

文章编号:1671-6833(2025)02-0019-07

基于 JPS 和变半径 RS 曲线的 Hybrid A* 路径规划算法

张博强¹, 张成龙¹, 冯天培¹, 高向川²

(1. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为解决混合 A* (Hybrid A*) 算法在高分辨率地图和复杂场景下搜索效率低、耗时间长的问题,通过对影响传统 Hybrid A* 算法搜索效率的因素进行分析,提出了 J-Hybrid A* 算法。首先,在 Hybrid A* 算法扩展节点前,使用跳点搜索(JPS)算法进行起点到终点的路径搜索,将该路径进行拉直处理后作为计算节点启发值的基础;其次,设计了新的启发函数,在 Hybrid A* 算法扩展前就能完成所有节点启发值的计算,减少了 Hybrid A* 扩展节点时计算启发值所需的时间;最后,将 RS 曲线由最小转弯半径搜索改为变半径 RS 曲线搜索,使 RS 曲线能够更早搜索到一条无碰撞路径,进一步提升了 Hybrid A* 算法的搜索效率。仿真结果表明:所提 J-Hybrid A* 算法在简单环境中比传统 Hybrid A* 算法和反向 Hybrid A* 算法用时分别缩短 68%、21%,在复杂环境中缩短 59%、27%。在不同分辨率地图场景中,随着地图分辨率的提高,规划效率显著提升。实车实验表明:所提 J-Hybrid A* 算法相较于传统 Hybrid A* 算法和反向 Hybrid A* 算法的搜索用时分别减少 88%、82%,有效提升了 Hybrid A* 算法的搜索效率、缩短了路径规划所需时间。

关键词: Hybrid A* 算法; 启发函数; JPS 算法; RS 曲线; 路径规划

中图分类号: TP242; TP391.9

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.02.022

随着自动驾驶技术的快速发展,其应用也迅速扩展到了工厂、隧道、矿区等非结构化道路的场景中^[1]。路径规划作为自动驾驶技术中的一个重要研究方向,其目的是为自动驾驶装备规划出一条从起点到终点的无碰撞路径。目前常用的路径规划算法有 Dijkstra 算法^[2]、A* 算法^[3]、人工势场法^[4]、RRT 算法^[5]、蚁群算法^[6]等,但上述算法在规划路径时均未考虑车辆运动学模型。

2008 年, Dolgov 等^[7]提出了能够满足车辆运动学约束的混合 A* (Hybrid A*) 算法。Hybrid A* 算法中节点以满足车辆运动学的方式进行扩展,同时为提升搜索效率,在搜索过程中融入了 RS 曲线搜索。但面对自动驾驶的实际应用需求, Hybrid A* 算法仍表现出搜索效率低、路径不平滑等问题^[8-9],因此,国内外学者对 Hybrid A* 算法的研究主要集中在搜索效率和路径质量两个方面。针对 Hybrid A*

算法搜索效率较低的问题,学者们通常从搜索空间^[10]、搜索策略^[11-13]、启发函数^[14]和碰撞检测^[12]等方面进行改进优化,提升算法的搜索效率。针对 Hybrid A* 算法路径质量不高的问题,学者们通常从二次优化^[15-16]、多地图融合^[17]、多算法融合^[18]等方面进行改进,使规划的路径更加平滑、远离障碍物。在上述针对 Hybrid A* 算法搜索效率的改进算法中,节点扩展仍需不断调用 A* 算法或迪杰斯特拉(Dijkstra)算法计算启发值,因此,在高分辨率地图和复杂场景下仍会表现出效率低、耗时长等问题。

针对上述问题,基于 Hybrid A* 算法,本文提出了 J-Hybrid A* 算法,通过改进启发函数,在搜索过程中调用一次跳点搜索算法(jump point search, JPS)就能完成所有启发值的计算,同时将定半径 RS 曲线改进为变半径 RS 曲线,使所提 J-Hybrid A* 算法可以更快获得一条无碰撞路径,提升了算法的搜索效率。

收稿日期:2024-11-16;修订日期:2025-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61640003);河南省重点研发专项(231111241100);河南省科学技术协会“科创中原”行动项目-青年人才托举工程项目(2023HYTP011)

作者简介:张博强(1979—),男,河南信阳人,河南工业大学教授,博士,主要从事汽车智能驾驶技术的研究,E-mail:zhang-boqiang@haut.edu.cn。

引用本文:张博强,张成龙,冯天培,等.基于 JPS 和变半径 RS 曲线的 Hybrid A* 路径规划算法[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(2):19-25.(ZHANG B Q, ZHANG C L, FENG T P, et al. The Hybrid A* planning algorithm based on JPS and variable radius RS curves[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(2): 19-25.)

1 改进 Hybrid A* 算法的路径规划

1.1 Hybrid A* 算法

Hybrid A* 算法是在 A* 算法的基础上改进而来,在 A* 算法只考虑车辆位置 (x,y) 的二维节点上增加代表车辆朝向的 θ 维度^[19]。当车辆处于节点 $n(x_n,y_n,\theta_n)$ 时,Hybrid A* 算法会根据式(1)所示的车辆运动学公式^[20],计算由节点 n 扩展的子节点 $n+1$ 的位姿信息 $(x_{n+1},y_{n+1},\theta_{n+1})$ 。

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \\ \theta_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ \theta_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \cdot \cos \theta_n \\ D \cdot \sin \theta_n \\ (D/L) \cdot \tan \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: L 为车辆轴距; D 为车辆移动距离; δ 为车辆转向角。

当得到扩展节点 $n+1$ 的位姿信息后,Hybrid A* 算法将使用式(2)来计算该节点的代价值 $f(n+1)$ ^[21]。

$$f(n+1) = \max(h_1(n+1),h_2(n+1)) + g(n+1) \quad (2)$$

式中: $h_1(n+1)$ 为不考虑障碍物但考虑车辆运动学约束的情况下,当前节点到终点所需路径的距离,通常使用 RS 曲线来计算; $h_2(n+1)$ 为考虑障碍物但不考虑车辆运动学约束的情况下,当前节点到终点的距离,通常使用 A* 算法来计算; $g(n+1)$ 为起点到当前节点的实际代价值。

在搜索过程中,Hybrid A* 算法会不断使用 RS 曲线连接当前节点与终点,如果能获得一条无碰撞的 RS 路径,则搜索结束,否则继续使用上述节点扩展方式进行搜索。

Hybrid A* 算法虽然能够规划出满足车辆始末点位姿和车辆运动学约束的路径,但在使用过程中发现其在高分辨率地图或复杂场景下,规划效率仍然较低、耗费时间仍然较长。图 1 为始末点和障碍物分布图。表 1 为在图 1 所示的环境条件下,在 MATLAB 中用 Hybrid A* 算法对不同地图分辨率进行路径规划耗费时间的结果,仿真区域大小为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。

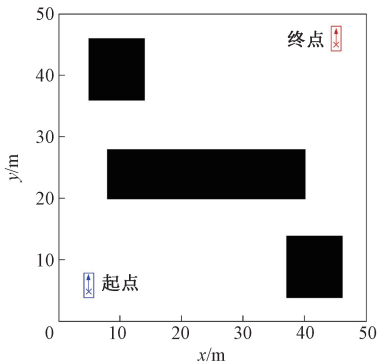


图 1 始末点和障碍物分布图

Figure 1 Distribution of start and end points and obstacles

表 1 不同地图分辨率下 Hybrid A* 算法搜索结果
Table 1 Hybrid A* algorithm search time at different map resolutions

地图分辨率/m	耗费时间/s	搜索节点数
1.0	1.41	339
0.5	3.13	148
0.3	6.34	152

从表 1 可以看出,Hybrid A* 算法的搜索时间会随着地图分辨率的提高大幅度增加,通过分析得出造成此现象的原因有以下两点。

(1) Hybrid A* 算法需要频繁使用 A* 算法来计算新扩展节点的启发值。为了能够高效搜索路径,Hybrid A* 算法会使用 A* 算法计算当前节点到终点的距离,以此作为启发值的一部分。随着地图分辨率的提高,使用 A* 算法的次数会随着 Hybrid A* 算法搜索节点数量增加而增多,A* 单次搜索时间也会随着栅格数量的增加而变长,因此分辨率越高,Hybrid A* 算法搜索用时将会越长。同时,A* 算法搜索的路径通常靠近障碍物,这将使 Hybrid A* 算法在靠近障碍物的范围搜索产生大量位于障碍物内的无效节点。

(2) Hybrid A* 算法的定半径 RS 曲线使用固定曲率曲线连接两个节点,灵活性较低,路径规划时间较长。

1.2 J-Hybrid A* 算法

为了解决上述问题,提升 Hybrid A* 算法搜索效率,本文分别对 Hybrid A* 算法的启发函数 $h(n)$ 、RS 曲线进行改进。

1.2.1 J-Hybrid A* 算法的启发函数

针对 Hybrid A* 算法搜索过程中需要多次调用 A* 算法计算启发值和搜索路径靠近障碍物的问题,本文设计了新的启发函数计算节点启发值。在获得起点、终点位姿后,首先使用 JPS 算法进行起点到终点的路径搜索,然后将 JPS 搜索路径进行拉直,最后根据栅格中心位置和拉直后的路径计算栅格地图的代价值,节点的启发值就是所处栅格的代价值,具体方法如下。

步骤 1 JPS 算法搜索路径。JPS 算法在搜索过程中跳过了大量不感兴趣的点^[22],通过减少搜索过程中遍历节点的数量,提升搜索效率。文献[22]中将 JPS 与其他常见路径搜索算法的效率进行比较,结果表明,JPS 搜索效率明显高于其他算法,且随着地图分辨率的提高,其优势更加显著。因此本文选择使用 JPS 算法来获得一条从起点到

终点的路径。

步骤 2 JPS 算法路径的拉直。在使用 JPS 算法规划出从起点到终点的路径后,通过剔除该路径中的无用点,将路径拉直形成一条新的无碰撞路径,路径搜索与路径拉直如图 2 所示,以此路径作为计算栅格地图代价值基础。

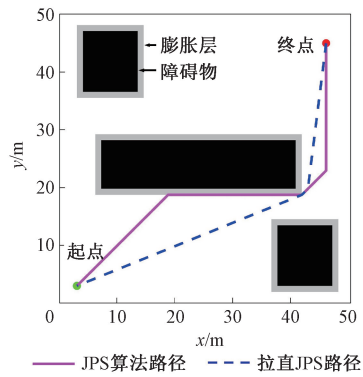


图 2 路径搜索与路径拉直

Figure 2 Path search and path straightening

步骤 3 启发值计算。改进后的启发函数如式 (3) 所示。

$$h(n) = k_1(d(n) + FE) + k_2l(n)。(3)$$

式中: $d(n)$ 为当前栅格中心点 n 到拉直后路径的距离; FE 为垂足点 F 沿拉直路径到终点 E 的折线长度; $d(n)$ 与 FE 二值相加可以使 Hybrid A* 算法在搜索时沿拉直后路径搜索; k_1 为该部分的权重, k_1 越大,则搜索结果越靠近拉直后的路径;同时,为避免 Hybrid A* 算法搜索时在拉直后路径两侧徘徊,再加入栅格中心点 n 到终点 E 的欧几里得距离 $l(n)$; k_2 为该部分的权重。

通过上述方法,可以在 Hybrid A* 算法搜索前得到一个代价地图,如图 3 所示。算法扩展时将节点所处栅格的代价值作为该节点的启发值。

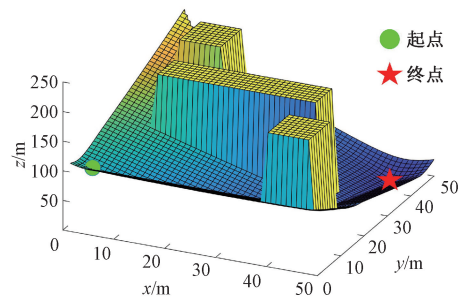


图 3 改进启发函数计算的代价地图

Figure 3 Improved cost maps for heuristic function calculations

1.2.2 优化 Hybrid A* 算法 RS 曲线

RS 曲线能够通过直线和圆弧的组合,再结合车辆前进和后退的运动状态^[23],规划出符合车辆始末

点朝向且满足车辆运动学约束的路径。在 Hybrid A* 算法搜索过程中,如果 RS 曲线能够找到当前节点到终点的无碰撞路径,则搜索提前结束。RS 曲线通常以车辆最小转弯半径进行搜索,该方法有以下两个缺点。

(1)复杂环境中,获得一条无碰撞的路径难度大。只使用最小转弯半径进行搜索,则规划路径的灵活性会大幅降低,难以搜索出一条无碰撞路径。

(2)车辆平稳性难以保证。车辆行驶过程中为了保证车辆平稳、安全地过弯,很少直接使用最小转弯半径行驶。

因此本文采用了变半径 RS 曲线的方法,分别取最小转弯半径曲率的 1 倍、 $\frac{4}{5}$ 、 $\frac{3}{5}$ 、 $\frac{2}{5}$ 、 $\frac{1}{5}$ 进行 RS 曲线搜索,增加 RS 曲线搜索的多样性,以更早获得一条无碰撞的路径。图 4 为改进前后 RS 曲线搜索的对比图,图 4 中虚线部分为 RS 曲线规划的路径,可见改进后的 RS 曲线可以更早规划出一条无碰撞的路径。

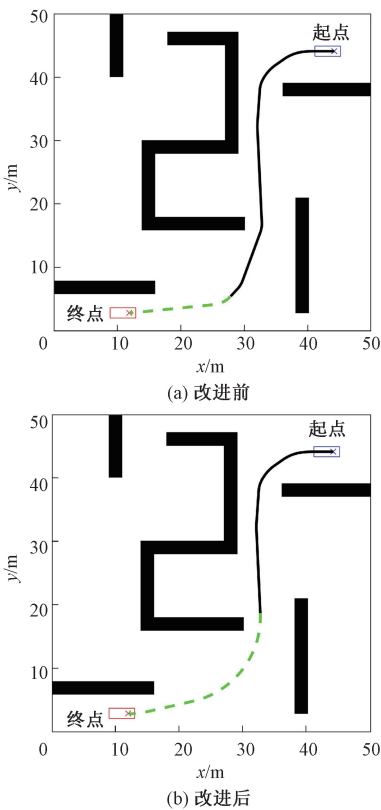


图 4 改进前后 RS 曲线规划对比图

Figure 4 Comparison of RS curve planning before and after improvement

2 算法仿真

为验证改进算法的有效性,使用 MATLAB 2022a 软件进行仿真实验。仿真车辆长度 4.75 m,

宽度 1.6 m,轴距 2.75 m,前悬 1 m,后悬 1 m,前轮最大转角 34° ,仿真区域大小为 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$,障碍物分布、起点、终点、车辆朝向分别如图 5、图 6 所示,图中左下角和右上角的方框分别为车辆在起点、终点的位姿,黑色为障碍物。根据障碍物的数量和分布情况,设置图 5 障碍物数量较少、分布简单的环境和图 6 障碍物数量多、分布较复杂的环境。通过对比传统 Hybrid A* 算法、文献[11]中的反向 Hybrid A* 算法、本文所提 J-Hybrid A* 算法在不同环境中的规划时间、路径长度以及不同地图分辨率下算法的搜索时间,验证所提算法的有效性。仿真算法在 Windows 10、处理器 Intel i5-8265U、内存 16 GB 的环境下运行,实验数据取 20 次实验平均值。

表 2 为 3 种算法在图 5、图 6(a) 所示的简单、复杂环境中,地图分辨率为 1 m 时的搜索结果。从表 2 中可以看出,在简单环境下本文算法分别比传统 Hybrid A* 算法、反向 Hybrid A* 算法^[11] 搜索路径耗时减少了 68%、21%,路径长度分别缩短了 1%、3%。在复杂环境中,本文算法分别比传统 Hybrid A* 算法、反向 Hybrid A* 算法^[11] 搜索路径耗时减少了 59%、27%,路径长度分别缩短了 2%、7%。结果表明,在相同地图分辨率的情况下,不论简单环境还是复杂环境,本文所提 J-Hybrid A* 算法相较于其他两种算法都大幅度减少了搜索时间,在路径长度方面,相较于其他两种算法有小幅提升。

如图 6 所示,地图分辨率越高,则地图进行栅格

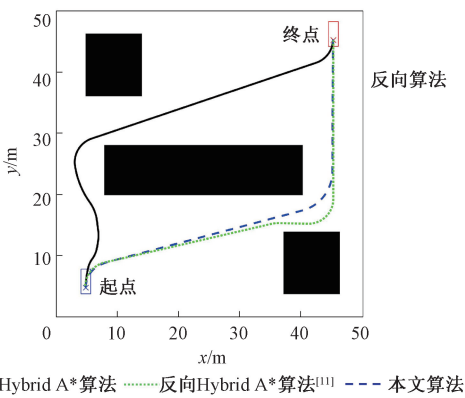


图 5 简单环境下 3 种算法规划结果

Figure 5 Simple environment planning results for three algorithms

化时,划分的栅格数量也就越多,对算法效率的要求也就越高。表 3 为 3 种算法在不同地图分辨率下的规划结果。从表 3 可以看出,本文算法在各种分辨率的地图中搜索效率都优于其他两种算法,并随着地图分辨率的提高,效率提升明显。

3 实车实验

为进一步验证所提 J-Hybrid A* 算法的有效性,使用由思岚 A2 激光雷达、树莓派 4B、STM32F407 及阿克曼小车底盘组建的 ROS 小车,如图 7 所示,进行实验验证。车辆长度 0.30 m,宽度 0.18 m,轴距 0.20 m,前轮最大转角 30° 。通过在树莓派中部署 ROS 开源 move_base 导航功能包^[24],完成传感器

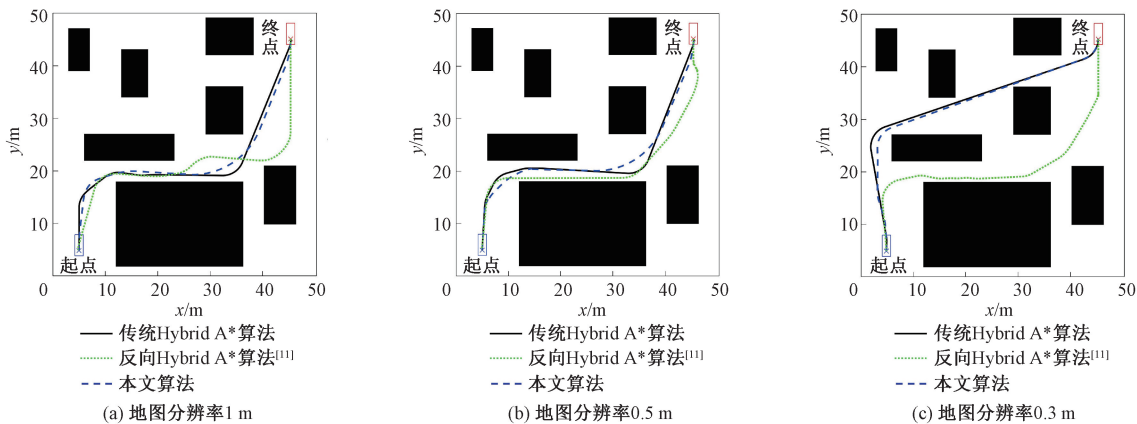


图 6 复杂环境下 3 种算法不同地图分辨率下的规划结果

Figure 6 Complex environment planning results of three algorithms at different map resolutions

表 2 简单环境和复杂环境下 3 种算法路径规划结果

Table 2 Results of three algorithms for path planning in simple and complex environments

算法	简单环境			复杂环境		
	搜索节点数	耗时/s	路径长度/m	搜索节点数	耗时/s	路径长度/m
传统Hybrid A* 算法	339	1.41	70.3	257	1.75	68.3
反向Hybrid A* 算法 ^[11]	199	0.57	71.0	383	0.97	71.9
本文算法	223	0.45	68.3	219	0.71	67.2

表 3 不同地图分辨率下 3 种算法规划结果

Table 3 Results of three algorithms for path planning at different map resolutions

算法	搜索耗时/s		
	地图分辨	地图分辨	地图分辨
	率 1.0 m	率 0.5 m	率 0.3 m
传统Hybrid A* 算法	1.75	5.32	9.06
反向Hybrid A* 算法 ^[11]	0.97	2.03	6.37
本文算法	0.71	1.30	3.43

数据处理、车辆定位、路径规划等上层工作,在 STM32 中完成电机控制、舵机控制等下层工作,树莓派和 STM32 通过串口进行通信。将传统 Hybrid A* 算法、反向 Hybrid A* 算法^[11]、本文算法以 ROS plugin 插件的形式加载到 move_base 框架中,替换原有 Dijkstra 算法进行实验。实验环境为学生实验室,如图 8 所示,实验室内部长 15 m、宽 8 m,室内摆放有桌子、凳子、电脑主机、纸箱等。

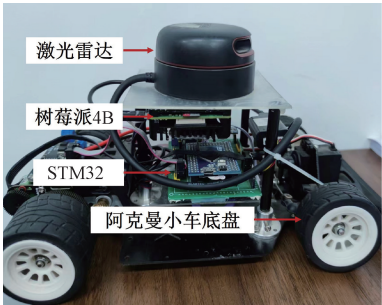


图 7 自主搭建的 ROS 小车

Figure 7 Self-manufactured ROS car

真实环境下 3 种算法实验结果如图 9 所示,其中栅格数量为 584×584 个,地图分辨率为 0.05 m,

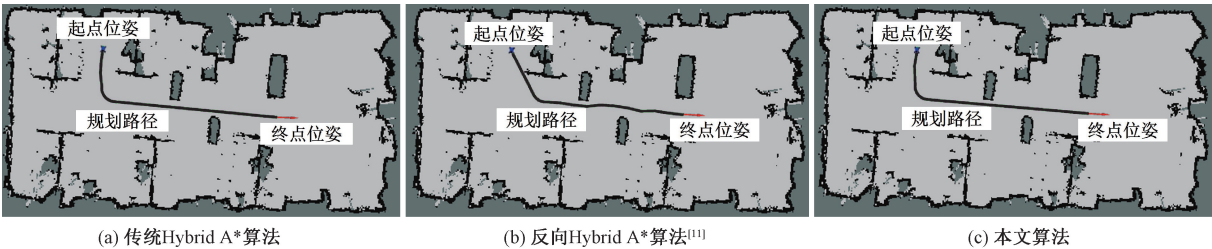


图 9 真实环境下 3 种算法实验结果

Figure 9 Experimental results of three algorithms in a real-world environment

4 结论

本文针对 Hybrid A* 算法规划效率低的问题,从启发函数和 RS 曲线两个方面对 Hybrid A* 算法进行了改进,提出了 J-Hybrid A* 算法。通过引入 JPS 算法、对 JPS 路径拉直、设计新启发函数等方法,缩短了算法计算节点启发值所用的时间。通过将 RS 曲线改为变半径 RS 曲线,使算法能够更早获得一



图 8 实验环境

Figure 8 Experimental environment

小车模型为车辆起点位姿,箭头为车辆终点位姿。从图 9 中可以看出,3 种算法都能找到一条符合车辆运动学的无碰撞路径。在搜索耗时上,传统 Hybrid A* 算法耗时 10.68 s,反向 Hybrid A* 算法^[11]耗时 7.02 s,本文算法耗时 1.21 s,改进后的算法相较于传统 Hybrid A* 算法效率提升了 88%,相较于反向 Hybrid A* 算法效率提升了 82%。Hybrid A* 算法为启发式算法,传统 Hybrid A* 算法和反向 Hybrid A* 算法通过不断调用 A* 算法计算节点的启发值,占用了大量的搜索时间,而本文算法只需调用一次 JPS 算法就能完成启发值的计算,同时对本文算法 RS 曲线进行了改进,使搜索效率得到了显著提升。

实车实验对本文算法在真实环境中的有效性进行了验证。结果表明,无论在本文设置的仿真环境还是在实验室真实环境中,所提 J-Hybrid A* 算法均能有效提升 Hybrid A* 算法的搜索效率,缩短路径规划所需时间。

条无碰撞的 RS 路径,进一步提升了算法的搜索效率。仿真实验表明,在简单环境中,J-Hybrid A* 算法分别比传统 Hybrid A* 算法、反向 Hybrid A* 算法搜索用时减少 68%、21%,在复杂环境中,J-Hybrid A* 算法分别比传统 Hybrid A* 算法、反向 Hybrid A* 算法搜索用时减少 59%、27%。ROS 小车实车实验结果表明,改进后的算法分别比传统 Hybrid A* 算法和反向 Hybrid A* 算法用时减少 88%、82%,进一步验证了

本文所提算法的可行性和优越性。

参考文献：

- [1] 龙邱天. 无人驾驶车辆非结构化道路检测方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
LONG Q T. Research on unstructured road detection method for unmanned vehicles [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023.
- [2] AKRAM M, HABIB A, ALCANTUD J C R. An optimization study based on Dijkstra algorithm for a network with trapezoidal picture fuzzy numbers[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(4): 1329-1342.
- [3] TANG G, TANG C Q, CLARAMUNT C, et al. Geometric A-star algorithm: an improved A-star algorithm for AGV path planning in a port environment[J]. IEEE Access, 2021, 9: 59196-59210.
- [4] 陈江义, 殷笑勇, 王婷婷, 等. 基于改进斥力模型的人工势场局部路径规划[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 83-87, 101.
CHEN J Y, YIN X Y, WANG T T, et al. Local path planning of artificial potential field based on improved repulsive model [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(3): 83-87, 101.
- [5] YE L, WU F Y, ZOU X J, et al. Path planning for mobile robots in unstructured orchard environments: an improved kinematically constrained bi-directional RRT approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108453.
- [6] MIAO C W, CHEN G Z, YAN C L, et al. Path planning optimization of indoor mobile robot based on adaptive ant colony algorithm [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156: 107230.
- [7] DOLGOV D, THRUN S, MONTEMERLO M, et al. Practical search techniques in path planning for autonomous driving[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artifical Intelligence. Wasington DC: AAAI, 2008: 32-37.
- [8] 崔高健, 陆柏霖, 贺红春, 等. 基于逆向 Hybrid A* 算法的自动泊车路径规划[J]. 长春工业大学学报, 2022, 43(4/5): 627-633.
CUI G J, LU B L, HE H C, et al. Automatic parking path planning based on reverse Hybrid A* [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2022, 43(4/5): 627-633.
- [9] 陈翔翔. 基于 Hybrid A* 算法的自动泊车路径规划与跟踪控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
CHEN X X. Research on Hybrid A* algorithm path planning and tracking control for automatic parking [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [10] 张会丽, 钱徽, 陈武斌, 等. 基于连续状态空间的启发式路径规划算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(增刊 2): 374-377, 381.
ZHANG H L, QIAN H, CHEN W B, et al. Heuristic path planning algorithm in continuous state spaces [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(S2): 374-377, 381.
- [11] 曹彦博, 颜京才, 李旭升, 等. 基于改进混合 A* 算法的自动泊车系统路径搜索方法[J]. 汽车技术, 2023(6): 37-41.
CAO Y B, YAN J C, LI X S, et al. A method of path search for automatic parking system based on improved Hybrid A* algorithm [J]. Automobile Technology, 2023(6): 37-41.
- [12] 秦东晨, 张文灿, 王婷婷, 等. 受限泊车通道下自动驾驶平行泊车的路径规划方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(5): 1-7.
QIN D C, ZHANG W C, WANG T T, et al. A path planning method for parallel parking in constrained parking channels [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(5): 1-7.
- [13] 陈鑫鹏, 徐彪, 胡满江, 等. 一种基于等步长分层拓展的混合 A* 路径规划方法[J]. 控制与信息技术, 2021(1): 17-22, 29.
CHEN X P, XU B, HU M J, et al. A Hybrid A* path planning method based on equal step hierarchical expansion [J]. Control and Information Technology, 2021(1): 17-22, 29.
- [14] SEDIGHI S, NGUYEN D V, KUHNERT K D. Guided Hybrid A-star path planning algorithm for valet parking applications[C]//2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Piscataway: IEEE, 2019: 570-575.
- [15] 邓穆坤, 刘勇, 黄佳德, 等. 基于混合 A* 算法的无人驾驶矿用卡车路径优化研究[J]. 控制与信息技术, 2022(5): 60-67.
DENG M K, LIU Y, HUANG J D, et al. Research on Hybrid A* based path optimization of unmanned mine truck [J]. Control and Information Technology, 2022(5): 60-67.
- [16] 胡智焕, 杨子恒, 张卫东. 基于混合 A* 搜索和贝塞尔曲线的船舶进港和靠泊路径规划算法[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 220-229.
HU Z H, YANG Z H, ZHANG W D. Path planning for auto docking of underactuated ships based on Bezier curve and Hybrid A* search algorithm [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 220-229.
- [17] BONETTI A, GUIDETTI S, SABATTINI L. Improved

path planning algorithms for non-holonomic autonomous vehicles in industrial environments with narrow corridors: roadmap Hybrid A* and waypoints Hybrid A* [C] // 2023 European Conference on Mobile Robots (ECMR). Piscataway: IEEE, 2023: 1–7.

[18] TANG B J, HIROTA K, WU X D, et al. Path planning based on improved Hybrid A* Algorithm[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2021, 25(1): 64–72.

[19] MENG T C, YANG T H, HUANG J, et al. Improved Hybrid A-star algorithm for path planning in autonomous parking system based on multi-stage dynamic optimization [J]. International Journal of Automotive Technology, 2023, 24(2): 459–468.

[20] DANG C V, AHN H, LEE D S, et al. Improved analytic expansions in Hybrid A-star path planning for non-holonomic robots [J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 5999.

[21] 吴梓聪. 基于改进 Hybrid A* 算法的移动机器人路径规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

WU Z C. Research on path planning of mobile robot based on improved Hybrid A* algorithm[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[22] 邱磊, 刘辉玲, 雷建龙. 跳点搜索算法的原理解释及性能分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2016, 33(1): 80–87.

QIU L, LIU H L, LEI J L. Principle explanation and performance analysis of jump point search algorithm[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2016, 33(1): 80–87.

[23] 姚智龙, 张小俊, 王金刚. 改进 Bi-RRT* 算法的自动泊车路径规划[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(6): 1063–1071.

YAO Z L, ZHANG X J, WANG J G. Automatic parking path planning with improved Bi-RRT* algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(6): 1063–1071.

[24] RAJENDRAN G, UMA V, O’ BRIEN B. Unified robot task and motion planning with extended planner using ROS simulator[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2022, 34(9): 7468–7481.

The Hybrid A* Planning Algorithm Based on JPS and Variable Radius RS Curves

ZHANG Boqiang¹, ZHANG Chenglong¹, FENG Tianpei¹, GAO Xiangchuan²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the problems of Hybrid A* algorithm’s, such as low search efficiency and long time consumption in high-resolution map of complex scenes, J-Hybrid A* algorithm was proposed after analyzing the factors affecting the search efficiency of traditional Hybrid A* algorithm. Firstly, before Hybrid A* algorithm expanded its nodes, JPS algorithm was used to search the path from the starting point to the end point, and the path was straightened and processed as the basis for calculating the node heuristic value, which reduced the time required for Hybrid A* to calculate the heuristic value when expanding the nodes. Second, a new function is created to calculate all of the node heuristic values before the Hybrid A* algorithm is expanded. This reduces the time needed to calculate the heuristic values when Hybrid A* expands the nodes. Finally, the change of the RS curve from minimum turning radius search to variable radius RS curve search enabled the RS curve to search for a collision-free path earlier, which further accelerated the search of the Hybrid A* algorithm. The results of the simulation demonstrate that the enhanced J-Hybrid A* algorithm reduced the search time by 68% and 21% in comparison to the conventional Hybrid A* algorithm and the reverse Hybrid A* algorithm in straightforward environments. In complex environments, the reduction in search time was 59% and 27%. Furthermore, the planning efficiency is markedly enhanced with the increase of map resolution in diverse resolution map scenarios. Experiments conducted on actual vehicles demonstrated that the J-Hybrid A* algorithm, reduced the search time by 88% and 82% in comparison to the traditional Hybrid A* algorithm and the reverse Hybrid A* algorithm. This effectively enhanced the search efficiency of the Hybrid A* algorithm and reduced the time required for path planning.

Keywords: Hybrid A* algorithm; heuristic function; JPS algorithm; RS curve; path planning