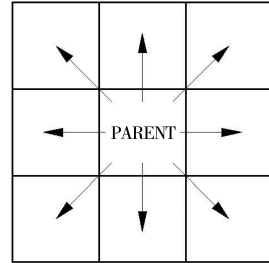


图 2 传统 A* 算法 8 邻域搜索示意图

Fig.2 Diagram of traditional A* algorithm 8 neighborhood search

2 改进 A* 搜索算法

为了提升 A* 的搜索速度和准确性,基于现有研究基础,拟从搜索策略、节点搜索邻域以及改进评价函数各方面进行改进。

2.1 搜索策略改进

本研究采用双向搜索策略,同时从起点和终点开始分别构建两个独立的 A* 搜索,各自维护两个开放列表 (OPEN_LIST) 和两个关闭列表 (CLOSED_LIST)。每一步都从两个方向分别选择最有希望的节点进行扩展,当两个搜索中的节点相遇时,就找到了从起点到终点的最优路径。双向 A* 算法路径规划流程如图 3 所示。

双向搜索 A* 算法以 A* 算法为基础,在路径规划的起点和终点处同时采用 A* 算法进行路径搜索,以此提高算法效率。但双向搜索 A* 算法在障碍物空间寻找路径时,规划的路径不一定最优,且存在很多冗余点,同时容易出现并行搜索区间,增加寻路时间,如图 4 所示。因此双向搜索 A* 算法也仍然有待改进的空间。

2.2 搜索邻域改进

传统 8 邻域搜索 A* 算法只考虑水平、垂直和对角线方向的移动,无法沿着其他斜线方向移动,所以可能无法找到特定的最优路径。此外,传统算法在选择下一个节点扩展时,可能会更倾向于

朝角落方向扩展,而不是直接朝着终点方向扩展。
24 邻域考虑了更多的方向,可以沿着更多的斜线

方向移动,搜索路径更灵活,能够找到更多可能的
最优路径。

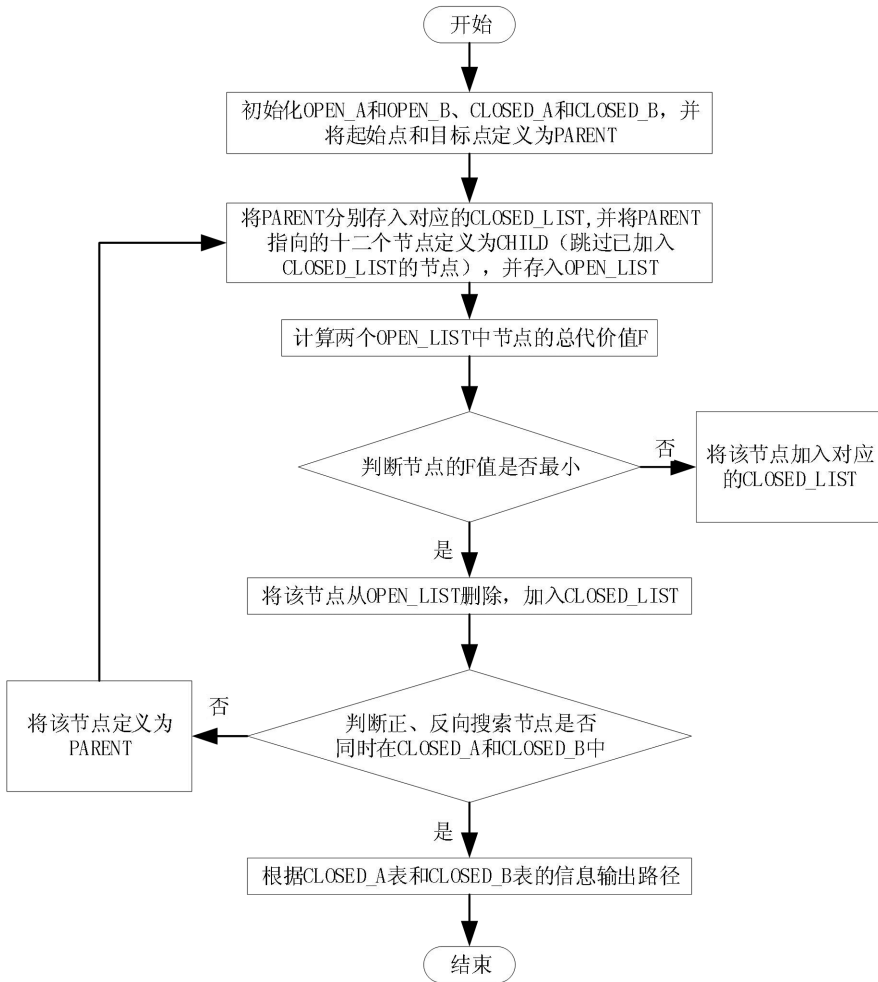


图 3 双向 A* 算法路径规划流程图

Fig.3 Bidirectional A* algorithm path planning flowchart

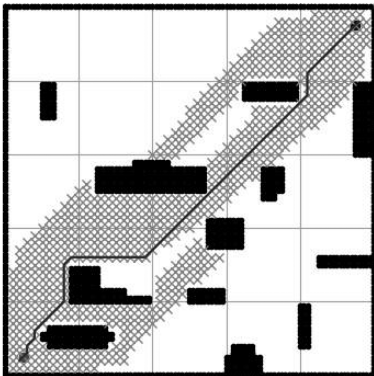


图 4 双向 A* 算法搜索示意图

Fig.4 Schematic diagram of bidirectional A* algorithm search

方向上的路径都是最优的。通过剪枝,将一些次优或冗余的路径排除在搜索范围之外,将搜索目标聚焦于可能实现更优路径的方向,实现最优路径的可能性更大。然而,24 方向搜索需要考虑更多的路径,导致搜索树的分支因子增加,从而产生更多的搜索节点。

本研究将 24 邻域搜索方向剪枝调整为 12 个搜索方向,旨在提高搜索到更优路径的可能性的同时减少了一部分搜索方向,相应地减少了搜索树的分支因子,从而减少了搜索过程中的节点数量,可以降低算法的时间和空间复杂度,提高搜索效率实现在更短的时间内完成路径搜索,提高算法的实时性和响应速度。改进的 24 邻域如图 5 所示。

24 方向搜索考虑的路径较多,但并不是所有

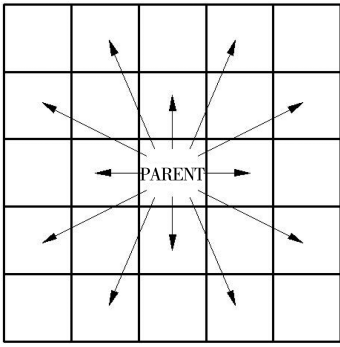


图 5 改进 A* 算法 24 邻域搜索示意图

Fig.5 Schematic diagram of 24 neighborhood search of improved A* algorithm

通过精心选择的 12 个搜索方向,算法不仅能够保留基本的搜索能力,还能有效剔除冗余的节点信息。改进的算法不仅更加灵活高效,而且能够更好地适应地形的变化,从而提升路径规划算法的整体性能和适用性。

2.3 改进评价函数

考虑到实际运行情况,路径搜索算法在开始搜索时,首先要迅速移动到任意位置;而在搜索接近结束时,要移动至目标点^[18]。在 A* 代价函数中加入权重系数 $w(n)$,改进的评价函数公式为:

$$f(n) = g(n) + w(n) * h(n) \quad (3)$$

当权重系数 $w(n)$ 较大时, A* 算法会尽快向终点扩展,搜索速度很快但可能会错过最优路径;当 $w(n)$ 较小时, A* 算法会倾向于搜索最优路径而减慢搜索速度^[19]。基于评价函数随权重系数 $w(n)$ 的变化特点,引入动态权重函数来调整启发函数,假设移动机器人起始点坐标为 (x_s, y_s) , 目标点为 (x_g, y_g) , 改进后评价函数可有效提高 A* 算法的灵活性,其表达式为:

$$w(n) = (e/2)^{-\lg P} + \frac{d}{D} \quad (4)$$

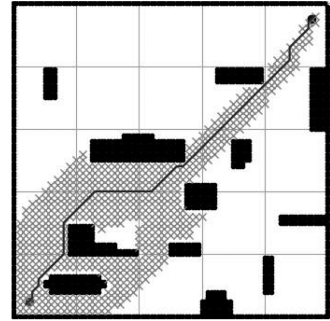
式中, d 为当前节点到目标点的欧几里得距离, D 为起点到目标点的欧几里得距离。当前节点与目标点距离较远时,选用较高的权重,此时路径搜索倾向快速搜索;当前节点与目标点距离较近时,算法倾向搜索最优路径。此外,为了增加算法对不同地图的适应性,引入障碍率 P , 地图障碍物所占比例较小时,算法倾向快速搜索;地图障碍物所占比例较大时,为避免算法陷入局部最优的情况,减小 $h(n)$ 所占权重。障碍率 P 的表达式为:

$$P = \frac{K}{(|x_s - x_g| + 1) \times (y_s - y_g + 1)} \quad (5)$$

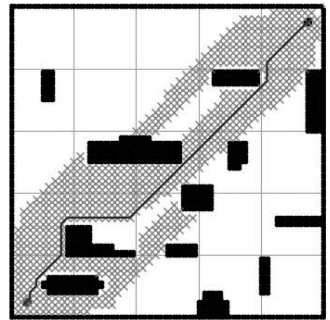
式中, K 为障碍物栅格数。

3 仿真结果与分析

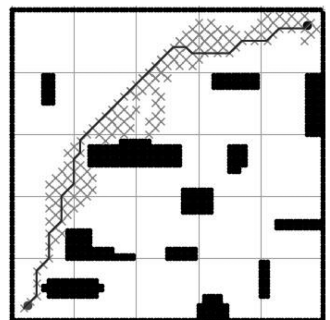
本研究采用软件为 Visual Studio Code, 编程语言为 Python 3.9; 硬件为 Intel(R) Core(TM) i5-9300H 2.40 GHz CPU, RAM 8GB。为了验证改进 A* 算法的有效性, 设计了 50 m × 50 m 的栅格地图, 并设置障碍率分别为 10% 和 15% 的栅格地图进行了 2 组对比仿真实验, 栅格地图中每个栅格的边长为 1 个单位。将传统 A* 算法、双向 A* 算法、文献[9]改进算法、文献[7]的双向改进算法与本研究所提算法进行对比实验, 分别比较了它们在路径长度、规划时间、遍历节点数量方面的表现, 进而评估改进 A* 算法的效果, 如图 6 所示。



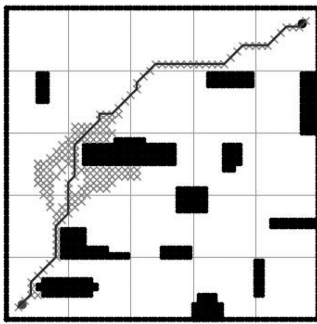
(a) 传统 A* 算法



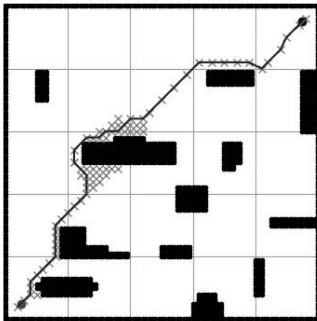
(b) 双向搜索 A* 算法



(c) 文献[9]算法



(d) 文献[7]算法



(e) 本研究所提算法

图 6 10%障碍率改进 A* 算法仿真对比图

Fig.6 Comparison diagram of improved A* algorithm simulation with 10% obstacle rate

表 1 算法仿真实验数据

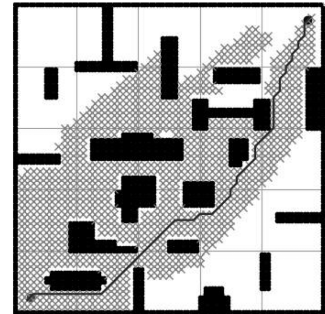
Tab.1 Algorithm simulation experimental data

算法类型	相对路径长度/m	规划时间/ms	搜索节点/个
传统 A* 算法	70.91	21.02	635
双向 A* 算法	70.91	37.09	691
文献[9]算法	76.28	5.22	136
文献[7]算法	72.17	5.07	159
本研究所提算法	75.52	4.89	80

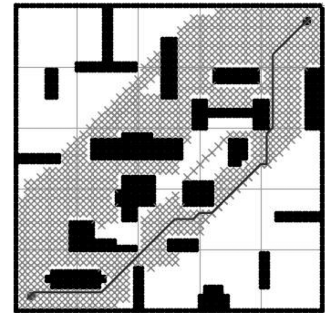
从图 6 和表 1 数据可见,所提算法与传统 A* 算法相比,虽然相对路径较长,但是规划时间和搜索节点数量明显减少,规划时间减少了 76.73%,搜索节点数量减少了 87.40%。所提算法搜索效率明显提高。为了验证算法的稳定性,在图 6 基础上继续增加障碍物数量,观察其效果,结果如图 7 所示。

综合图 7、表 2 数据可知,与传统 A* 算法相

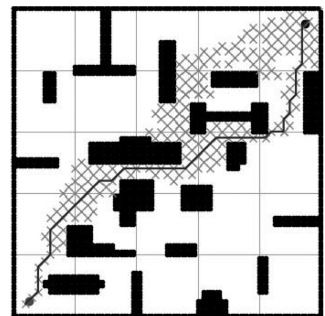
比,本研究所提算法的规划时间减少 85.38%,搜索节点数量减少 89.86%。对比表 1 和表 2 数据,传统 A* 算法的规划时间多了 55.15%,搜索节点数量多 69.44%,具体数据如表 3 所示。



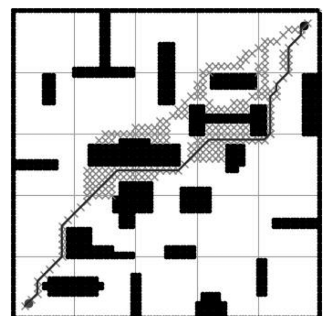
(a) 传统 A* 算法



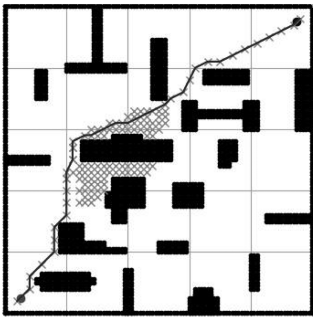
(b) 双向搜索 A* 算法



(c) 文献[9]算法



(d) 文献[7]算法



(e) 本研究所提算法

图 7 15%障碍率环境改进 A* 算法仿真对比图

Fig.7 Comparison diagram of improved A* algorithm simulation with 15% obstacle rate

表 2 算法仿真实验数据

Tab.2 Algorithm simulation experimental data

算法类型	相对路径长度/m	规划时间/ms	搜索节点/个
传统 A* 算法	74.42	46.87	1 076
双向 A* 算法	74.78	38.88	932
文献[9]算法	80.19	11.11	191
文献[7]算法	78.03	8.12	221
本研究所提算法	75.91	6.85	109

从表 3 可知,相比所提算法,传统 A*、文献[9]算法和文献[7]算法受对障碍物数量的变化影响较大,所提算法通过引入双向搜索策略、24 邻域的 12 搜索方向以及动态权重调节的启发函数,降低了地图障碍物数量变化对算法的影响。

参考文献:

- [1] YANG C L. A novel algorithm for path planning of the mobile robot in obstacle environment[J]. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 2021, 15: 225-235.
- [2] 王宇斌,沈振军,王昱宸,等. 基于 A* 算法的四面体机器人路径规划研究[J]. 机械传动, 2024, 48(2): 42-47.
- [3] GUAN W, WANG K. Autonomous collision avoidance of unmanned surface vehicles based on improved A-star and dynamic window approach algorithms[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15(3): 36-50.
- [4] WANG Z, XIANG X B. Improved astar algorithm for path planning of marine robot[C] // 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan: IEEE, 2018: 5410-5414.
- [5] ZHENG H Z, DAI M, ZHANG Z S, et al. The navigation based on hybrid A star and TEB algorithm implemented in obstacles avoidance[C] // 29th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). Queenstown, New Zealand: IEEE, 2023: 1-6.
- [6] WANG HW, QI X Y, LOU S J, et al. An efficient and robust improved A* algorithm for path planning[J]. Symmetry, 2021, 13(11): 2213.

表 3 两组实验数据对比

Tab.3 Comparison of two sets of experimental data

算法类型	相对路径长度增长率/%	规划时间增长率/%	搜索节点增长率/%
传统 A* 算法	4.94	55.15	69.44
双向 A* 算法	5.45	4.60	34.87
文献[9]算法	5.12	53.01	40.44
文献[7]算法	8.11	37.56	38.99
本研究所提算法	0.51	28.61	36.25

4 结论

1) 传统的单向搜索可能受限于搜索空间的复杂性和节点数量的增长,而双向搜索能够同时从起点和终点进行搜索,加快了搜索过程。有方向取舍的 24 邻域搜索方案则精确地选择了适合当前搜索状态的邻域方向,避免了不必要的节点扩展,从而减少了计算负担。

2) 在仿真对比实验中,与传统单向 A* 相比,新算法显著减少了需要扩展的节点数,这直接影响了路径规划的速度和效率。其次,新算法在两种地图场景下都能展现出较好的适应性。

3) 改进算法对静态环境下的全局路径规划有着明显的应用潜力。后续研究中可进一步通过添加动态避障模块,使算法能够更好地处理动态环境下的路径规划问题,有望进一步提高移动机器人对现实场景的适用性。

187-194.

- [13] 侯小秋. 一种严格成立的惩罚函数法及其求解[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(4): 506-510.
- [14] 王俊伟, 汪定伟. 粒子群算法中惯性权重的实验与分析[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 194-198.
- [15] 徐宏英. 粒子群算法中惯性权重研究及实验分析[J]. 软件导刊, 2013, 12(10): 57-60.
- [16] 于彦. 自适应权重混合粒子群算法在 PID 整定中的应用[J]. 无线通信技术, 2022, 31(1): 15-19.
- [17] 高琬玉, 卢文喜, 潘紫东, 等. 基于自适应权重粒子群优化算法的地下水污染源辨识[J]. 中国农村水利水电, 2022(12): 1-7, 16.
- [18] 张文成, 周穗华, 吴志东, 等. 改进策略的粒子群算法及其实验测试[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(10): 3945-3949.
- [19] 王振武, 孙佳骏, 尹成峰. 改进粒子群算法优化的支持向量机及其应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(12): 1728-1733.

(责任编辑: 方素华)

(上接第 572 页)

- [7] 张澳. 基于 2D 激光雷达 AGV 自然导航技术研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023.
- [8] 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.
- [9] 张学锋, 胡伟鹏, 石军花, 等. 基于改进双向 A* 算法的机器人路径规划研究[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 1-13[2024-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20240305.1733.005.html>.
- [10] LI M H, QIAO L J, JIANG J F. A multigoal path-planning approach for explosive ordnance disposal robots based on bidirectional dynamic weighted-A* and learn memory-swap sequence PSO algorithm[J]. Symmetry, 2023, 15(5): 1052.
- [11] WANG P K, MUTAHIRA H, KIM J, et al. ABA*-adaptive bidirectional A* algorithm for aerial robot path planning[J]. IEEE Access, 2023, 11: 103521-103529.
- [12] ZHONG T J, ZHANG H, DONG F Y, et al. FGP-astar algorithm based on path planning for mobile robots[C]//2nd International Conference on Computing, Communication, Perception and Quantum Technology (CCPQT). Xiamen, China: IEEE, 2023: 207-215.
- [13] LIANG C L, ZHANG X K, WATANABE Y, et al. Autonomous collision avoidance of unmanned surface vehicles based on improved A star and minimum course alteration algorithms[J]. Applied Ocean Research, 2021, 113: 102755.
- [14] 杜传胜, 高焕兵, 侯宇翔, 等. 基于改进双向 A* 算法的消防机器人路径规划[J]. 计算机与现代化, 2023(4): 15-19, 25.
- [15] 姜媛媛, 丰雪艳. 基于改进 A* 算法的煤矿救援机器人路径规划[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8): 53-59.
- [16] LI C G, HUANG X, DING J, et al. Global path planning based on a bidirectional alternating search A* algorithm for mobile robots[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 168: 108123.
- [17] 贾明超, 冯斌, 吴鹏, 等. 一种融合改进 A* 算法与改进动态窗口法的文旅服务机器人路径规划[J]. 图学学报, 2024, 45(3): 505-515.
- [18] 魏博闻, 严华. 一种面向非结构化环境的改进跳点搜索路径规划算法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2363-2370.
- [19] 蒋承杰, 朱华, 谢瑶, 等. 基于改进 A* 算法的机器人的路径规划[J]. 制造技术与机床, 2024(6): 33-36, 73.

(责任编辑: 方素华)