

本文引用格式：张建,贡益明,商飞.自动驾驶车辆越野全局路径规划算法[J].自动化与信息工程,2026,47(3):1-7.

ZHANG Jian, GONG Yiming, SHANG Fei. Autonomous vehicle off-road global path planning algorithm[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(3):1-7.

自动驾驶车辆越野全局路径规划算法*

张建 贡益明 商飞

(江苏航空职业技术学院, 江苏 镇江 212134)

摘要：当前自动驾驶车辆的研究主要集中在结构化道路场景，当车辆需要在无道路的山地环境中越野行驶时，需自主规划可行路径。本文提出一种改进的 A* 算法，用于实现车辆在无道路山地条件下的自主全局路径规划。该算法重点考虑车辆的通过能力，减少车辆上下坡过程并避开路面崎岖位置，以提升车辆行驶平顺性。仿真测试结果表明，该算法能够在复杂地形中有效规划出平稳的全局路径。

关键词：A* 算法；路径规划；越野场景；非结构化道路

中图分类号：TP301.6

文献标志码：A

文章编号：1674-2605(2026)03-0001-07

DOI：10.12475/aie.20260301

开放获取

Autonomous Vehicle Off-road Global Path Planning Algorithm

ZHANG Jian GONG Yiming SHANG Fei

(Jiangsu Aviation Technical College, Zhenjiang 212134, China)

Abstract: Current research on autonomous vehicles predominantly focuses on scenarios with structured roads. When vehicles need to drive off-road in roadless mountainous areas, autonomous feasible path planning becomes indispensable. This paper proposes an improved A* algorithm to realize autonomous global path planning for vehicles in roadless mountainous environments. The proposed algorithm prioritizes the trafficability of the vehicle, reduces uphill and downhill driving sections, and avoids the rough position on the terrain to enhance driving smoothness. Finally, simulation experiments verify the performance of the algorithm, which can generate smooth global paths in complex terrain.

Keywords: A* algorithm; path planning; off-road scenario; unstructured road

0 引言

近年来，自动驾驶技术已逐步走进大众视野。在城市结构化道路上，依靠高精度地图、激光雷达及视觉融合技术，自动驾驶车辆已能够实现点对点的行驶任务，自主规划避障路径并沿路径行驶^[1]，完成人员与货物的运输。其在封闭的仓储、港口等区域也已落地应用^[2]。同时，农业无人作业车辆也已得到广泛推广，可在田间自主规划作业路径并有效规避障碍物。然而，当前主流无人车辆的路径规划仍无法同时摆脱对结构化道路和平坦地形的依赖。当车辆行驶在偏远山区，或因特殊情况导致既有道路封闭时，为到达目

的地，车辆将不得不驶上崎岖地形。在此背景下，原有路径规划算法面临巨大挑战，亟需进一步提升对非结构化与非平坦地形的适应能力。

目前，常见的全局路径规划算法包括快速遍历随机树（rapidly-exploring random trees, RRT）算法^[3]、Dijkstra 算法^[4]及 A* 算法^[5]等。其中，RRT 算法通过在空间中随机采样形成节点，从起点节点开始迭代搜索并扩展分支，将新节点不断加入树节点中，直至到达终点区域。得益于其能够快速得到无碰撞的路径，RRT 算法得到了广泛应用。文献[6]提出一种快速动态方向引导算法，该算法基于方向引导策略，动态约束子节点和随机节点的搜索空间，减少原 RRT 算法

* 基金项目：国家自然科学基金（61401211）

中的冗余分支, 进而提高算法效率。文献[7]针对 RRT 算法在搜索过程过于随机、路径不平滑的问题, 提出了多策略融合 RRT 算法, 通过偏置扩展策略扩展采样点, 并使用剪枝与三次 B 样条曲线对路径进行拟合优化, 有效提升了路径质量与搜索效率。

Dijkstra 算法采用贪心策略, 逐步扩展至未探索节点, 并最终找到所有节点的最短路径。文献[8]提出一种基于权值控制的粒子群优化 Dijkstra 算法, 用于机器人路径规划。仿真测试结果表明, 该优化算法可规划出无碰撞、距离短且平滑的路径。文献[9]在传统 Dijkstra 算法基础上提出了反向标记 Dijkstra 算法, 该算法在考虑路口时间消耗的情况下规划车辆路径。仿真测试结果证明, 该算法的收敛速度优于其他算法, 且运行时间最短。

A*算法作为经典的路径规划算法, 借助启发函数引导, 相比其他算法具有更好的性能与准确性。文献[10]针对复杂环境下传统 A*算法路径规划速度慢等问题, 提出一种结合 A*算法与动态窗口法 (dynamic window approach, DWA) 的改进融合算法。该算法首先利用增强的 A*算法规划全局路径, 然后使用 DWA 算法在全局路径上进行局部路径规划; 改进后的融合算法在规划时间、路径转弯次数等性能上均有明显提升。文献[11]针对传统 A*算法规划路径未考虑车辆动力学约束, 导致实际驾驶不可行的问题, 通过采用曲率约束的 A*算法并引入路径平滑度成本函数, 以找到光滑、曲率小的合适路径。

当自动驾驶车辆处于非结构化道路环境时, 需自主规划行驶路径, 以规避障碍物并找到到达终点的最优路径。文献[12]针对非结构化道路环境下的导航问题, 提出了基于改进 RRT 算法与非线性模型预测控制器 (nonlinear model predictive control, NMPC) 的两层路径规划方法。该方法通过引入地形感知的动态补偿和航向角约束策略, 提高算法的适应性与搜索效率。文献[13]综合考虑坡度、地面类型及车辆通过性因素, 提出一种无人车辆越野路径规划方法, 利用人工势场法形成目标引导层, 对坡度、地面类型等因素进行网格通行成本的定量评估, 最后采用综合约束的 A*算

法完成路径规划, 该方法能够有效规划出考虑地形通过性的可行越野路径。文献[14]针对长距离越野路径规划问题, 提出一种基于地形数据的改进 A*算法。该算法基于数字高程模型生成地形数据地图, 通过改进数据结构显著降低了算法的时间复杂度, 并调整了路径搜索策略, 提高算法执行效率。

综上所述, 当前路径规划算法主要针对结构化道路或存在越野路段的道路进行路径规划, 这限制了车辆的行驶范围。当车辆需在无道路地形上行驶时, 必须寻找路径长度与坡度代价最小的可行路径。

本文聚焦于无道路条件的山地场景, 针对自动驾驶车辆越野全局路径规划问题, 设计相应的全局路径规划方法, 以扩展自动驾驶车辆的行使范围。

1 改进的 A*路径规划算法

1.1 传统 A*算法概述

A*算法因其出色的性能, 在各类路径规划研究中得到广泛应用。传统 A*算法使用启发式函数, 可在二维栅格地图中搜索最优路径。其代价函数如下:

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

式中: $f(n)$ 为节点 n 的综合优先级, $g(n)$ 为节点 n 到起点的距离代价, $h(n)$ 为节点 n 到终点的预估代价。A*算法通过搜索栅格地图中综合代价最小的节点集合, 进而确定最优路径。该算法使用两个集合 OpenList 和 CloseList, 分别保存待遍历节点与已遍历节点。每次从 OpenList 中选取综合代价最小的节点进行扩展, 最终抵达终点。算法流程如下:

- 1) 初始化生成 OpenList、CloseList、PathList, 并将开始节点插入 OpenList;
- 2) 若 OpenList 非空, 则从中选出 $f(n)$ 值最小的点作为当前节点, 将其从 OpenList 移至 CloseList;
- 3) 遍历当前节点附近的相邻可行节点, 若该相邻节点不在 OpenList 中, 则将其加入至 OpenList 与 PathList 中, 并计算启发式距离代价; 若该相邻节点已在 OpenList 中, 则重新计算其 $g(n)$ 值, 若新代价小于原代价, 则更新该节点的父节点与 $g(n)$ 值;

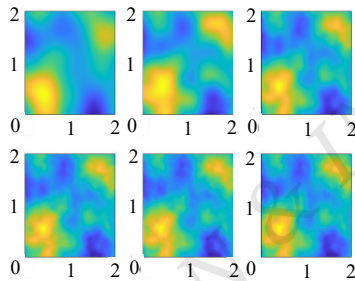
4) 迭代移动至后续节点,直至当前节点为终点,算法结束;若 OpenList 为空,或当前节点已在 CloseList 中,则 A*算法终止,表示无法找到可行的最短路径。

1.2 三维仿真地形建立

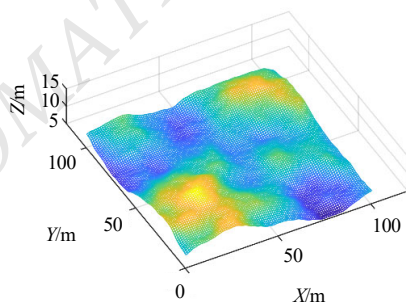
传统的路径规划算法基于二维栅格地图,仅能表示平面内障碍物的位置。为将高度信息引入栅格地图内,本文使用三维栅格地图,在原有二维栅格基础上增加 z 轴方向的高度信息。新的三维栅格地图 M 表达如下:

$$M = \{[x_1, y_1, z_1]; [x_2, y_2, z_2]; L; [x_n, y_n, z_n]\} \quad (2)$$

真实地形包含较大尺度的变化(如山丘)和小尺度的变化(如小土堆),同时存在树木等障碍物。为降低场景复杂性,本文生成的地形不考虑附着于地表的其他障碍物。越野山地地形通常连续变化,为模拟其形态,测试场景地图使用基于二维 Perlin 噪声的分形噪声(fractal noise)随机生成^[15]。通过叠加不同强度的噪声,生成包含大范围坡度变化以及局部凸起的连续地形,如图 1 所示。



(a) Perlin 噪声叠加过程



(b) 最终生成结果

图 1 Perlin 噪声仿真地形

1.3 基于改进 A*算法的三维路径规划算法

自动驾驶车辆在三维环境中搜索可行路径,需要考虑以下因素:路径距离、高度变化及车辆可通过性。路径越短,能量消耗与行驶时间越少;地形起伏的高度变化会增加能耗,并降低乘坐人员的舒适度。同时,过于陡峭的地形会导致车辆通行困难,增加车辆侧翻风险。因此,在改进路径规划算法时应充分考虑上述因素。

当算法在栅格地图中搜索路径时,当前节点的邻近可行方向如图 2 所示。此时需评估各待选节点的可通过性。沿路径方向需考虑车辆的爬坡能力,需保证路径纵向坡度小于车辆最大俯仰角;在路径的法向上则需保证路径的侧向坡度始终小于车辆允许的最大侧倾角。当某一方向的坡度大于车辆极限时,则将该方向视为不可通行,并排除对应的待选节点。

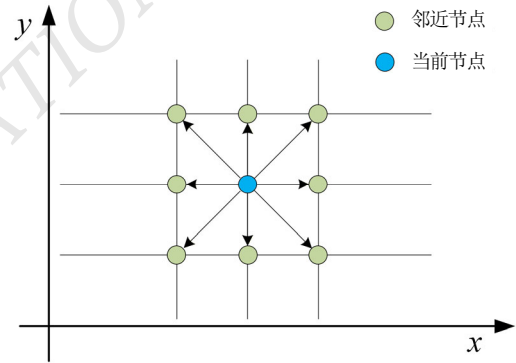


图 2 A*算法中当前节点的邻近可行方向

上述约束可表示为

$$\begin{aligned} |i_x| &\leq \tan \theta_{\max} \\ |i_y| &\leq \tan \varphi_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: i_x 、 i_y 分别为车辆所处点位纵向、横向坡度, $\theta_{\max}$ 、 $\varphi_{\max}$ 分别为车辆最大俯仰角以及最大侧倾角。

当算法扩展新节点时,节点代价应同时考虑坡度变化的影响。车辆的横向与纵向对坡度的承受能力略有不同^[16],通常,车辆的轴距大于轮距,这使得车辆在纵向上具有较好的抗俯仰能力,但在横向上由于轮距相对较窄、支撑宽度有限,导致车辆在横向坡度更易发生侧翻,而纵向坡度的增加主要影响车辆爬坡性

能。为此，本文设计坡度代价函数以及新节点的距离代价函数如下：

$$c_{\text{slope}} = |i_x| \cdot w_x + |i_y| \cdot w_y \quad (4)$$

$$g(n') = g(n) + d + c_{\text{slope}}^2 \quad (5)$$

式中： c_{slope} 为节点的坡度代价， w_x 、 w_y 分别为横向与纵向的坡度代价系数， $g(n')$ 为新节点的代价函数， d 为当前节点至下一节点的距离代价。

A*算法的另一个重要部分是启发式函数，主要用于估计当前节点到终点的预估代价。部分改进 A*算法通过改变启发式函数的距离计算方式以提升路径搜索效率，并缩短最优路径长度^[17]。但在三维地形条件下，算法需考虑节点与终点之间的高度差。此外，跨越多个节点时会忽略路面起伏的累积成本。因此，本文未沿用扩大节点搜索范围的改进思路，而是在启发式函数中引入高度差。改进后的启发式函数如下：

$$h(n) = \sqrt{(dx^2 + dy^2)} + k \cdot \text{abs}(dz) \quad (6)$$

式中： $h(n)$ 为改进后的启发式函数， dx 、 dy 分别为当前节点与终点之间的横向与纵向绝对距离， k 为高度差系数， dz 为当前节点与终点之间的高度差。改进后的启发式函数中，当前节点与终点的关系示意图如图 3 所示。

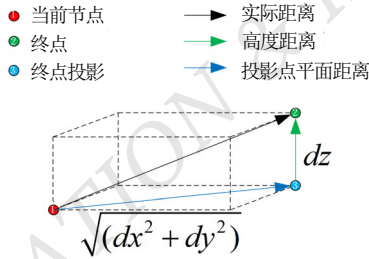
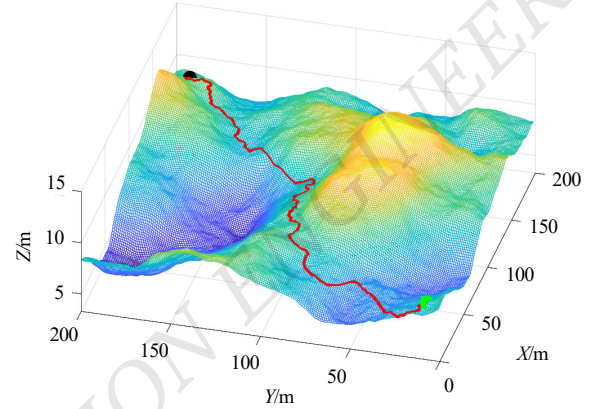


图 3 改进后启发式函数中当前节点与终点的关系示意图

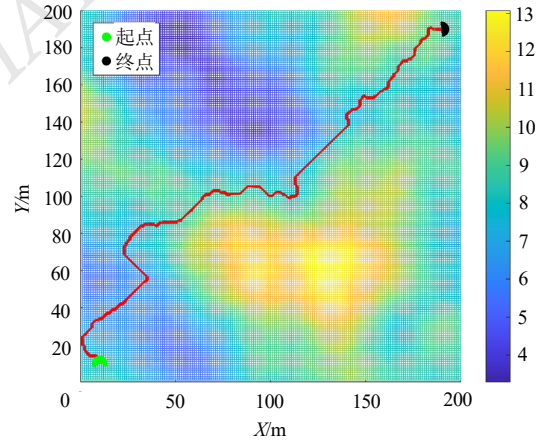
与公式(1)中的标准启发式函数相比，本文改进后的启发式函数在保留其基本形式的同时，将横向搜索距离与纵向高度差分为两部分，以便在不同情况下调整高度差变化的权重。通过将三维高度差纳入启发式函数中，算法在搜索路径时优先搜索与终点高度相近的节点，避免车辆不必要的爬坡与下坡。

2 改进 A*路径规划算法的仿真测试

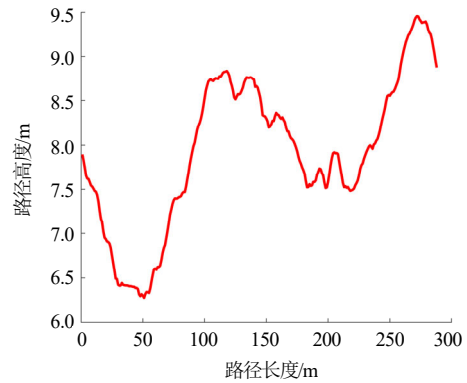
为验证本文改进算法的有效性，在 MATLAB 环境下，采用分形噪声随机生成的地形进行仿真测试。测试场景为边长 200 m 的正方形区域，栅格分辨率为 1 m，路径起点与终点分别布置在场景的对角线位置，路径允许的横向与纵向坡度最大阈值分别设定为 0.2 和 0.3。仿真测试结果如图 4、5 所示。



(a) 路径规划三维结果



(b) 路径规划结果俯视图



(c) 路径高度、长度变化结果

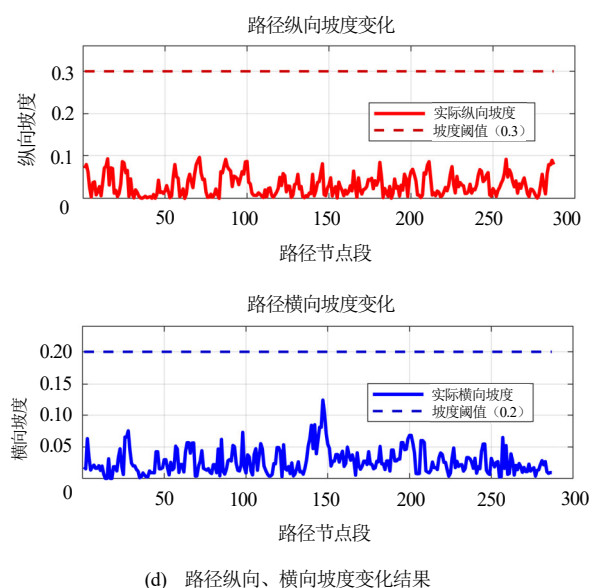


图4 场景一的路径规划仿真测试结果

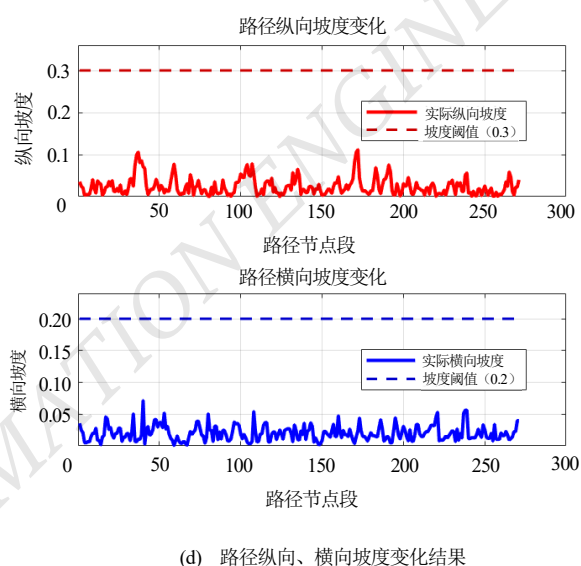
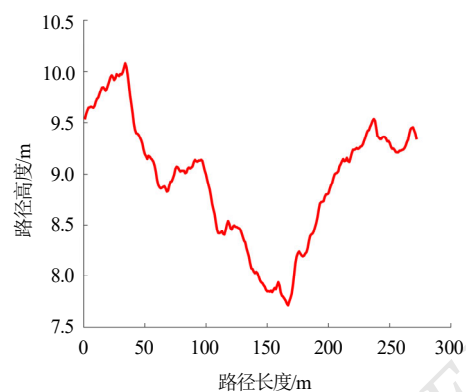
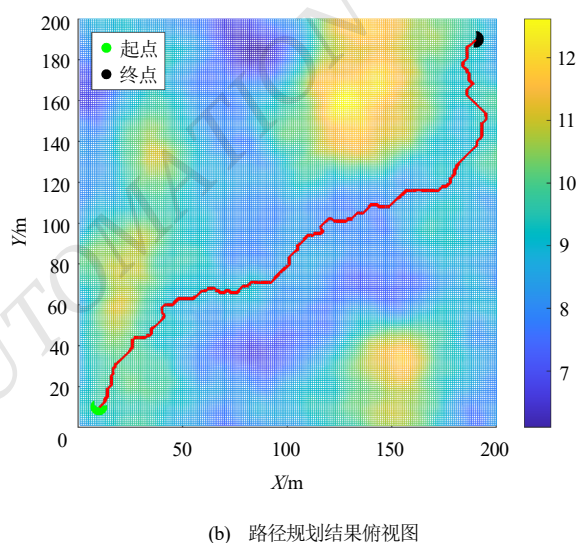
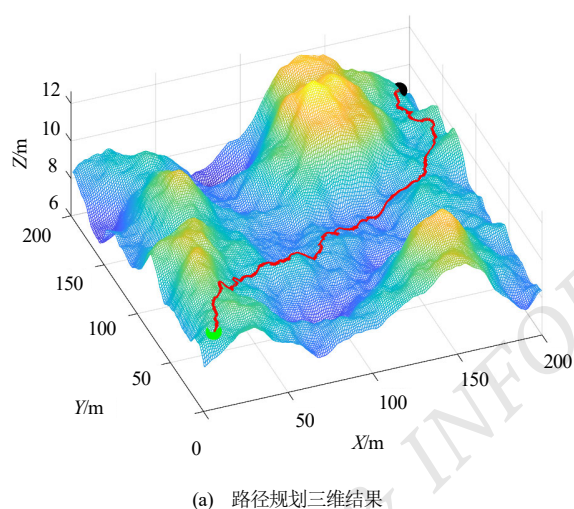
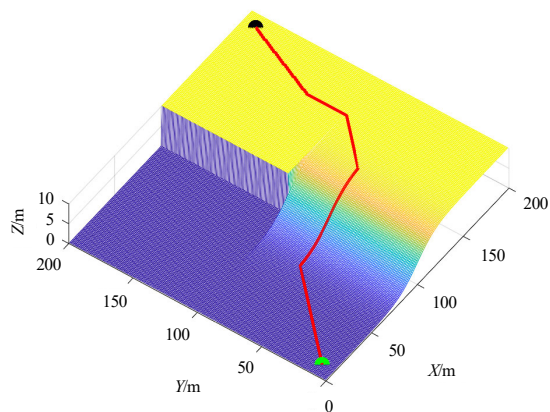


图5 场景二的路径规划仿真测试结果

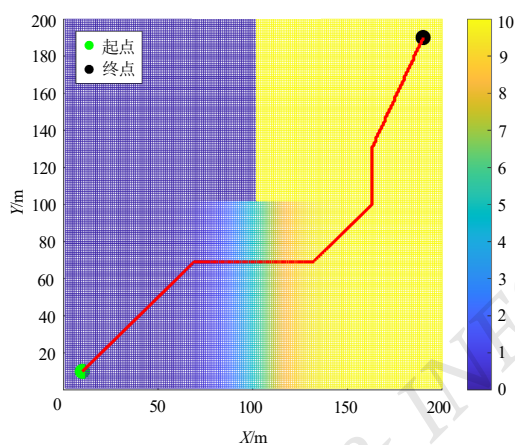
通过分形噪声生成的随机地形包含凸起与凹陷区域,并随机分布在测试场景中,能够较为理想地检验算法的三维路径规划能力。如图4所示的场景一路径规划仿真测试中,地形最高值为13.08 m,最低值为3.30 m,起点高度为7.90 m,终点高度为8.87 m。该场景总体高度差大,地形起伏较为明显。本文算法规划出的路径避开了位于地形中下部的凸起地形及位于上侧区域的凹陷地形,如图4(b)中深蓝色区域所示。如图5所示的场景二的路径规划仿真测试中,地形最高值为12.62 m,最低值为6.10 m,起点高度为9.54 m,终点高度为9.33 m,地形起伏相对较小。从起点出发后,算法规划出的路径沿着地形中较为平滑的区域移动,在接近终点时避开了位于左侧的凸起地形。两次仿真测试中,路径高度变化均较为平稳且路

径各点位的横向与纵向坡度均在设定阈值以内。

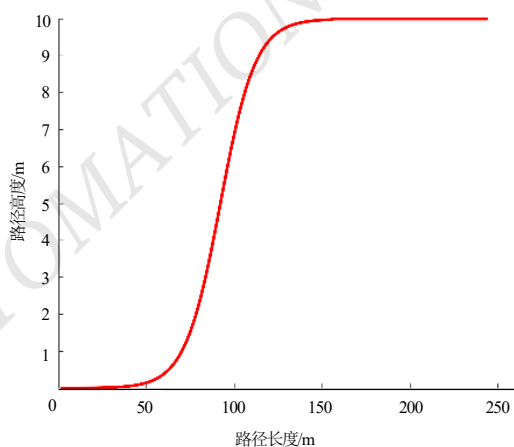
为验证该算法在特殊场景下的性能,本文设计了包含有大型路面断崖的测试场景,特殊场景路径规划仿真测试结果如图 6 所示。



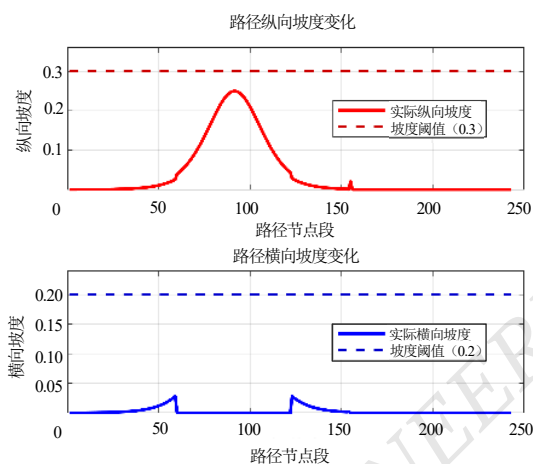
(a) 路径规划三维结果



(b) 路径规划结果俯视图



(c) 路径高度、长度变化结果



(d) 路径纵向、横向坡度变化结果

图 6 特殊场景路径规划仿真测试结果

该场景采用拼接方式构建:上方区域采用阶跃函数生成断崖地形,下方区域则采用 Sigmoid 函数生成坡面地形,以模拟路径规划区域中存在大型断崖的危险路段。仿真测试结果表明,该算法能够在特殊场景中避开断崖区域,并且在 Sigmoid 函数生成的坡面区域,算法选择沿斜坡方向规划路径,减少了车辆在坡面的移动距离。

综上所述,改进的 A*算法可在崎岖地形中规划出起伏平缓的路径,并有效规避起伏明显的危险路段。

3 结论

为拓展自动驾驶车辆的应用场景,使其在无道路的越野地形中有效规划全局路径,本文提出了一种改进的 A*算法。该算法通过改进代价函数与启发式函数,增强算法适应路面高度变化的能力。仿真测试在 MATLAB 环境下进行,采用 Perlin 噪声算法模拟地形的连续随机变化,并生成测试栅格地图。仿真测试结果表明,该算法可在崎岖地形中搜索出较为平滑、无严重侧倾且距离较短的最优路径。本文的不足在于:当前算法在栅格地图中生成的路径仍不够平滑,在地形较小、凸起过多时,算法易规划出频繁转弯的路径,导致局部曲率过大,无法满足车辆动力学约束。此外,在应用于更大规模场景时,算法的搜索效率仍有提升空间,后续将针对上述不足之处进行改进。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] ZHANG J, YANG M, CHEN Y D, et al. Research on sliding mode control for path following in variable speed of unmanned vehicle[J]. Optimization and Engineering, 2025,26(3):1641-1668.
- [2] 廉胤东, 苟彬, 李超磊, 等. 基于启发式能耗优化的电力仓储分布式多 AGV 路径规划方法[J]. 自动化与信息工程, 2024, 45(5):40-46;53.
- [3] GANESAN S, RAMALINGAM B, MOHAN R E. A hybrid sampling-based RRT* path planning algorithm for autonomous mobile robot navigation[J]. Expert Systems with Applications, 2024,258:125206.
- [4] ALSHAMMREI S, BOUBAKER S, KOLSI L. Improved dijkstra algorithm for mobile robot path planning and obstacle avoidance[J]. CMC-Computers Materials & Continua, 2022, 72(3):5939-5954.
- [5] 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: 1018123.
- [6] ZHANG R X, XU Q, SUN K, et al. A vehicle path planning algorithm: QDDG-RRT[J]. IEEE Access, 2025,13:90212-90222.
- [7] LEI S J, LI T Y, GAO X C, et al. Research on improved RRT path planning algorithm based on multi-strategy fusion[J]. Scientific Reports, 2025,15(1):13312.
- [8] SUNDARRAJ S, REDDY R V K, BASAM M B, et al. Route planning for an autonomous robotic vehicle employing a weight-controlled particle swarm-optimized dijkstra algorithm[J]. IEEE Access, 2023,11:92433-92442.
- [9] ZHU D D, SUN J Q. A new algorithm based on dijkstra for vehicle path planning considering intersection attribute[J]. IEEE Access, 2021,9:19761-19775.
- [10] LUO Y X, LIN S S, WANG Y F, et al. Optimized path planning for autonomous guided vehicle through fusion of improved A* and dynamic window approach[J]. IEEE Access, 2025,13: 68577-68586.
- [11] SCHICHLER L, FESTL K, SOLMAZ S, et al. A cost-effective approach to smooth A* path planning for autonomous vehicles [C]//2024 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC). IEEE, 2024:1-6.
- [12] SONG J, XU S C, FENG C, et al. An improved rapidly-exploring approach to off-road path planning by leveraging dynamic velocity constraints and trajectory smoothing[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2026,20(1):e70148.
- [13] LIU Q Y, YOU X, ZHANG X, et al. Unmanned vehicle off-road path-planning method with comprehensive constraints on multiple environmental factors[J]. International Journal of Digital Earth, 2024,17(1):2408453.
- [14] HONG Z H, SUN P F, TONG X H, et al. Improved a-star algorithm for long-distance off-road path planning using terrain data map[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021,10(11):785.
- [15] JAIN A, SHARMA A, RAJAN K S, et al. Adaptive & multi-resolution procedural infinite terrain generation with diffusion models and Perlin noise[C]//Proceedings of the Thirteenth Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing, 2022:1-9.
- [16] CAO M C, WU G, YAN S X, et al. Control strategy of vehicle anti-rollover considering driver's characteristic[J]. IEEE Access, 2020,8:128264-128281.
- [17] YIN X, CAI P, ZHAO K W, et al. Dynamic path planning of AGV based on kinematical constraint A* algorithm and following DWA fusion algorithms[J]. Sensors, 2023,23(8): 4102.

作者简介:

张建, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 助教, 主要研究方向: 自动驾驶车辆路径规划与跟踪控制. E-mail: 2257361899@qq.com

贡益明 (通信作者), 男, 1989 年生, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 仪器仪表与自动化检测技术等。

E-mail: 253460613@qq.com

商飞, 男, 1981 年生, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 机器视觉、图像处理等. E-mail: 244626193@qq.com