



基于虚拟障碍物的IGV转弯 路径规划方法

洪槐斌¹, 刘栋青¹, 姚文华¹, 王 斌²

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 北京市轨道交通运营管理有限公司, 北京 100071)

摘要: 针对智能导引车 (Intelligent Guided Vehicle, IGV) 转弯进入铁路道口的路径安全性问题, 文章提出了一种基于三阶贝塞尔曲线的转弯路径实时规划方法。首先根据全局路径和道路条件在道口前方预设一个用于路径规划的虚拟障碍物; 然后利用虚拟障碍物信息确定贝塞尔曲线的控制点选取范围, 得到满足曲率约束条件的转弯轨迹簇; 最后以最小曲率为目标, 选取最优转弯轨迹。仿真结果表明, 采用文章所提方法可得到平顺的转弯路径, 路径点最大曲率不超过 0.12 m^{-1} , 满足IGV行驶转弯半径要求, 而且能有效调整IGV进入铁路道口前姿态, 保证行驶的安全性。

关键词: IGV; 路径规划; 贝塞尔曲线; 最小曲率; 虚拟障碍物

中图分类号: U469.6⁺2; TP242; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)01-0139-07

0 引言

IGV是一种融合了多种定位方式的智能集装箱运输车, 具有高度自动化、智能化等特征。近年来已在港口码头、铁路货场等领域得到越来越多的应用^[1-4]。IGV在铁路货场运行时, 需先沿铁路平行行驶然后再转弯通过铁路道口。在该场景下, IGV的路径规划面临如下挑战: 一方面, IGV的车身长度约为15 m, 因此需要较大的转弯空间, 同时在通过铁路道口等狭窄道路时需要精准控制车身姿态以防止车辆落入铁路线内; 另一方面, IGV需要通过车头前方的摄像头、激光雷达等传感器对道口周围交通环境进行检测, 所以在进入道口前需调整车身姿态以保证传感器能有效获取道路信息, 确保车辆行驶的安全性。因此, 针对IGV在铁路道口的转弯控制, 探索出一种高效安全的转弯路径规划方法十分必要^[5-7]。

文献[8]根据阿克曼几何原理, 提出一种基于搜寻

及寻优的转弯路径算法来解决无人驾驶拖拉机在有限转弯空间内多次前进后退的问题; 文献[9]基于自主恒速飞行和最小转弯半径约束, 提出无人机转弯掉头策略, 为农用小型无人机作业前的航线拐点坐标解算、起降点位置及转弯掉头模式等提供优化; 文献[10]提出一种基于动态识别区的贝塞尔曲线避障路径实时规划方法, 有效减少避障路径的最大曲率、平均曲率和横向误差; 文献[11]在考虑初始状态约束、目标状态约束和运动学约束的情况下, 使用一种基于三阶贝塞尔曲线的轨迹规划方法来实现轨迹曲率最小化, 从而提高自动导引车的转向平稳性。通过分析可知, 上述方法难以基于道口环境条件规划出满足IGV行驶曲率要求和安全性要求的行车路径。

基于上述分析, 本文提出一种基于虚拟障碍物的IGV转弯路径规划方法。首先, 基于铁路道口环境条件在全局路径上预设一个以IGV最小转弯半径为半径的虚拟圆形障碍物; 然后通过选取合适的贝塞尔曲线控制点得到绕障阶段和回归阶段路径簇, 并将之组合;

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB4300501)

通信作者: 洪槐斌, 男, 博士, 研究方向为智能控制方法与装备研制; E-mail: honghuaibin@126.com

引用格式: 洪槐斌, 刘栋青, 姚文华, 等. 基于虚拟障碍物的IGV转弯路径规划方法[J]. 机车电传动, 2025(1): 139-145. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.102.

Citation: HONG Huaibin, LIU Dongqing, YAO Wenhua, et al. Real-time planning method of turning path for IGVs based on virtual obstacle[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 139-145. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.102.

最后以最小曲率^[12]为条件筛选出最优转弯路径。

1 转弯路径模型

1.1 三阶贝塞尔曲线

三阶贝塞尔曲线因其曲率连续平滑、控制灵活简单的特点,在机器人运动规划、艺术设计等领域得到广泛应用^[13]。通过调节控制点的位置,可使三阶贝塞尔曲线起点位置的切线方向和车辆初始速度方向保持一致,使得曲线终点位置的切线方向为期望速度方向,因此三阶贝塞尔曲线在自动驾驶车辆转弯路径规划领域发挥着重要作用^[14]。三阶贝塞尔曲线示意图如图1所示。

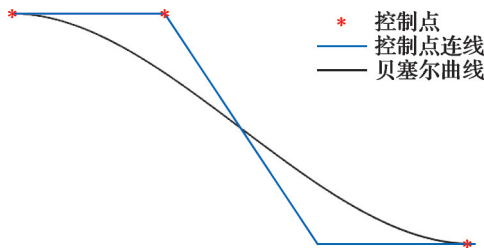


图1 三阶贝塞尔曲线示意图

Fig. 1 Diagram of cubic Bezier curve

三阶贝塞尔曲线可表述为

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{bmatrix} \mathbf{G} \mathbf{P} \quad (1)$$

式中: u 为贝塞尔曲线控制参数, $u \in [0, 1]$, 当 u 从 0 变化到 1 时, 即可生成贝塞尔曲线; $\mathbf{G}$ 为三阶贝塞尔曲线

参数矩阵, $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{P}$ 为三阶贝塞尔曲

线控制点坐标矩阵, $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{0,x} & P_{0,y} \\ P_{1,x} & P_{1,y} \\ P_{2,x} & P_{2,y} \\ P_{3,x} & P_{3,y} \end{bmatrix}$, $(P_{i,x}, P_{i,y})$ 为直角

坐标系下的三阶贝塞尔曲线坐标, $i = 0, 1, 2, 3$ 。

三阶贝塞尔曲线的一阶导数和二阶导数^[15]分别为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3u^2 & 2u & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{G} \mathbf{P} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} & \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6u & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{G} \mathbf{P} \quad (3)$$

1.2 虚拟障碍物设定方法

IGV 在转弯进入铁路道口前通常沿着铁路旁的车道中心线行驶。车道中心线与道路边界之间的距离约为 4.5 m, IGV 车身长度为 15.4 m, 最小转弯半径为 8 m, 因此若车辆始终沿车道中心线行驶, 在道口转弯时将面临车身出界、车轮落入铁道的风险。为解决该问题, 在铁路道口附近设定一个圆形虚拟障碍物^[16], 障碍物圆心位于 IGV 车道中心线上, 障碍物半径为 IGV 车辆最小转弯半径, 如图2所示。图2中 XOY 为 IGV 在 WGS-84 坐标系下的坐标^[17-18]。自动驾驶系统基于该虚拟障碍物规划近似于“灯泡形”的轨迹路径, 该轨迹

的优势在于它既可保证 IGV 转弯时能与铁道保持安全距离, 又能将 IGV 调整到以车头超前的姿态进入铁路道口, 保证车头前方的摄像头获取更多的环境信息, 提高车辆行驶的安全性。

转弯路径规划的两个主要任务分别是:

① 绕开虚拟障碍物, 规划路径点不得与虚拟障碍物的包络范围有交集。

② 在转弯过程中调整车身姿态, 使 IGV 在转弯路径终点位置以直行姿态进入道口。

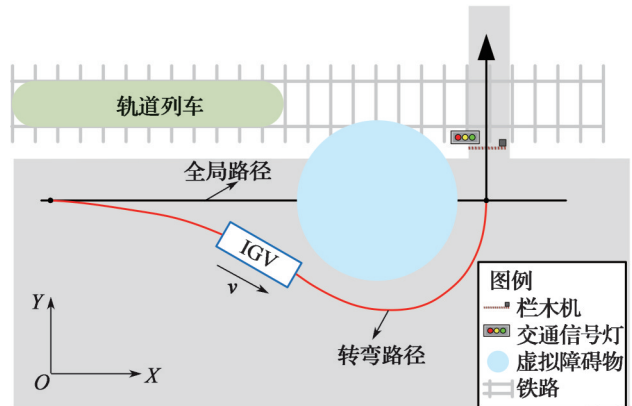


图2 IGV 转弯路径规划示意图

Fig. 2 Schematic diagram of turning path planning for IGV

2 转弯路径规划

IGV 自动驾驶系统依靠全球卫星定位系统和车载传感器对车辆位置进行监测并实时更新, IGV 根据自身位置和虚拟障碍物位置信息动态规划转弯路径, 转弯路径实时规划过程如图3所示。

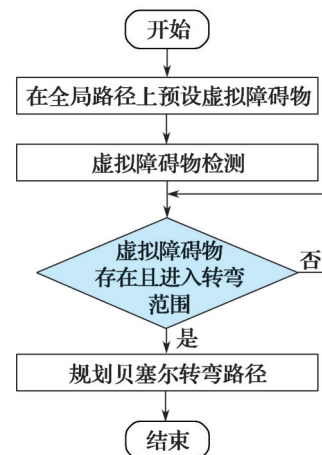


图3 转弯路径规划流程图

Fig. 3 Flow chart of turning path planning

从确保 IGV 安全行驶的角度出发, 基于车辆的感知结果和货场路面的结构空间确定 IGV 的可行驶区域如图4中灰色区域所示。图4中, 虚拟障碍物为以 R 为半径的圆柱, R 为 IGV 最小转弯半径, l_{width} 和 l_{length} 分别

为IGV的车身宽度和长度, v 为IGV当前速度, l_1 和 l_2 分别为可行驶区域的长度和宽度。IGV车载激光雷达、摄像头等传感器以车辆中轴线为中心对称布置, 行车坐标系 xOy 的原点 O 位于IGV车辆中心点, y 轴与IGV速度 v 的方向平行, x 轴与 y 轴垂直, 指向IGV速度 v 方向的右侧。

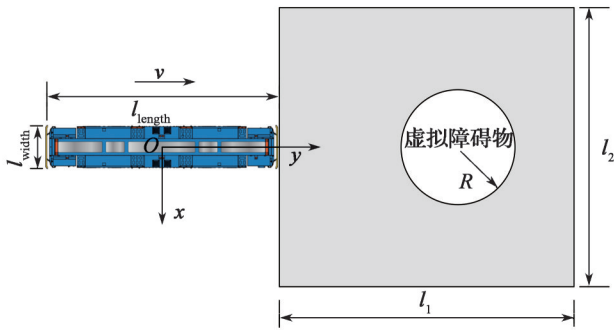


图4 基于虚拟障碍物的IGV动态可行驶区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dynamic drivable area of IGV based on virtual obstacle

2.1 坐标转换方法

在转弯路径规划过程中, 涉及到WGS-84坐标系和行车坐标系之间的转换^[19]。将全局作业路径、虚拟障碍物绝对坐标、IGV当前点绝对坐标和航向角从 XOY 坐标转换为 xOy 坐标, 用以规划转弯局部路径。得到最优转弯路径后, 再将之转换为 XOY 坐标。坐标系转换流程如图5所示。

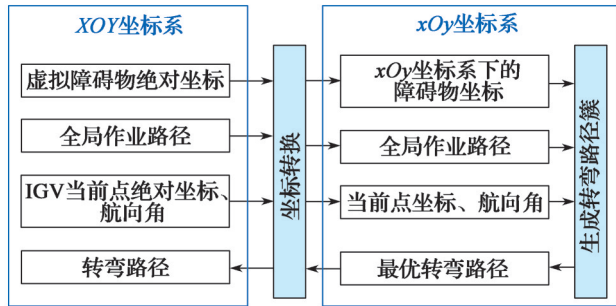


图5 坐标系转换流程图

Fig. 5 Flow chart of coordinate transformation

2.2 贝塞尔曲线控制点确定

本文将转弯路径任务分解为绕障阶段和回归阶段两段, 分别基于三阶贝塞尔曲线进行路径规划。绕障阶段是指IGV车身远离车道中心线的过程, 回归阶段是指IGV车身逐渐回归车道中心线的过程。这种方法的优势在于路径灵活, 计算简单, 利用贝塞尔曲线的凸包性和连续性可有效保证轨迹的走向和曲率的连续性。

2.2.1 绕障阶段路径控制点确定方法

绕障阶段路径控制点选取示意图如图6所示。图6中, 第1控制点 $P_{1,0}$ 为IGV当前所处位置, 可从定位系

统中获取其绝对坐标; v 为IGV的当前速度; 直线 L_2 为穿过 $P_{1,0}$ 且与 v 方向平行的直线; 点 P_{match} 为全局路径上距点 $P_{1,0}$ 最近的路径匹配点, 将该最近距离定义为 d_3 , 该距离可以通过两点之间的距离公式计算得出; 直线 L_1 为全局路径上IGV转弯之前的直线部分; 虚拟障碍物圆心落在 L_1 上, 半径 R 为IGV最小转弯半径, 可从车辆出厂参数中获取; 点 $P_{1,3}$ 为第4控制点, 通过点 $P_{1,3}$ 和圆心 o' 的直线与全局路径垂直, 将两点之间的距离定义为 d_1 , 该距离需满足IGV整个转弯过程行驶曲率不大于IGV最小转弯曲率的要求, 且越小越好; 圆心 o' 的坐标根据道路环境提前预设, 可直接从轨迹中读取; 直线 L_3 穿过点 $P_{1,3}$ 且与连接点 o' 与点 $P_{1,3}$ 的线段垂直; 点 A 为经过点 P_{match} 和点 $P_{1,0}$ 的直线与 L_3 的交点; 点 B 落在直线 L_2 上, 且 $L_{AB} \perp L_2$; 点 P_{random} 落在直线 L_2 上, 为速度方向上的随机点; 根据贝塞尔曲线的性质, 可将第2控制点 $P_{1,1}$ 的选取范围确定在点 $P_{1,0}$ 到点 B 之间的线段上, 保证行车曲率的连续性; 同理可将第3控制点 $P_{1,2}$ 选取在点 A 到点 $P_{1,3}$ 之间的线段上。

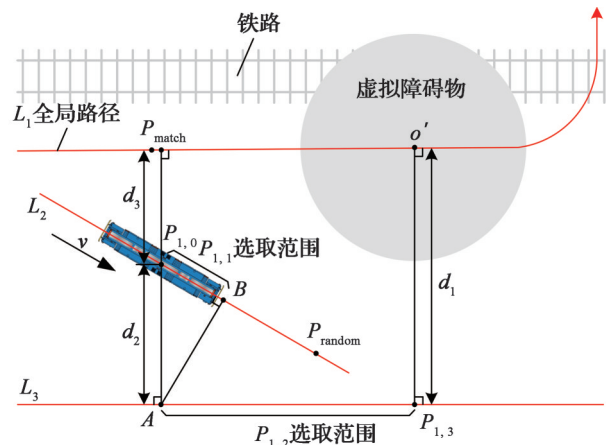


图6 绕障阶段路径控制点选取示意图

Fig. 6 Schematic diagram of control point selection for obstacle bypassing

绕障阶段的贝塞尔曲线控制点由 $P_{1,0}$ 、 $P_{1,1}$ 、 $P_{1,2}$ 、 $P_{1,3}$ 组成, 下面给出每个控制点的坐标选取方法。

第1控制点为IGV当前所处位置, 可从 XOY 坐标系中获取其绝对坐标, 利用坐标转换公式得到 xOy 坐标。

第4控制点 $P_{1,3}$ 位置与 d_1 长度有关。IGV绕虚拟障碍物行驶, 且具备一定安全裕量 l_{safe} , 由此可知

$$d_1 = R + l_{width} + l_{safe} \quad (4)$$

$P_{1,3}$ 坐标为

$$(x_{P_{1,3}}, y_{P_{1,3}}) = (x_o, y_o) + \frac{R + l_{width} + l_{safe}}{\sqrt{(x_{P_{match}} - x_o)^2 + (y_{P_{match}} - y_o)^2}} \begin{pmatrix} |x_{P_{match}} - x_o| \\ |y_{P_{match}} - y_o| \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $(x_{P_{1,3}}, y_{P_{1,3}})$ 为 $P_{1,3}$ 在 xOy 坐标系下的坐标; (x_o, y_o)

式中: $k(t)$ 为三阶贝塞尔转弯路径点 $(x(t), y(t))$ 的曲率; $(\dot{x}_i, \dot{y}_i)$ 为路径点 $(x(t), y(t))$ 的一阶导数; $(\ddot{x}_i, \ddot{y}_i)$ 为路径点 $(x(t), y(t))$ 的二阶导数。

2.2.4 最优转弯路径生成

根据式(5)、式(10)~式(13)确定三阶贝塞尔曲线控制点, 然后可生成转弯路径簇。由于上述公式中只含有 $\lambda_{1,1}$ 、 $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{2,1}$ 和 $\lambda_{2,2}$ 这4个未知参数, 可以在(0, 1)范围内从0开始逐次将 λ 增加 Δi (该值影响轨迹簇的密度), 遍历所有可能转弯路径, 然后结合式(14)和式(15)所确定的约束条件筛选出符合IGV行驶条件的可执行路径簇。

本文以最小曲率为目标选取最优转弯路径, 即在筛选后的路径簇中选择路径点曲率最小的路径

$$\min k_{\max}(k_{i,0}, k_{i,1}, \dots, k_{i,n}) \quad (16)$$

式中: $k_{\max}$ 表示所有路径点的最大曲率; $k_{i,n}$ 表示第*i*条轨迹上第*n*个点的曲率。

得到最优转弯路径后将其转换为在XOY坐标系下的路径, 用于下游控制模块处理。

3 仿真试验

为了验证算法的有效性, 本文以某公司生产的XAGV70E无人驾驶水平运输车为对象建立仿真试验平台。试验参数如表1所示, IGV车身宽度、长度、最小转弯半径均可通过查询IGV技术手册得到, l_{safe} 、 Δi 和 t_i 为根据经验或大量试验所确定的最佳值。

表1 生成转弯路径所需参数

Table 1 Parameters required for generation of turning path

参数	含义	参数值
R/m	IGV最小转弯半径	8.0
$l_{\text{width}}/\text{m}$	IGV车身宽度	2.9
$2l_{\text{length}}/\text{m}$	IGV车身长度	15.4
l_{safe}/m	安全余量	2.0
Δi	λ 变化梯度	0.1
t_i/s	位置采样周期	0.01

建立直角坐标系xOy, 全局路径为沿铁路的一段直线行驶后衔接直角转弯进入铁路道口。转弯路径终点的坐标为(53, 20); 考虑到IGV车身宽度和安全裕量, 将虚拟障碍物的圆心坐标设为(40, 20), 半径为IGV最小转弯半径8 m; 考虑到IGV的停障安全距离和车长, 将转弯路径的起点坐标设为(19, 20)。

当 $\Delta i=0.1$ 时, 避障阶段和回归阶段两段贝塞尔转弯路径簇分别如图8和图9所示。由图8和图9可知, 两段转弯路径整体连续且平滑。

避障阶段和回归阶段的路径簇各由10条曲线组成, 将两者任意组合即可得到完整的转弯路径, 对组合后的路径安全性进行评价, 即可选取最优的转弯路径, 具体如图10中蓝色虚线所示。由图10可知, IGV从起点开始平顺地进入绕障路径, 随后以相对稳定的转弯半径围绕虚拟障碍物行驶; 绕障阶段和回归阶段连接

处的轨迹光滑, 避免了IGV行驶时转向角度突变导致的车身过大抖动; 在到达转弯终点附近时, 路径方向与铁路道口方向一致, 这有利于感知系统获取更多道口环境信息, 保证IGV通过铁路道口的安全性。

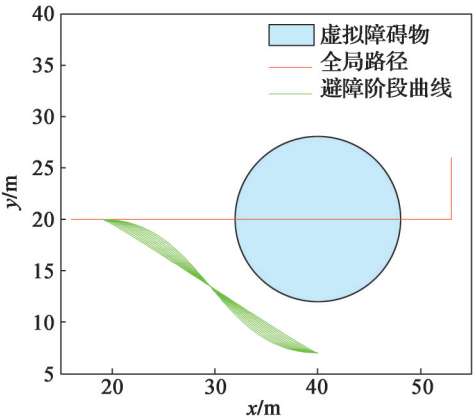


图8 绕障阶段规划路径簇

Fig. 8 Cluster of planned paths for obstacle bypassing

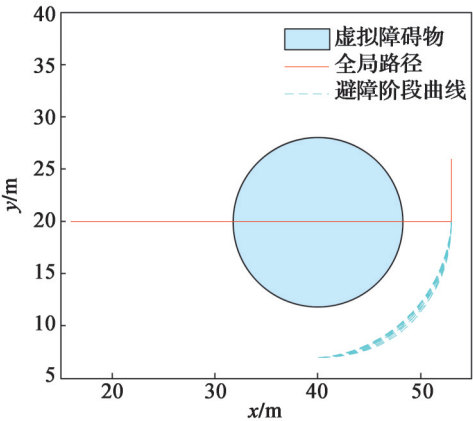


图9 回归阶段规划路径簇

Fig. 9 Cluster of planned paths for path recovery

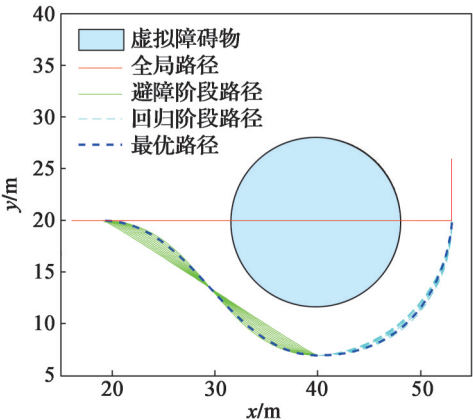


图10 采用本文方法得到的最优转弯路径图

Fig. 10 Optimal turning path generated by proposed method

在该转弯场景下, 采用本文所提方法和采用传统五次多项式方法得出的路径规划结果对比如图11所示。由图11可知, 在绕障阶段, 两者并无太大区别; 在回

归阶段,采用本文所提方法得到的路径更为平滑,进入铁路道口时的路径航向变化更为平顺,更贴近实际需求。

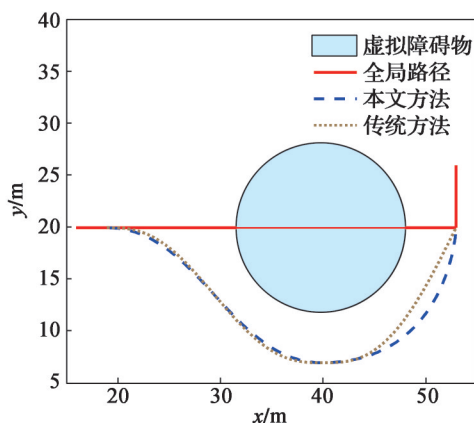


图 11 与采用传统方法的转弯路径规划效果对比图

Fig. 11 Comparison of turning path planning effect with the traditional method

采用本文所提方法与采用传统方法规划的路径曲率对比如图 12 所示。图 12 中横坐标为路径点的 x 轴坐标,纵坐标为路径点的曲率绝对值。由 IGV 最小转弯半径 $R=8\text{ m}$ 可知,其最大曲率不能超过 $1/R=0.125\text{ m}^{-1}$ 。从图 12 可以看出,采用本文方法规划的路径点曲率绝对值在 $0\sim 0.120$ 之间,符合曲率约束条件;采用传统方法规划的路径点曲率值有部分超过了 0.125 ,无法满足 IGV 最小转弯半径要求。

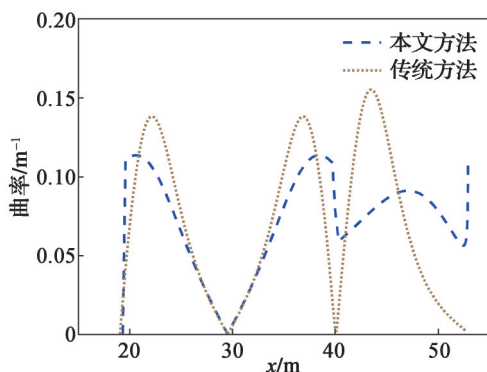


图 12 转弯路径曲率对比

Fig. 12 Comparison of turning path curvature

仿真结果表明,本文所提出的方法合理且有效,与传统方法相比有一定优势。

4 结束语

为解决 IGV 在铁路道口等狭窄路段的转弯问题,本文提出了一种通过虚拟障碍物模拟道口环境,采用贝塞尔曲线生成转弯路径的路径规划方法。仿真结果表明本方法具有以下优势:

①采用本文方法所得到的转弯路径曲线顺滑,曲率连续且未发生突变,路径上的所有轨迹点的最大曲

率满足 IGV 行车要求,可有效保证其安全平稳运行。

②本文所提出的基于虚拟障碍物的转弯路径规划方法简单可靠且易于实现,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 梁浩, 吴邵强, 刘汉东. 智能导引运输车(IGV)在自动化集装箱码头中的应用[J]. 水运工程, 2022(10): 185-189.
LIANG Hao, WU Shaoqiang, LIU Handong. Application of IGVs in automated container terminals[J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 185-189.
- [2] 吴建文, 周志飞, 詹军, 等. 铁路集装箱专用 AGV 的研制与应用[J]. 起重运输机械, 2020(17): 75-79.
WU Jianwen, ZHOU Zhifei, ZHAN Jun, et al. The development and application of AGV for railway container[J]. Hoisting and conveying machinery, 2020(17): 75-79.
- [3] 刘强, 韩震宇, 刘欢. AGV 自动运输系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(5): 41-44.
LIU Qiang, HAN Zhenyu, LIU Huan. Design of AGV automatic transportation system[J]. Techniques of automation and applications, 2019, 38(5): 41-44.
- [4] 宁志民. AGV 技术发展综述[J]. 导航与控制, 2014, 13(5): 58-63.
NING Zhimin. Evolution summarization of the automated guided vehicles[J]. Navigation and control, 2014, 13(5): 58-63.
- [5] 曹小华, 朱孟. 基于冲突预测的多自动导引小车避碰决策优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(8): 2092-2098.
CAO Xiaohua, ZHU Meng. Multi-AGV conflict avoidance decision optimization method based on conflict prediction [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2020, 26 (8): 2092-2098.
- [6] ZHONG Meisu, YANG Yongsheng, SUN Shu, et al. Priority-based speed control strategy for automated guided vehicle path planning in automated container terminals[J]. Transactions of the institute of measurement and control, 2020, 42 (16): 3079-3090.
- [7] ZHONG Meisu, YANG Yongsheng, DESSOUKY Y, et al. Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals[J]. Computers & industrial engineering, 2020, 142: 106371.
- [8] 朱亚坤, 寇子明, 李俊飞. 拖拉机方向平行作业转弯路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 110-113.
ZHU Yakun, KOU Ziming, LI Junfei. Research on turning path of parallel operation of tractor[J]. Machinery design & manufacture, 2020(3): 110-113.
- [9] 彭孝东, 兰玉彬, 胡洁, 等. 农用小型无人机转弯掉头模式及全区域覆盖下作业路径规划与优化[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 111-117.
PENG Xiaodong, LAN Yubin, HU Jie, et al. Turning mode and whole region-coverage path planning and optimization of agricultural small UAV[J]. Journal of south China agricul-

- tural university, 2019, 40(2): 111-117.
- [10] 杨洋, 温兴, 马强龙, 等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 34-43.
YANG Yang, WEN Xing, MA Qianglong, et al. Real time planning of the obstacle avoidance path of agricultural machinery in dynamic recognition areas based on Bezier curve [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2022, 38(6): 34-43.
- [11] 刘学问, 陶钧, 徐海巍. 基于三阶贝塞尔曲线的AGV轨迹规划研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(1): 113-114.
LIU Xuewen, TAO Jun, XU Haiwei. Feasible trajectory generation for AGV based on cubic Bézier curve[J]. Industrial control computer, 2018, 31(1): 113-114.
- [12] 刘美岑, 陈慧, 张书恺. 一种任意起始位姿的连续曲率泊车路径在线规划方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(增刊1): 114-122.
LIU Meicen, CHEN Hui, ZHANG Shukai. An online curvature continuous parking path planning method for arbitrary starting posture[J]. Journal of Tongji university(natural science), 2021, 49(Suppl 1): 114-122.
- [13] ELHOSENY M, THARWAT A, HASSANIEN A E. Bezier curve based path planning in a dynamic field using modified genetic algorithm[J]. Journal of computational science, 2018, 25: 339-350.
- [14] 化祖旭, 张文海. 基于贝塞尔曲线的自动驾驶汽车避障路径规划[J]. 汽车文摘, 2021(7): 46-49.
HUA Zuxu, ZHANG Wenhai. Obstacle-avoidance path planning for autonomous vehicles based on Bezier curves[J]. Automotive digest, 2021(7): 46-49.
- [15] DURAKLI Z, NABIYEV V. A new approach based on Bezier curves to solve path planning problems for mobile robots[J]. Journal of computational science, 2022, 58: 101540.
- [16] 叶炜垚, 王春香, 杨明, 等. 基于虚拟障碍物的移动机器人路径规划方法[J]. 机器人, 2011, 33(3): 273-278.
YE Weiyao, WANG Chunxiang, YANG Ming, et al. Virtual obstacles based path planning for mobile robots[J]. Robot, 2011, 33(3): 273-278.
- [17] 李家强, 赵春艳, 陈金立, 等. WGS-84坐标系下改进的广义最小二乘配准算法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(5): 771-775.
LI Jiaqiang, ZHAO Chunyan, CHEN Jinli, et al. A modified generalized least square registration algorithm on WGS-84 coordinate[J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2016, 50(5): 771-775.
- [18] 罗承铭, 熊陈文, 黄小毛, 等. 四边形田块下油菜联合收获机全覆盖作业路径规划算法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 140-148.
LUO Chengming, XIONG Chenwen, HUANG Xiaomao, et al. Coverage operation path planning algorithms for the rape combine harvester in quadrilateral fields[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(9): 140-148.
- [19] 蒋志华, 陶德桂. 小型无人机航路规划及自主导航算法研究[J]. 现代电子技术, 2015(4): 5-7.
JIANG Zhihua, TAO Degui. Research of MUAV route planning and autonomous navigation system[J]. Modern electronics technique, 2015(4): 5-7.
- [20] 杨彬, 宋学伟, 高振海. 考虑车辆运动约束的最优避障轨迹规划算法[J]. 汽车工程, 2021, 43(4): 562-570.
YANG Bin, SONG Xuewei, GAO Zhenhai. Optimal obstacle avoidance trajectory planning algorithm considering vehicle motion constraints[J]. Automotive engineering, 2021, 43(4): 562-570.

Real-time planning method of turning path for IGVs based on virtual obstacle

HONG Huaibin¹, LIU Dongqing¹, YAO Wenhua¹, WANG Bin²

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Beijing Metro Operation Administration Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: In order to improve the safety of intelligent guided vehicles (IGVs) operating on curves approaching railway crossings, this paper proposes a real-time planning method for turning paths based on cubic Bezier curves. Firstly, a virtual obstacle for path planning was preset ahead of a crossing, based on the global path and road conditions. Then, the information of the virtual obstacle is used to define the selection range of control points for Bezier curves, resulting in a cluster of turning paths that satisfied the curvature constraints. Finally, the minimum curvature of the path points was used as the criterion to identify the optimal turning path. In the simulations, the proposed method generated smooth turning paths, with the maximum curvature of the path points not exceeding 0.12 m^{-1} , which satisfies the turning radius requirements for IGV operation. Additionally, these results can effectively support the attitude adjustment of IGVs before entering railway crossings, thereby enhancing operational safety.

Keywords: intelligent guided vehicle (IGV); path planning; Bezier curve; minimum curvature; virtual obstacle