

融合改进斜四邻域 A* 与三次 B 样条曲线的路径规划算法

付金岗, 李 丹, 王鹏杰

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 针对传统 A* 算法八邻域搜索路径节点多导致搜索及规划路径速度慢的问题, 提出 1 种融合改进斜四邻域 A* 与三次 B 样条曲线的路径规划算法。在传统八邻域搜索启发下, 删除原本上下左右 4 个方向上的搜索路径, 保留右上、右下、左上及左下 4 个方向的搜索路径, 使算法在搜索时速度更快, 搜索路径节点数更少; 引入三次 B 样条曲线, 优化路径上的尖锐拐点, 使路径更平滑。采用提出的算法与其他 2 种算法在 3 种不同分辨率及不同障碍率的地图上进行实验验证。结果表明: 相比于传统 A* 算法, 改进斜四邻域 A* 算法的搜索时间缩短 83.4%, 路径节点数减少 89.7%; 引入的三次 B 样条曲线使斜四邻域 A* 算法规划出的路径更平滑, 提出的算法可极大提高路径搜索及规划的有效性。

关键词: A* 算法; 斜四邻域搜索; 三次 B 样条曲线; 路径规划

中图分类号: TP 242.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23133



A Path Planning Algorithm for Incorporating Improved Oblique Four-neighborhood A* and Cubic B-spline Curve

FU Jingang, LI Dan, WANG Pengjie

(School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional A* algorithm has too many eight-neighborhood search path nodes, which leads to slow search and path planning, a new path planning algorithm based on oblique four-neighborhood A* and cubic B-spline curve was proposed. Inspired by the traditional eight-neighborhood search, the original search paths in the the four directions of top, bottom, left, and right were deleted, and the search paths in the upper right, lower right, upper left and lower left directions were retained, so that the algorithm can search faster and the number of search path nodes was less. Cubic B-spline curve was introduced to optimize the sharp inflection points on the path and make the path smoother. Experimental verification was conducted on three maps with different resolutions and obstacle rates using the proposed algorithm and two other algorithms. The results show that compared with the traditional A* algorithm, the search time of the improved oblique four-neighborhood A* algorithm is reduced by 83.4%, and the number of path node is reduced by 89.7%. The cubic B-spline curve introduced makes the path planned by the oblique four-neighborhood A* algorithm smoother, and the proposed algorithm can greatly improve the effectiveness of path search and planning.

Keywords: A* algorithm; oblique four-neighborhood search; cubic B-spline curve; path planning

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2108085MF225)

作者简介: 付金岗 (1999—), 男, 安徽萧县人, 硕士生, 主要研究方向为服务机器人、自主导航等。

通信作者: 李丹 (1976—), 女, 安徽马鞍山人, 博士, 教授, 主要研究方向为图像处理与机器人视觉、自主导航等。

引文格式: 付金岗, 李丹, 王鹏杰. 融合改进斜四邻域 A* 与三次 B 样条曲线的路径规划算法 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2024, 41(3): 321-327.

路径规划就是在复杂环境下通过给定起点和终点,在避开环境内部障碍物的条件下生成 1 条可通行的线路^[1]。汽车无人驾驶技术是当今科技发展的热门领域之一,而路径规划是无人驾驶汽车信息感知和智能控制的桥梁,是实现自动驾驶的基础。尽管无人驾驶技术进步显著,但是无人驾驶技术的普及还面临诸多挑战,因此,综合考虑多种因素,如交通规则、车辆动态特性、路况等进一步路径规划优化算法研究,对积极推动无人驾驶技术的进步有重要意义。

常见的路径规划算法主要有 Dijkstra 算法^[2]、A*算法^[3-4]、D*算法^[5]及蚁群算法^[6]。A*算法是目前使用相对广泛的算法,通过引入启发函数可高效衡量实时搜索位置和目标位置的距离关系,但是如果估价函数不够准确,就会搜索到其他路径,且在搜索节点上会占用大量内存导致搜索速度缓慢。为此,学者们相继提出了不同的改进方法。杨秀健等^[7]提出斜八邻域扩展的概念,与四邻域扩展结合组成 1 种新的双邻域选择扩展策略,可有效减少扩展节点的数量,但斜八邻域搜索路径节点依旧较多;杜传胜等^[8]提出 1 种基于改进启发函数的同步双向 A*算法,将传统 A*算法的单向搜索改为同步双向搜索,动态定义正反向搜索的目标节点,提高了搜索效率,但路径规划速度有待提高;李云龙等^[9]提出 1 种改进的双向 A*算法,从起点、终点同时搜索,交叉完成寻路,但搜索路径节点多;龚云鑫等^[10]提出 1 种改进的 A*算法,通过定义凸角点和邻居关系的概念,利用凸角点作为节点并根据邻居关系来扩展节点到目标点,但搜索到的路径节点还是多;董雅文等^[11]提出改进邻域扩展 A*和经预处理的深度优先搜索(depth-first search)相结合的衔接路径规划算法,将 A*算法搜索范围扩展至 24 邻域,24 邻域搜索节点比传统 A*算法少,但需经二次数量优化,占用一定时间。目前改进的 A*算法主要通过改进搜索方式及减少搜索节点数等方式提升路径规划速度,还有进一步的提升空间。因此,针对传统 A*算法搜索速度慢且搜索路径节点多等问题^[12],提出 1 种融合改进斜四邻域 A*与三次 B 样条曲线的路径规划算法,以进一步提高路径搜索速度和规划的有效性。

1 路径规划融合算法

1.1 斜四邻域搜索的改进

传统 A*算法的搜索方式为八邻域搜索^[13],是从起始点开始向相邻的 8 个方向展开搜索(如图 1),每次搜索都要遍历 8 个位置的路径点。这种搜索可找到相对较短的路径,但搜索到的路径点多,占用大量

内存,搜索速度较慢^[14]。传统四邻域搜索(如图 2)每次只能沿水平、竖直方向搜索,速度也比较慢。因此,提出斜四邻域搜索算法。

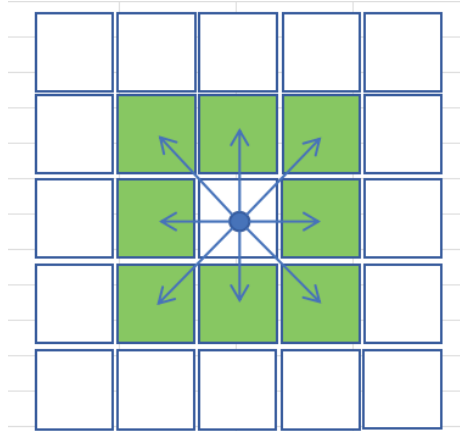


图1 传统八邻域扩展

Fig. 1 Traditional eight-neighborhood extension

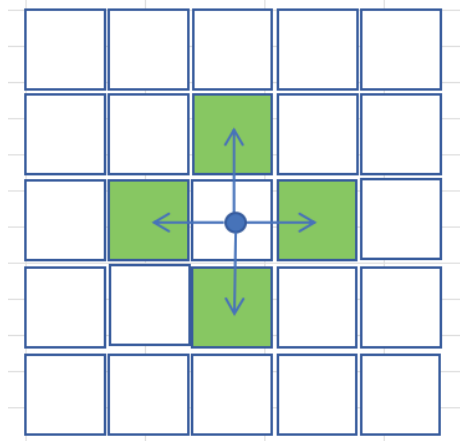


图2 传统四邻域扩展

Fig. 2 Traditional four-neighborhood expansion

斜四邻域搜索只需以起始点右上、右下、左上及左下 4 个方向为搜索方向,如图 3。

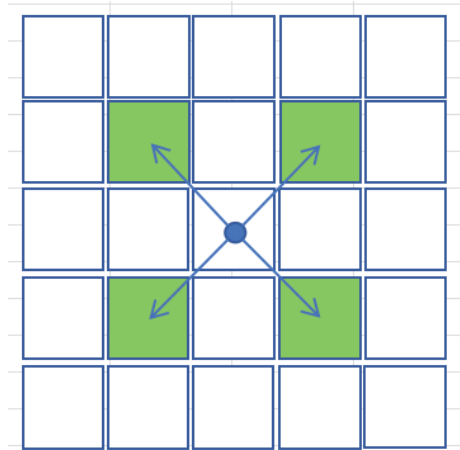


图3 斜四邻域扩展

Fig. 3 Oblique four-quadrangle extension

由图 3 可知:斜四邻域搜索每次只需对对角线

4个方向进行搜索,每次的搜索路径节点只有4个,因是沿对角线搜索,故比传统四邻域按水平、竖直方向上的搜索要快。但会出现有的终点搜索不到的问题,如图4。其中A点和B点分别是起点和终点,采用斜四邻域搜索从A点是不可能到达B点的,故需对其进行改进。

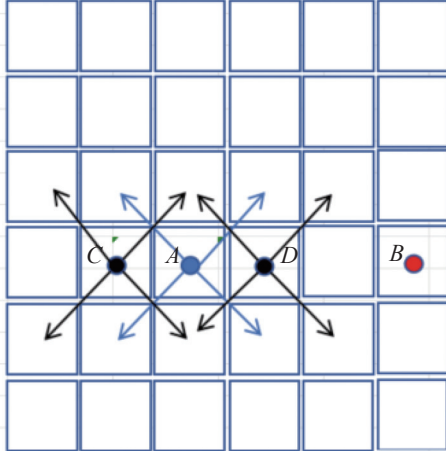


图4 改进的斜四邻域搜索

Fig. 4 Improved oblique four-neighborhood search

如果起点和终点的X坐标差值为偶数(用栅格地图的单位长度作为数值奇偶衡量标准),就可用斜四邻域搜索;如果两者的X坐标差值为奇数,用斜四邻域搜索就搜索不到B点。所以在使用斜四邻域搜索时需判断起点、终点的X坐标是否为奇数。若为奇数,在A点搜索邻域过程前增加起点、终点的X坐标差值是否为奇数的判断语句,将起点A的X坐标加或减1个单位就得到C、D点。若起点到终点从左向右,将D点作为扩展点加入Openlist^[15]中;若起点到终点从右向左,将C点作为扩展点加入Openlist中。这样不论起点和终点的X差值是否为奇数,都将其转换成差值为偶数的坐标;不论起点和终点是何种位置,都能使用斜四邻域搜索进行扩展,判断邻域点的G值(从起点A移动到指定方格即B点的移动代价值)与父节点是否更新;若不更新则继续将该邻域点作为Current往下继续执行,直到邻域点的G值与父节点更新,节点搜索结束。

在生成路径方面^[16]也需先进行起点、终点的X坐标差值判断,若为偶数则直接从起点A开始规划,直到终点B结束;若为奇数,则先进行起点A和左或右相邻节点C或D的连接,再以相邻节点C或D为起点开始进行和偶数结果一样的路径规划,直到终点B结束。

1.2 三次B样条曲线轨迹优化

斜四邻域搜索是对角方式搜索,生成的路径会出现对应的尖锐拐点,为使规划的路径更符合机器人的行驶方式,对斜四邻域A*算法生成的路径进行

平滑性处理。贝塞尔曲线和B样条曲线都是路径平滑处理的方式,但是贝塞尔曲线无法对曲线形状进行局部控制,改变任一控制点位置,整个曲线均受影响。B样条是在贝塞尔曲线的基础上进行改进的曲线优化方式,可弥补贝塞尔曲线的不足^[17-18]。因此采用B样条方式对斜四邻域A*算法生成的路径进行处理,B样条曲线上点的方程^[19]:

$$P_d = \sum_{b=0}^n p_b \cdot F_{b,k}(t) \quad (1)$$

式中: P_d 为曲线上的点坐标向量; d 为曲线上的第 d 个点; n 为控制点 p_b 的数量; p_b 为控制曲线的特征点坐标; $F_{b,k}(t)$ 为 k 阶B样条基函数^[20]; b 为坐标的索引,从0开始; k 为多项式最高的幂数, k 影响B样条曲线的次数^[21]; $k-1$ 为曲线的次数; t 为绘制曲线时的取值。三次B样条曲线方程中基函数^[22]:

$$F_{b,k}(t) = \frac{1}{k!} \sum_{m=0}^{k-b} (-1)^m \binom{m}{k+1} (t+k-m-j)^k \quad (2)$$

其中: j 为控制点的索引; m 为从0开始的变量; $\binom{m}{k+1}$ 表示阶乘,由推导得到:

$$\begin{aligned} F_{0,3}(t) &= \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^3 (-1)^j C_4^j (t+3-0-j)^3 = \\ &= \frac{1}{6} [(-1)^0 C_4^0 (t+3)^3 + (-1)^1 C_4^1 (t+2)^3 + \\ &+ (-1)^2 C_4^2 (t+1)^3 + (-1)^3 C_4^3 (t)^3] = \\ &= \frac{1}{6} (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) = \frac{1}{6} (1-t)^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{1,3}(t) &= \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^3 (-1)^j C_4^j (t+3-1-j)^3 = \\ &= \frac{1}{6} [(-1)^0 C_4^0 (t+2)^3 + (-1)^1 C_4^1 (t+1)^3 + \\ &+ (-1)^2 C_4^2 t^3] = \frac{1}{6} (3t^3 - 6t^2 + 4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{2,3}(t) &= \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^3 (-1)^j C_4^j (t+3-2-j)^3 = \\ &= \frac{1}{6} [(-1)^0 C_4^0 (t+1)^3 + (-1)^1 C_4^1 t^3 + \\ &+ (-1)^2 C_4^2 (-t)^3] = \frac{1}{6} (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{3,3}(t) &= \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^3 (-1)^j C_4^j (t+3-3-j)^3 = \frac{1}{6} (-1)^0 C_4^0 t^3 = \frac{1}{6} t^3 \\ F_{0,3}(t) &= \frac{1}{6} (1-t)^3 \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_{1,3}(t) = \frac{1}{6} (3t^3 - 6t^2 + 4) \quad (4)$$

$$F_{2,3}(t) = \frac{1}{6} (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \quad (5)$$

$$F_{3,3}(t) = \frac{1}{6} t^3 \quad (6)$$

将式(3)~(6)的基函数代入式(1),就可得到三次B样条曲线方程^[23]:

条算法进行仿真实验。为降低实验结果的偶然性, 对 3 种地图分别进行 50 次实验, 且分别对 3 种地图的 50 次实验搜索和生成路径时间进行平均性处理, 得到平均路径拐点、平均路径节点和平均寻路时间。实验一地图的分辨率为 60×60 , 有效障碍率为 46%; 实验二地图的分辨率为 80×80 , 有效障碍率为 68%; 实验三的地图分辨率为 100×100 , 有效障碍率为 82%。对 3 种地图各选取其中 1 个有代表性的实验结果进行演示, 如图 6~8。图中原点为绿色圆点, 终点为蓝紫色 $\times$ 点, 扩展点为浅蓝色 $\times$ 点。

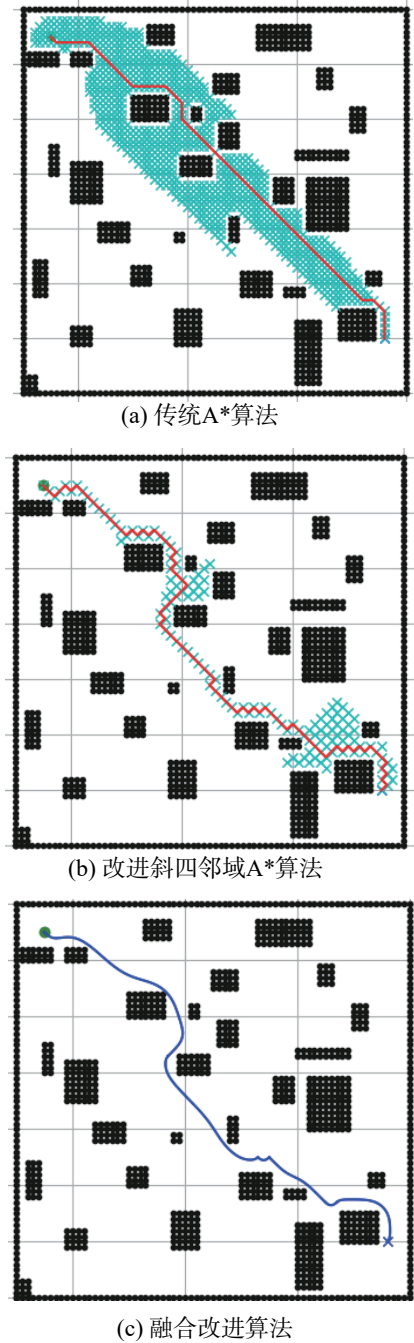


图6 3种算法下实验一的路径规划结果

Fig. 6 Path planning results of experiment 1 under three algorithms

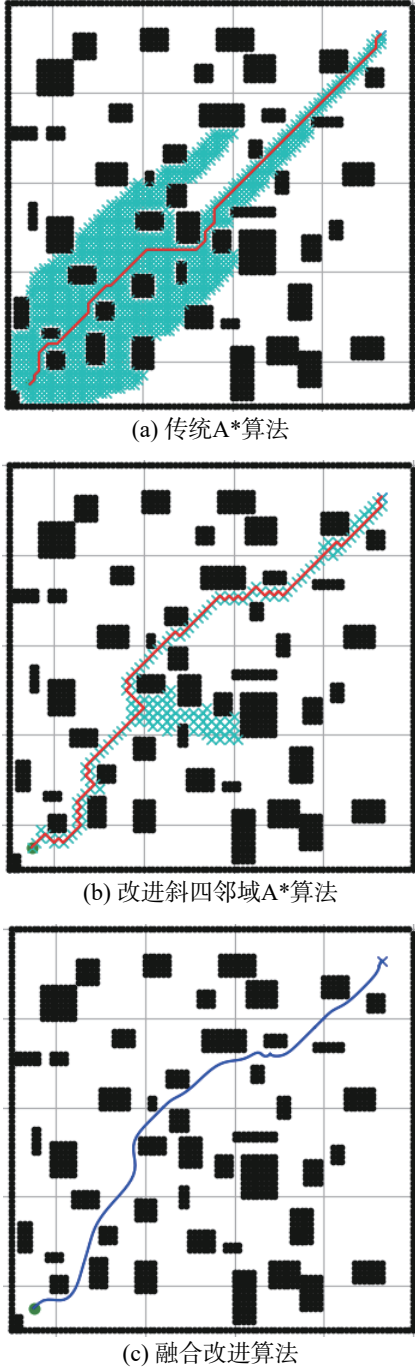


图7 3种算法下实验二的路径规划结果

Fig. 7 Path planning results of experiment 2 under three algorithms

由图 6~8 可知: 传统 A*算法扩展点多, 搜索速度有待进一步提高; 斜四邻域 A*搜索路径节点少, 且均有效避开障碍物, 但规划出的路径由于是斜向搜索, 路径曲线的平滑度不够、尖锐拐点较多; 经过融合的三次 B 样条曲线可改善路径的平滑性。

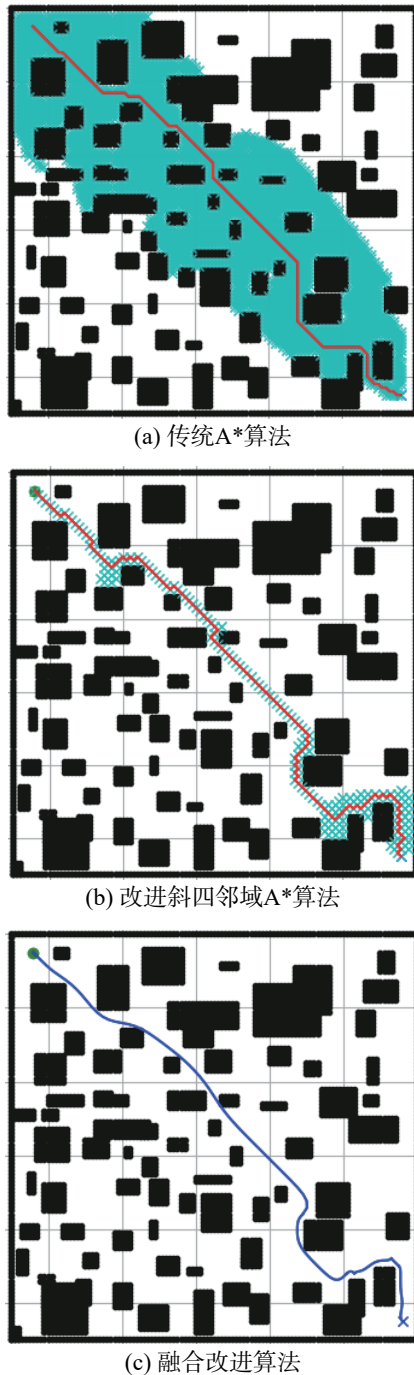


图8 3种算法下实验三的路径规划结果

Fig. 8 Path planning results of experiment 3 under three algorithms

3种路径规划算法的性能指标如表1。由表1可知:融合改进算法的搜索速度明显快,3种障碍率地图的平均寻路时间分别为0.84、0.93、1.68 s,相比于传统A*算法(4.48、5.63、20.12 s),平均寻路时间缩短83.4%;地图复杂度越高,融合改进算法的节点搜索速度明显越快,平均搜索路径节点数明显减少,数量减少89.7%,同时路径上的尖锐拐点明显减少。表明融合改进算法不仅可迅速处理搜寻过的节点并

规划出路径,还可对路径尖锐拐点进行有效的平滑处理,极大提升路径搜索与规划的有效性。

表1 3种路径规划算法的性能指标

Tab. 1 Performance indicators of three path planning algorithms

实验	算法	平均路径节点/个	平均路径拐点/个	平均寻路时间/s
实验一	传统A*算法	1 365	9	4.48
	改进斜四邻域A*算法	126	39	0.98
	融合改进算法	126	2	0.84
实验二	传统A*算法	1 876	18	5.63
	改进斜四邻域A*算法	206	33	1.08
	融合改进算法	206	1	0.93
实验三	传统A*算法	4 235	23	20.12
	改进斜四邻域A*算法	317	46	1.75
	融合改进算法	317	2	1.68

3 结论

针对传统A*算法八邻域搜索速度慢且搜索路径节点多的问题,提出1种融合改进的斜四邻域A*与三次B样条曲线的路径规划算法,且对其进行对比仿真验证。结果表明:相比于传统A*算法,融合改进算法的路径节点数减少89.7%、搜索及路径规划时间缩短83.4%,地图复杂度越高,其节点搜索速度明显越快、平均搜索路径节点数与路径尖锐拐点数明显减少。提出的融合改进算法不仅能迅速处理搜寻过的节点并规划出路径,还能对路径尖锐拐点进行有效的平滑性处理,可极大提升路径搜索及规划的有效性。

参考文献:

- [1] 崔炜,朱发证. 机器人导航的路径规划算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(19):10-20.
- [2] 巩慧,倪翠,王朋,等. 基于Dijkstra算法的平滑路径规划方法[J/OL]. 北京航空航天大学学报, [2023-10-27]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0377>.
- [3] LI X N, HE Q, YANG Q, et al. Research on an optimal path planning method based on A* algorithm for multi-view recognition[J]. Algorithms, 2022, 15(5):171.
- [4] ZHANG C, YU F. Research on forest fire rescue path planning based on improved A* algorithm[J]. International Journal of Frontiers in Engineering Technology, 2022, 4(5):1-5.
- [5] SUN B, ZHANG W, LI S Q, et al. Energy optimised D*

- AUV path planning with obstacle avoidance and ocean current environment[J]. *Journal of Navigation*, 2022, 75(3):685-703.
- [6] 黄丰云, 江仕球, 许建宁. 改进的蚁群算法机器人路径规划研究[J/OL]. 机械设计与制造, [2023-10-27]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20230605.030>.
- [7] 杨秀建, 袁志豪, 白永瑞, 等. 双邻域选择扩展A*路径规划算法[J/OL]. 机械科学与技术, [2023-10-27]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230223>.
- [8] 杜传胜, 高煊兵, 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.
- [9] 李云龙, 梁波, 薛新华, 等. 基于双向A*算法的路径规划问题研究[J]. 电子质量, 2023(2):1-4.
- [10] 龚云鑫, 刘桂华, 张文凯, 等. 利用凸角点改进A*算法的路径规划方法[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(12):309-315.
- [11] 董雅文, 杨静雯, 刘文慧, 等. 基于改进A*算法的机器人全覆盖衔接路径规划[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(9):125-128.
- [12] KARLIJN F, JOOST E V. Efficient path planning for automated guided vehicles using A* (A star) algorithm incorporating turning costs in search heuristic[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(3):707-725.
- [13] 官祥锦, 陈娟, 张为民. 基于改进A*算法的多AGV路径规划研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5):76-85,90.
- [14] WANG X D, ZHANG H W, LIU S, et al. Path planning of scenic spots based on improved A* algorithm[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):1-7.
- [15] LAI R S, WU Z Y, LIU X, et al. Fusion algorithm of the improved A* algorithm and segmented Bézier curves for the path planning of mobile robots[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3):2483.
- [16] 陈子豪. 一种基于A*算法的图搜索路径优化平滑方法[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(9):44-47.
- [17] 李健康, 江本赤, 吴路路, 等. 基于改进蚁群算法的AGV全局路径规划法[J]. 安徽科技学院学报, 2023, 37(3):89-95.
- [18] 孟珠李, 焦俊, 李郑涛, 等. 基于A*与B样条算法的农机器人路径规划系统[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2018, 42(1):45-53.
- [19] 汪瀚洋, 卢厚清, 陈亮, 等. 结合B样条优化的UAV多区域路径规划融合算法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9):193-200.
- [20] 许伦辉, 曾豫豪. 基于改进ACO和三次B样条曲线的路径规划[J]. 计算机仿真, 2022, 39(7):407-411.
- [21] 赵卫东, 唐顾杰, 宋江一. 基于改进JPS与三次B样条插值的路径规划算法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2022, 39(2):189-195.
- [22] 刘梦奇, 王维强, 田良宇. 基于B样条曲线的无人驾驶车辆Informed RRT*算法研究[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(4):25-29.
- [23] 张跃明, 薛奇, 纪姝婷. 满足曲率约束的B样条曲线连续路径平滑方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(5):59-65,72.
- [24] 钱东海, 孙林林, 赵伟. 基于三次B样条曲线的叉车型AGV路径规划研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4):177-181,189.
- [25] TRAN H N, NGUYEN D A, NGUYEN N T. A genetic algorithm application in planning path using B-spline model for autonomous underwater vehicle (AUV)[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2020, 902:54-64.
- [26] LI D R, CHENG B, XIANG S. Direct cubic B-spline interpolation: a fuzzy interpolating method for weightless, robust and accurate DVC computation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 172:107886.
- [27] 李二超, 齐款款. B样条曲线融合蚁群算法的机器人路径规划[J]. 计算机应用, 2021, 41(12):3558-3564.
- [28] 王晓明, 宋吉, 郑继新, 等. 改进B样条曲线的机器人轨迹拟合研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(2):41-43.

责任编辑: 何莉