

中文引用格式:王平,张昊,唐友名,等. 基于 Voronoi 骨架的狭窄道路 AGV 路径规划[J]. 中国安全科学学报,2026,36(4):194-203.
英文引用格式:Wang Ping, Zhang Hao, Tang Youming, et al. AGV path planning based on Voronoi skeleton for narrow roads[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 194-203.

基于 Voronoi 骨架的狭窄道路 AGV 路径规划*

王平^{1,2}讲师,张昊¹,唐友名^{**3}教授,张义^{1,2}讲师

(1 厦门理工学院 机械与汽车工程学院,福建 厦门 361024;2 福建省客车先进设计与制造重点实验室,福建 厦门 361024;3 浙江科技大学 智能制造与能源工程学院,浙江 杭州 310023)

中图分类号:X951;TP242.6 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0245
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3406500);福建中青年教师教育科研项目(JAT210349, JZ240062);浙江省自然科学基金资助(LBMHY25B030003)。

【摘要】 针对自动导引车(AGV)在狭窄道路场景下路径规划存在安全距离不足、路径不平滑、规划效率低的问题,提出一种基于 Voronoi 骨架的狭窄道路路径规划方法。首先,提取 Voronoi 骨架关键节点生成自定义的 Voronoi 图层,与静态层、障碍物层、膨胀层融合迭代生成 4 层网络结构的新代价地图,精确区分障碍物的影响范围;然后,以新代价地图为约束结合改进后的 A* 算法规划全局路径,引导 AGV 沿道路中心行驶,保障 AGV 的行驶安全;最后,对全局路径进行 B 样条平滑优化,提高 AGV 通过狭窄道路等复杂场景的高效性和稳定性。结果表明:狭窄道路场景下 AGV 路径规划平均距离指标的安全性提升 82%、空间拐点数减少 55.85%、路径规划时间缩短 48.98%。该算法有效提升了狭窄道路场景下路径规划的鲁棒性、算法实时性,使 AGV 能以最安全的方式移动。

【关键词】 Voronoi 骨架; 狭窄道路; 自动导引车(AGV); 路径规划; 4 层网络结构; B 样条优化

AGV path planning based on Voronoi skeleton for narrow roads

Wang Ping^{1,2}, Zhang Hao¹, Tang Youming³, Zhang Yi^{1,2}

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen Fujian 361024, China; 2 Fujian Province Key Laboratory of Advanced Bus Design and Manufacturing, Xiamen Fujian 361024, China; 3 School of Intelligent Manufacturing and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: This paper addressed the issues of insufficient safety distance, unsmooth path, and low planning efficiency in AGV path planning in narrow road scenarios. A new path planning method based on Voronoi skeletons for narrow roads was proposed. Firstly, the key nodes of the Voronoi skeleton were extracted to generate a custom Voronoi graph layer, which was then combined with static, obstacle, and expansion layers to iteratively generate a four-layer network structure cost map, accurately distinguishing the influence range of obstacles. Secondly, the new cost map was used as a constraint in conjunction with an improved A* algorithm for global path planning, guiding the AGV to drive along the center of the road to ensure its safety. Finally, the global path was optimized using B-spline smoothing to improve the AGV

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0194-10; 收稿日期:2025-11-04; 修稿日期:2026-01-17

** 通信作者:唐友名(1981—),男,湖南祁东人,博士,教授,主要从事汽车跨域安全集成与医工交叉技术、电池安全与热管理技术等方面的研究。E-mail: tangym1981@126.com。

s efficiency and stability in navigating narrow roads and other complex scenarios. Experimental results show that, in narrow road scenarios, the safety of the AGV path planning is improved by 82%, the number of spatial corners is reduced by 55.85%, and the path planning time is shortened by 48.98%. The proposed algorithm effectively enhances the robustness, dynamic obstacle avoidance, and real-time performance of path planning in narrow road scenarios, enabling the AGV to move in the safest manner.

Keywords: Voronoi skeleton; narrow roads; automated guided vehicle (AGV); path planning; four-layer network structure; B-spline optimization

0 引言

自动导引车 (Automated Guided Vehicle, AGV) 已广泛应用于工农业、仓储物流、搜救服务等领域, AGV 的路径规划是现代智能交通和自动驾驶的关键技术^[1]。其中, 物流仓储主要为空间狭小且伴随多样静态障碍物的通道场景, 因此, 对 AGV 在狭窄通道场景下导航和自主行驶的安全性、移动效率提出更高要求^[2]。传统的 AGV 全局路径规划算法有 A* 算法^[3]、Dijkstra 算法^[4]、蚁群算法^[5]等, 局部路径规划算法采用时间弹性带法^[6]、纯跟踪算法^[7]等。

狭窄道路场景的 AGV 路径规划多采用传统算法实现, 但规划的路径易靠近障碍物以及路径不平滑而导致 AGV 实际运行效率偏低。唐丽娜等^[8]通过射频识别技术精确定位 AGV, 提出最小用时路径规划算法, 但在应用中未能充分解决狭窄道路环境下 AGV 与障碍物之间安全距离过小的问题。耿玺钧等^[9]改进了深度 Q 网络算法, 可提升路径成功率并降低路径成本, 但该方法主要关注路径的全局优化, 忽略了路径平滑性和局部调整, 尤其是在狭窄转弯环境中会导致路径不连续性和安全距离不足。上述方法在狭窄道路场景中实现了全局路径优化, 但未充分考虑 AGV 移动过程中与障碍之间最优的安全距离。

Voronoi 图构建的代价地图可直观反映环境中障碍物的分布情况, 为路径规划提供有效支持。A* 算法凭借其在搜索效率与路径质量上的优势, 结合已知的障碍物信息可生成最优的全局路径^[10]。王洪斌等^[11]融合 A* 算法和人工势场以提升路径规划的效率。张志文等^[12]融合了麻雀搜索算法与粒子群搜索算法提升算法的响应时间与规划效率。武星等^[13]采用 Voronoi 骨架进行全局路径优化, 并引入动态窗口法 (Dynamic Window Approach, DWA) 作为引导, 但 DWA 算法使得 AGV 在通过狭窄道路局部区域时, 会出现转向次数较多的问题, 导致 AGV 导航效

率偏低。朱建阳等^[14]采用 Voronoi 提取骨架生成笔直算法, 用降梯度法平滑规划路径, 但未充分考虑狭窄环境下障碍物避障的问题。上述算法在路径规划方面各有优势, 但尚未有效解决狭窄道路场景下 AGV 路径规划的安全距离和平滑性问题。

鉴于此, 笔者拟针对狭窄道路场景下 AGV 安全距离不足与路径不平滑的问题, 提出基于 Voronoi 骨架的 AGV 路径规划方法, 以期提升狭窄道路等复杂场景下 AGV 路径规划的安全性、高效性和鲁棒性。

1 新代价地图与全局路径规划

1.1 Voronoi 骨架描述

Voronoi 图是一种经典的空间分割结构, 具有等距性和良好的拓扑连通特性^[15]。Voronoi 图的边界由到相邻生成点距离相等的点构成, 可在障碍物之间形成一条安全中心通道, 适用于狭窄道路场景下的路径规划。利用 Voronoi 图的等距特性, 规划路径能在行驶过程中最大化保持与周围障碍物的安全距离, 其拓扑结构可有效保留环境空间关系, 保证路径的连通性与可通行性。基于 Voronoi 骨架生成的路径趋向于沿通道中心行驶, 可提高 AGV 在狭窄环境中的运行安全性与稳定性^[16]。

对于一组节点集合 $\{S_1, S_2, \dots, S_n \mid S_n \in R^d, i = 1, 2, \dots, n\}$, n 为节点数; R^d 表示所有节点在 d 维空间中的坐标, 任意点 P 在 Voronoi Cell 中的 V_i 定义为:

$$V_i = \{x \in R^d \mid \forall j \neq i, d(P, S_i) < d(P, S_j)\} \quad (1)$$

式中 $d(P, S_i)$ 为欧氏距离函数。Voronoi 单元边界由等距点组成, 该特性可有效保障 AGV 在狭窄道路中沿相对安全的中心区域运动。

1.2 4 层网络结构的新代价地图

传统代价地图由静态层、障碍层和膨胀层叠加构成^[17-18], 存在如下 3 点不足:

1) 安全性不足。代价地图的膨胀半径多为固定或非自适应,导致狭窄环境中路径规划易靠近障碍物边缘,存在碰撞隐患,路径的鲁棒性较差。

2) 缺乏中心结构引导信息。未能融合地图的骨架线、通道中心线结构信息,导致路径规划容易偏离通行最优区域。

3) 实时性较差。因狭窄场景中障碍物密集、地图范围大、合法路径占比小的因素,易产生重新计算膨胀层的问题,规划效率较差。

Voronoi 层的生成流程如图 1 所示,提取 Voronoi 骨架关键点,生成自定义 Voronoi 图层的流程如下:

1) Voronoi 图的生成。将障碍物作为种子点划分 Voronoi 区域,每个 Voronoi 区域表示该区域内任意点到最近障碍物的最短距离。

2) 图像的二值化。将 Voronoi 区域转为二值图像,障碍物位置与骨架标记为“1”,其余区域标记为“0”,便于后续骨架提取和细化。

3) Voronoi 骨架的拓扑细化。采用拓扑细化算法提取二值图像的 Voronoi 骨架核心结构,迭代移除孤立点与冗余线段,保留与区域核心连接的主干路径,构成环境核心骨架结构。

4) Voronoi 骨架关键点的提取。提取细化后 Voronoi 骨架的转折与分叉处的关键节点,确保既能避障又能提供安全距离。

5) 自定义 Voronoi 层的构建。基于关键点生成结构化拓扑图层,表征障碍物影响范围与最优安全距离。

6) 机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)集成。ROS 系统将自定义 Voronoi 层作为新图层加入代价地图框架中,用于 AGV 导航的图层。

4 层网络结构的新代价地图如图 2 所示,将生成的 Voronoi 层与静态图层、障碍物层、膨胀层融合,构建 4 层网络结构的新代价地图。在安全性方面,相较传统 3 层结构的代价地图,新代价地图通过 Voronoi 图层提取障碍物间的中垂线,形成通行中心骨架通道,使 AGV 在狭窄道路中保持更大安全裕度;在实时性方面,Voronoi 图层可限制搜索范围、减少冗余计算,尤其适用于障碍密集或通道狭长场景。Voronoi 骨架结构稳定、更新频率低,不会影响路径重规划响应能力,进一步提升整个系统的实时性与鲁棒性。

1.3 狭窄路径与算法特性的分析

根据城市狭窄道路范围的界定^[19],将 AGV 所

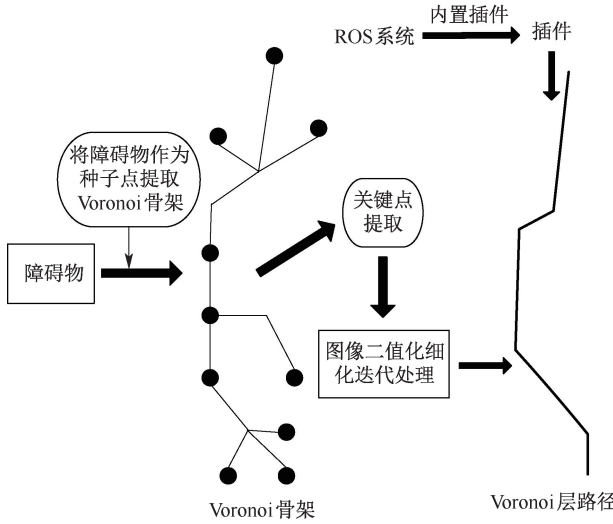


图 1 Voronoi 层生成流程

Fig. 1 Generation process of Voronoi layers

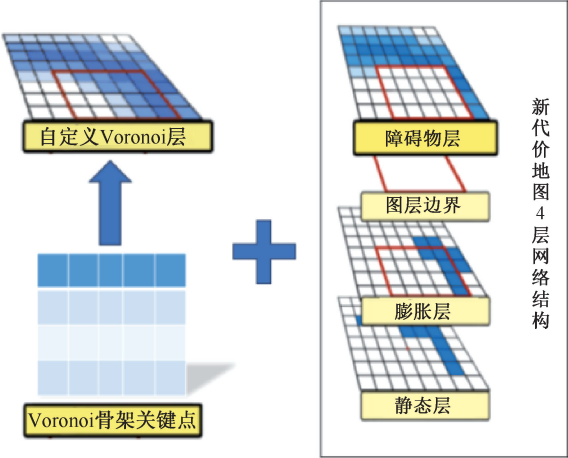


图 2 4 层网络结构的新代价地图

Fig. 2 New cost map with four-tier network structure

处的狭窄道路场景定义为道路宽度不大于 2 倍 AGV 车体宽度的通行环境,设定道路宽度 W_R 与 AGV 宽度 W_{AVG} 的比值 δ 为判定指标,公式为:

$$\delta = \frac{W_R}{W_{AVG}} \leq 2 \quad (2)$$

设定阈值 $\delta = 2$,道路宽度与 AGV 宽度比不超过 2 时,将视为狭窄道路场景。狭窄道路定义如图 3 所示,道路 b 与道路 c 分别满足 $\delta = 2$ 与 $\delta < 2$,均被定义为狭窄道路。

通过 Voronoi 图的几何中轴线特性,确保了狭窄环境下路径规划的鲁棒性,路径规划的优化流程如下:

1) Voronoi 骨架的生成过程是将环境中的静态障碍物转化为种子点,构建其对应的等距分割边界。由于骨架路径上的任意一点到最近障碍物的距离均

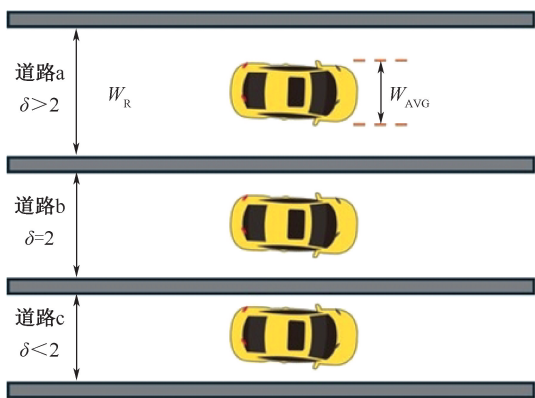


图3 狭窄道路定义

Fig. 3 Definition of narrow roads

满足局部最大化的等距特性,可确保 AGV 在环境的狭窄阈值 $\delta < 2$ 的狭窄道路中仍能保持最大安全间距,避免因过度膨胀导致路径不可通行。

2) 通过拓扑细化算法提取的 Voronoi 骨架,将复杂狭窄道路简化为关键节点,可剔除冗余分支,显著降低路径搜索的复杂度。

3) 提出结合 Voronoi 骨架的微分几何特性约束路径的转向角度,避免在狭窄弯道中因转向不足或过度导致运动失效。

1.4 基于新代价地图的全局路径规划

传统 A* 算法只考虑路径长度最优,未充分考虑路径规划的安全性。将新代价地图作为 A* 算法约束进行深度优先搜索,生成最优安全距离的全局路径规划。为此,提出改进 A* 算法的代价构造函数:

$$f(n) = g(n) + h(n) + C(v(n)) \quad (3)$$

式中: $g(n)$ 为累积代价; $h(n)$ 为预估代价; $C(v(n))$ 为优劣程度函数,是节点 n 在 Voronoi 图层中的代价值,用于衡量区域路径的安全性与通行优劣程度。在启发式函数 $h(n)$ 中引入 Voronoi 图层的障碍物信息,启发式函数可结合障碍物分布和代价信息调整,使得全局路径在计算构造函数时能避开障碍物进行路线规划,搜索倾向于安全中心区域,提高搜索效率。

2 全局路径的 B 样条平滑优化

AGV 移动时会先根据起点和目标点生成的全局路径进行优先搜索,但是 4 层网络结构的新代价地图在全局路径规划中生成的路径存在锯齿状和转折角度较大等问题,采用改进的 B 样条曲线平滑优化基于新代价地图的全局规划路径。

2.1 B 样条曲线描述

B 样条曲线可分为均匀与准均匀 2 类,分别包含 open、clamped、closed 这 3 种类型^[20]。B 样条通过控制点进行局部形状调整,有效减少路径锯齿和波动^[21],实现对局部路径的修改和对全局路径锯齿的平滑处理,见下式:

$$P(u) [P_0, P_1 \cdots P_n] = \begin{bmatrix} B_0(u) \\ B_1(u) \\ \vdots \\ B_n(u) \end{bmatrix} \sum_{i=0}^n P_i B_{i,k}(u) \quad (4)$$

式中: P_i 为规划路径的控制点; $B_{i,k}(u)$ 为递归定义的 B 样条基函数,用于加权控制点 P_n 的贡献; u 为控制参数; k 为阶次; $\sum_{i=0}^n P_i B_{i,k}(u)$ 为 B 样条基函数的加权和,可使规划路径在保持连续性的同时实现局部平滑优化。

2.2 改进 B 样条曲线的路径平滑优化

针对全局路径存在锯齿和转折角较大等问题,采用改进的 B 样条曲线平滑路径。

首先,通过路径点进行 B 样条插值,设原始路径点集为 $P = \{P_0, P_1, \cdots, P_n\}$, 利用 B 样条基函数拟合路径点,通过控制点 $C_0, C_1, \cdots, C_n$ 生成平滑曲线,见下式:

$$C(t) = \sum_{i=1}^n P_i N_{i,3}(t) \quad (5)$$

式中: $N_{i,3}(t)$ 为 3 次 B 样条基函数; $C(t)$ 为拟合后的路径曲线。

然后,通过最小化曲率变化局部优化控制点,减少曲率变化,使曲线更加平滑,优化目标函数为:

$$\min_{\{P_0, P_1, \cdots, P_n\}} \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{d^2 C(t)}{dt^2} \right)^2 dt \quad (6)$$

最后,通过控制点的“重要性”进行路径简化,去除对曲率贡献较小的控制点,使路径在平滑的同时减少冗余数据,其公式为:

$$I_i = \int_{t_{i-1}}^{t_{i+1}} \left| \frac{d^2 C(t)}{dt^2} \right|^2 dt \quad (7)$$

式中 I_i 为控制点 P_i 对周围曲线段的曲率贡献程度,控制点的贡献较小,则移除该控制点。

控制点 B 样条优化效果如图 4 所示,采用三阶均匀 B 样条曲线进行平滑处理,设置 5 个控制点,通过迭代优化进一步提升路径精度与稳定性。

图 4 试验表明:三阶均匀 B 样条图像呈现典型

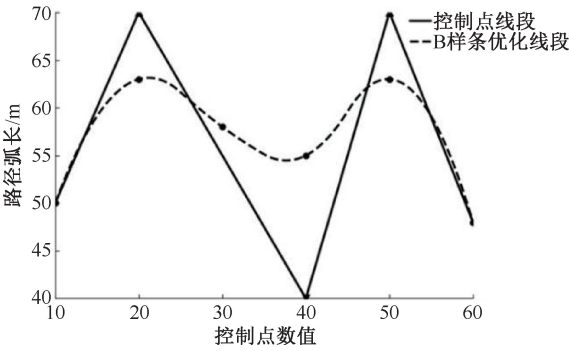


图4 控制点B样条优化效果

Fig. 4 Optimization effect diagram of control points B-spline

正弦分布特征且等间距排列,具有最小曲率变化的平滑曲线。相较于其他阶次B样条,三阶B样条能更稳定地适应不同形状的路径需求,通过调节基函数参数可有效避免路径规划中的不必要转折,使得路径规划的路线更加平滑。

B样条平滑前后效果如图5所示,虚线为B样条曲线平滑前的路径,实线为平滑后的路径。全局路径规划实现平滑后,有效避开大范围的转弯角度,对于平均转弯角度大于 90° 的转角,转弯点选取路径最优、平滑度更好,可缩短路径长度,提升AGV的移动效率。

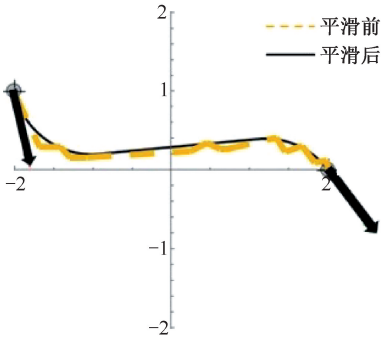


图5 B样条平滑前后效果

Fig. 5 Effect diagrams before and after B-spline smoothing

综上所述,基于Voronoi骨架的AGV路径规划总体流程如图6所示。

3 基于新代价地图路径规划的仿真与验证

3.1 与A*算法的对比

A*算法路径规划如图7所示,基于A*算法3层代价地图的路径规划未考虑AGV体积,导致路径过于贴近障碍物,在狭窄道路中易发生碰撞。

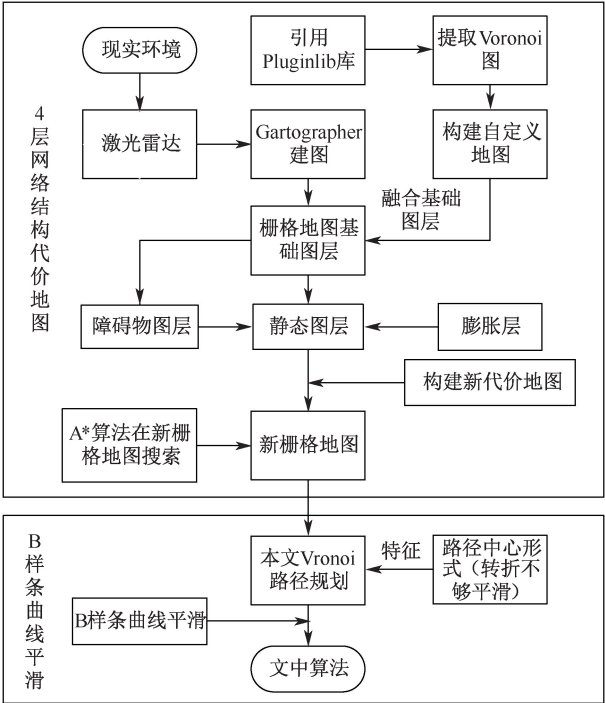


图6 算法总体流程

Fig. 6 Overall flowchart of the algorithm

Voronoi算法路径规划如图7所示,相比于A*算法,引入Voronoi图层优化路径选择,确保路径沿安全区域中轴线分布,最大化路径与障碍物的安全间距,减少狭窄区域的局部重规划计算量,提升规划效率与稳定性。

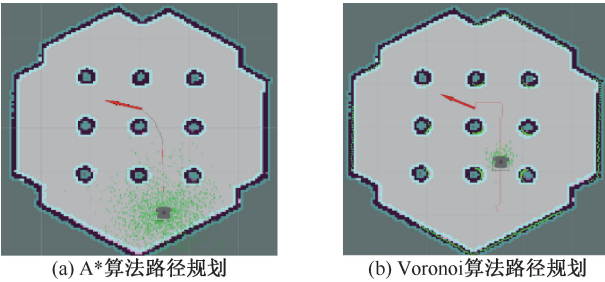


图7 A*算法与本文路径规划算法对比

Fig. 7 Comparison between A* algorithm and the proposed path planning algorithm

3.2 B样条曲线的路径平滑优化

以4层网络结构的新代价地图为约束,采用改进A*算法进行深度优先搜索生成高安全性、高效率的全局路径。Voronoi算法路径如图8所示,Voronoi算法的路径规划虽较大幅度提升了安全距离,但在狭窄通道前后宽度不一致时,易出现转向角度过大、转折次数过多的问题。B样条优化路径如图8所示,为采用B样条曲线优化后的全局规划路径,该路径转折处的平滑性得到较大提升,减少了

AGV 移动时的卡顿现象和转折次数,降低了局部路径计算的复杂性和移动延迟。

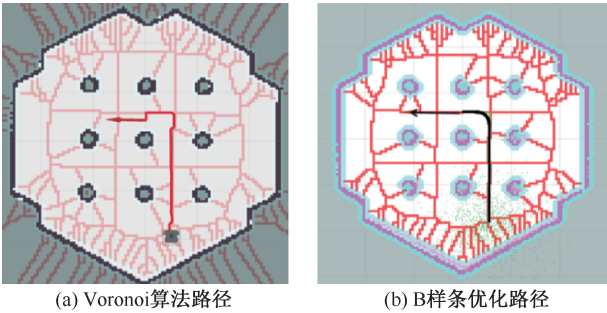


图 8 B 样条优化前后的路径对比

Fig. 8 Comparison of paths before and after B-spline optimization

3.3 狭窄道路场景下的路径规划仿真分析

A* 算法在代价地图仿真环境中的全局路径规划如图 9 所示,该路径虽能搜索到最优路线,但由于其采用启发式的深度优先搜索,使得路径过于靠近障碍物,易产生碰撞。因此,A* 算法难以有效满足

狭窄道路场景的安全性和可靠性要求。Voronoi 算法生成的规划路径如图 9 所示,相比于 A* 算法,其全局路径规划更接近道路中心线,可远离障碍物,提高了路径安全性。但在狭窄道路场景的转角处,存在转向角度过大、转折次数过多现象,导致 AGV 路径规划效率偏低。B 样条优化算法路径如图 9 所示。采用 B 样条曲线对 Voronoi 算法生成的全局路径进行平滑优化,相较于 Voronoi 算法路径,其路径更加平滑,使得转向角度变小且转折次数显著减少、在保证安全性的前提下降低了计算复杂性和减小移动延迟。因此,该改进算法尤其适用于狭窄道路等复杂场景的路径规划。

狭窄道路场景的路径规划仿真性能比较见表 1。相较于传统 A* 算法,在狭窄道路场景中,Voronoi 图层算法和本文算法的路径长度分别增加 0.26%和减少 4.04%,拐点数量分别增加 75%和 25%,距离障碍物的平均距离分别增加 100%和 75%,且规划时间都相应减少 31.9%和 17.34%。

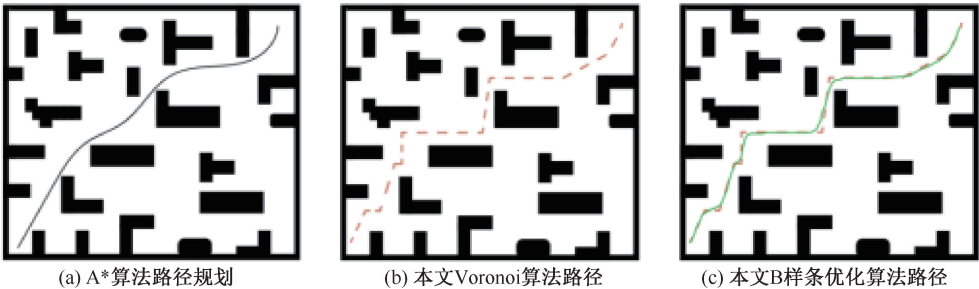


图 9 狭窄道路场景下 3 种算法规划路径对比

Fig. 9 Comparison of path planning using three algorithms in narrow road scenarios

表 1 狭窄道路路径规划仿真性能比较

Table 1 Simulation performance comparison of path planning in narrow road scenarios

算法	路径长度/m	拐点数量	与障碍物距离/m	规划时间/ms
A* 算法	19.547 9	4	0.21	15.34
Voronoi 图层算法	19.599 8	7	0.4	10.445
文中算法	18.758 0	5	0.35	12.662

仿真试验表明:对比 A* 算法,文中算法提高了狭窄道路场景下路径规划的安全性,且相较于 Voronoi 图层算法,具有更优的路径平滑性,能最大程度规避障碍物。仿真试验显示,文中算法对障碍物的规避风险降低 75%,可提高 AGV 适应环境的能力。

4 试验验证与分析

采用 2 轮差速 AGV 开展试验,以验证算法在真

实场景中的正确性和有效性。AGV 尺寸为 70 cm×50 cm×25 cm,搭载单线激光雷达、惯性测量单元与轮式里程计,控制板采用 RK3588,最大线/角速度分别为 1 m/s、1.3 rad/s。试验环境为不规则狭窄场景(约 124 m×53 m),最窄处 0.79 m,最宽处 3.11 m。AGV 仿真模型与狭窄场景代价地图如图 10 所示,激光建图生成的代价地图清晰展示了墙体与障碍物分布,地图边缘线外部区域为不可通行区,为路径规划提供了准确环境信息。

A* 算法在狭窄试验场景下的路径规划如图 11a 所示,A* 算法在狭窄道路试验场景下的路径规划,由于 A* 算法只关注最短距离,未考虑 AGV 体积与安全间距,使得规划轨迹紧贴地图边界位置,导致可通行性与安全性不足。针对上述问题,文中算法以提取 Voronoi 骨架特征融入代价地图,迭代产生 4 层网络结构的新代价地图为基础,结合 A* 算法

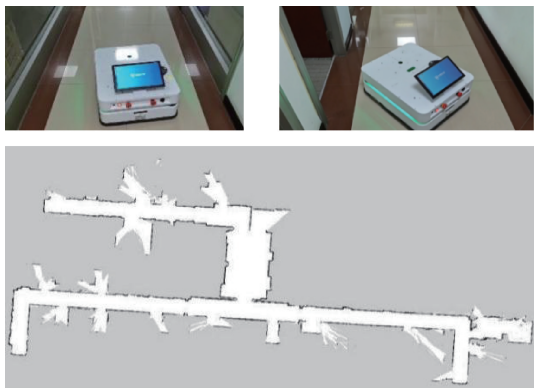


图 10 AGV 仿真模型与狭窄场景代价地图
Fig. 10 AGV simulation model and narrow scene cost map

启发式路径搜索全局路径后,引入 B 样条曲线局部优化路径,减少路径中的急转弯和不规则转向,使得 AGV 在狭窄道路场景下路径贴近中心安全行驶。其次,B 样条曲线优化后的路径减少了 AGV 运动中的折转,有效提高了路径平滑性。文中算法在狭窄道路场景下的路径规划如图 11b 所示,算法在地图场景、起点、终点等变量条件一致的情况下,AGV 往复运动只生成一条路径规划线,大幅减少重复路径点,有效提升 AGV 路径规划的质量和效率。对比试验测试中,2 种算法的规划路线,算法规划的总路径长度更短,路径规划质量更好。

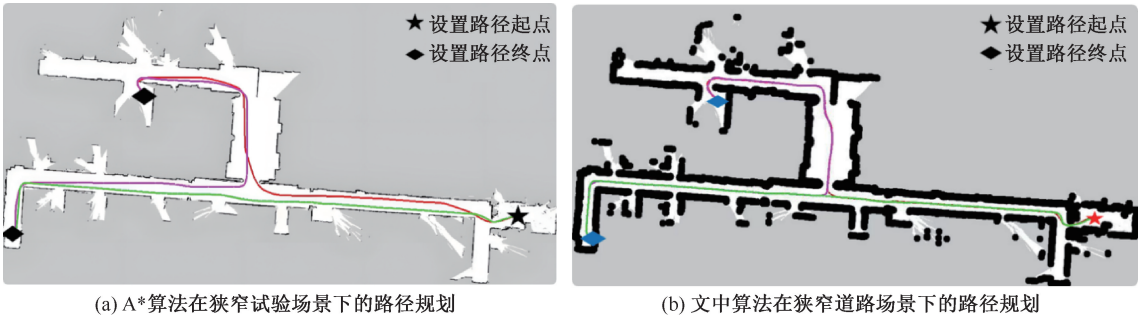


图 11 算法在狭窄道路场景下的路径规划
Fig. 11 Path planning of the algorithm in narrow road scenarios

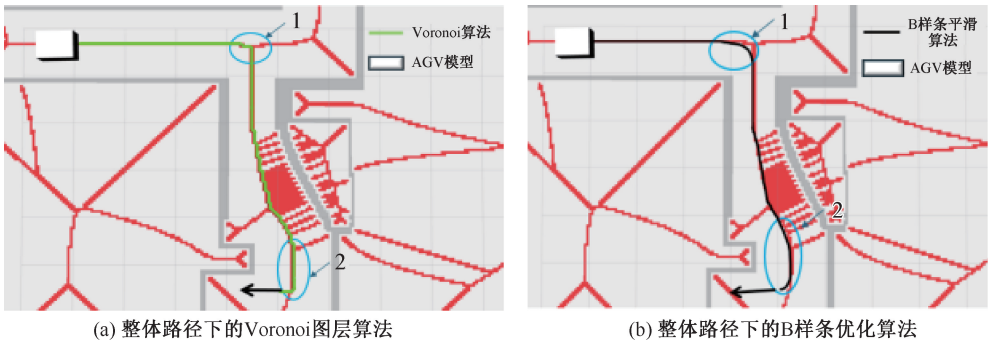


图 12 Voronoi 图层算法与 B 样条优化平滑路径的局部对比
Fig. 12 Local comparison between Voronoi layer algorithm and B-spline optimized smoothing path

Voronoi 图层算法与 B 样条优化平滑路径的局部对比如图 12 所示,通过局部和整体 2 个方面对比 Voronoi 图层算法生成的路径与经过 B 样条曲线优化后的路径。

由图 12 可知:B 样条曲线优化后的路径在全局平滑性方面有显著改善,行驶稳定性得到大幅提升。在实际测试中,AVG 在转弯时表现出更加平滑的行驶状态,避免了在运动过程中频繁折转、调转方向的现象。对比图中 1、2 标记处,未优化路径存在明显锯齿,易造成方向频繁调整,而优化后路径曲率连续性更好、更加平滑顺畅,有利于提升 AGV 转弯稳定

性和行驶流畅性。

狭窄道路路径规划试验性能比较见表 2,与未优化路径相比,Voronoi 图层算法与文中算法在路径长度上分别降低 5.4%和 7.8%;与障碍物平均距离分别提升 73%和 82%,提高了行驶安全性;路径空间点数分别减少 53.19%和 55.85%,有效降低计算复杂度;规划时间降低 29.07%和 48.98%,提升了规划实时性。综上,算法在运行效率、安全性与稳定性方面均表现更优。

为验证算法在不同狭窄道路中的适应性,不同宽度狭窄道路真实试验场景如图 13 所示,设计道路

表 2 狭窄道路路径规划试验性能比较

Table 2 Experimental performance comparison of path planning in narrow road scenarios

算法	路径长度/m	障碍物平均距离/m	路径规划空间点数	规划时间/ms
A* 算法	203	0.23	245 663	2 466
Voronoi 算法	192	0.41	11 498	1 749
B 样条算法	187	0.39	108 447	1 258

宽度分别为 1.38 m、3.11 m 和 0.79 m 的场景,以对应房间过渡区、电梯走廊区及中央狭窄通道区的 3 种道路场景。



图 13 不同宽度狭窄道路真实试验场景

Fig. 13 Real experimental scene images of narrow roads with different widths

不同道路宽度下算法的路径平滑效果及曲率对比如图 14 所示,横轴为算法在不同宽度狭窄道路下的执行时间,纵轴为 AGV 距终点的距离。通过路径曲率变化评估算法的平滑性,见下式:

$$k = \frac{|av|}{v^3} \tag{8}$$

式中: k 为曲率; a 为加速度, m/ms^2 ; v 为速度, m/ms 。该公式反映了轨迹的弯曲程度, v^3 表征运动中的曲线变化率。

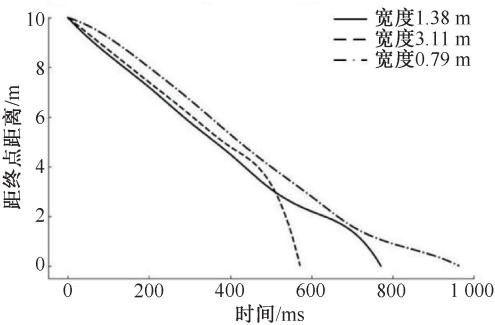


图 14 不同道路宽度下算法的路径平滑效果及曲率对比

Fig. 14 Comparison of path smoothing effect and curvature of the algorithm under different road widths

结果表明:3.11 m 宽度道路的路径曲线变化平缓,耗时最短;1.38 m 宽度道路整体无剧烈转向,保持相对平滑;在 0.79 m 宽度的极端狭窄条件下,文

中算法仍保持良好平滑性,避免大幅转向,有效验证了算法在极限条件下的稳定性。

不同道路宽度下路径规划算法的性能比较见表 3,但文中算法仍可保持良好平滑性。在 1.38 m、3.11 m 和 0.79 m 3 种道路宽度下,路径曲率分别为 0.355 32、0.205 23 和 0.444 76,道路越窄,曲率值越大,算法规划的路径可使 AGV 均正常通行,且保持良好的平滑性。极限道路测试中,道路宽度为 0.75 m,AGV 宽度为 0.7 m,二者仅有 0.025 m 单侧余量,AGV 因转弯半径限制而无法通过。因此,算法在极端狭窄场景下的失效临界条件为 $R_{\text{RA}} = 1.071\ 4$ 。综上,文中算法在狭窄道路中具备良好适应性,同时明确了极端场景下的应用边界。

表 3 不同道路宽度下路径规划算法的性能比较

Table 3 Performance comparison of path planning algorithms under different road widths.

道路宽度/m	平均执行时间/ms	设置距离	试验次数	路径曲率
A* 算法	757	10	15	0.355 32
Voronoi 图层算法	569	10	15	0.205 23
文中算法	983	10	15	0.444 76

5 结 论

1) 提取 Voronoi 骨架关键点生成自定义的 Voronoi 图层,融合静态图层、障碍物层、膨胀层,迭代生成 4 层网络结构的新代价地图。

2) 在 4 层网络结构的新代价地图基础上改进 A* 算法的代价函数,增加判断优劣程度函数进行路径点筛选,提出面向狭窄道路场景下最大安全距离的行驶策略,剔除贴近障碍物的冗余拐点,能够保证 AGV 移动路径的安全性。试验结果表明:文中路径规划安全性指标提升 82%,提高了 AGV 的避障能力和安全性。

3) 引入 B 样条曲线平滑优化算法,生成的平滑路径引导 AGV 进行局部路径规划,可实现 Voronoi 图层算法的平滑性优化,降低空间控制数据量,提升 AGV 行驶路径的稳定性。该路径规划执行时间缩短 48.98%,规划空间点数减少 55.85%,可有效提高 AGV 在复杂狭窄环境中的行驶稳定性。验证分析结果表明:该路径规划方法具有一定的安全性、鲁棒性和高效性,能够快速规避障碍物及规划最优的全局路线,提高狭窄道路场景下 AGV 移动的环境适应性。

参考文献

- [1] Tao Yong, Duan Lian, Gao He, et al. Heuristic expanding disconnected graph: a rapid path planning method for mobile robots [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(2): 85-99.
- [2] Xue Wuyang, Ying Rendong, Gong Zheng, et al. Slam based topological mapping and navigation [C]. 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) IEEE, 2020: 1 336-1 341.
- [3] 王丽, 李育萌, 刘云, 等. Zigbee 耦合 A* 算法的疏散路径动态规划与指示系统[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 142-149.
- Wang Li, Li Yumeng, Liu Yun, et al. A dynamic planning and indication system for evacuation paths based on Zigbee coupled A* algorithm [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 142-149.
- [4] 蒋林, 李峻, 马先重, 等. 一种改进骨架提取的 Voronoi 路径规划[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13): 138-148.
- Jiang Lin, Li Jun, Ma Xianchong, et al. Voronoi path planning based on improved skeleton extraction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 138-148.
- [5] 姜雪, 杨欢, 张培红. 基于蚁群算法的商业步行街应急疏散决策优化[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 144-151.
- Jiang Xue, Yang Huan, Zhang Peihong. Emergency evacuation decision optimization for commercial pedestrian streets based on ant colony algorithm [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(10): 144-151.
- [6] Yang Wenlin, Wu Peng, Zhou Xiaoqi, et al. Improved artificial potential field and dynamic window method for amphibious robot fish path planning [J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): DOI:10. 3390/app11052114.
- [7] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33.
- [8] 唐丽娜, 李琳, 宿浩, 等. 在狭窄通道环境下书库管理机器人的最优路径规划[J]. 中国海洋大学学报, 2021, 51(3): 125-130.
- Tang Li'na, Li Lin, Su Hao, et al. Optimal path planning for bookstore management robot under narrow channel environments [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(3): 125-130.
- [9] 耿玺钧, 崔立堃, 熊高, 等. 子目标驱动 DQN 算法的无人车狭窄转弯环境导航[J]. 控制与决策, 2024, 2(2): 2 096-4 188.
- Geng Xijun, Cui Likun, Xiong Gao, et al. Navigation in narrow turning environment of unmanned vehicle based on subgoal-driven DQN algorithm [J]. Control and Decision, 2024, 2(2): 2 096-4 188.
- [10] 邓新国, 叶似锦, 陈家瑞. 结合启发式算法与改进整数线性规划的有序逃逸布线[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(12): 4 302-4 313.
- Deng Xinguo, Ye Sijin, Chen Jiarui. Ordered escape routing combining heuristic algorithm and improved integer linear programming [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12): 4 302-4 313.
- [11] 王洪斌, 郝策, 张平, 等. 基于 A* 算法和人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2019, 30(20): 2 489-2 496.
- Wang Hongbin, Hao Ce, Zhang Ping, et al. Path planning of mobile robots based on A* algorithm and artificial potential field algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20): 2 489-2 496.
- [12] 张志文, 刘伯威, 张继园, 等. 麻雀搜索算法 G 粒子群算法与快速扩展随机树算法协同优化的智能车辆路径规划[J]. 中国机械工程, 2024, 35(6): 993-999.
- Zhang Zhiwen, Liu Bowei, Zhang Jiyan, et al. Cooperative optimization of Intelligent vehicle path planning based on PSOSSA and RRT [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(6): 993-999.
- [13] 武星, 杨俊杰, 汤凯, 等. 面向复合地图的移动机器人分层路径规划[J]. 中国机械工程, 2023, 34(5): 563-575.
- Wu Xing, Yang Junjie, Tang Kai, et al. Hierarchical path planning for mobile robots based on hybrid map [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(5): 563-575.

- [14] 朱建阳, 张旭阳, 蒋林, 等. 基于骨架关键点重规划的 Voronoi 图法路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 215–224.
- Zhu Jianyang, Zhang Xuyang, Jiang Lin, et al. Voronoi diagram path planning based on skeleton key points replanning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):215–224.
- [15] Zhang Liqiang, Zhang Kai, Yan Yecui. Local corner smoothing transition algorithm based on double cubic NURBS for five-axis linear tool path [J]. Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2016, 62(11):647–656.
- [16] Wu Qinghua, Cao Yijia, Wen Jinyu. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1998, 20(8):563–569.
- [17] 陈娇, 徐菱, 陈佳, 等. 改进 A* 和动态窗口法的移动机器人路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(6): 1 650–1 658.
- Chen Jiao, Xu Ling, Chen Jia, et al. Improved A* and dynamic window approach for mobile robot path planning [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(6):1 650–1 658.
- [18] 龚志力, 谷玉海, 朱腾腾, 等. 一种基于机器人操作系统的代价地图自适应膨胀半径设置方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9):3 662–3 668.
- Gong Zhili, Gu Yuhai, Zhu Tengting, et al. A method for setting cost map adaptive inflation radius based on robot operating system [J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(9):3 662–3 668.
- [19] SJG 166—2024 城市道路交通管理设施设置技术规程[S].
- SJG 166–2024 Technical specification for the setting of urban road traffic management facilities [S].
- [20] 张帆. 自主移动机器人组合定位与路径规划方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Zhang Fan. Research on integrated localization and path planning of autonomous mobile robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [21] Newaz A, Alam T. Hierarchical task and motion planning through deep reinforcement learning [C]. 2021 5th IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), 2021:100–105.



作者简介: 王 平 (1982—),男,湖南常德人,博士,讲师,主要从事智能汽车设计、自动驾驶等方面的研究。E-mail:wangping3487@163.com。