



Frenet 坐标系及凸近似避障原理的 无人车局部路径规划

袁 春¹ 龚 城¹ 何成诚¹ 李 杨² 郭宗环²

(1. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆金康赛力斯新能源汽车设计院有限公司科技中心, 重庆 401133)

摘 要: 针对结构化道路下自动驾驶车辆实时局部路径规划问题, 提出了一种改进的基于 Frenet 坐标系及凸近似避障原理的无人车局部路径规划算法。在车辆以及 Frenet 坐标系下利用栅格法构建车辆前方栅格区域, 并引入凸近似避障原理结合车辆动力学缩小自车安全行驶区域, 同时考虑车辆的极限转向约束、前轮转角变化率、安全距离、道路对中和侧向加速度等代价函数得到自车最优路径。构建 Carsim + Matlab 软件在环实时仿真系统, 搭建基于 Labview + Matlab/Simulink 构架的无人车实验平台, 并进行真实道路场景下的实车实验, 对算法进行测试。结果表明: 该算法能够在结构化道路下规划出合理的车辆行驶路线, 并顺利实现规避障碍物, 且具有一定的舒适性与实时性。

关 键 词: 自动驾驶; Frenet 坐标系; 栅格法; 凸近似避障; 代价函数

中图分类号: U463.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2022)04-0059-09

自动驾驶是当前汽车技术开发的热点, 而路径规划是实现自动驾驶非常重要的环节^[1]。自动驾驶中的路径规划分为两类, 即基于高精度地图信息下的全局路径规划(又称静态规划)和基于自车周围环境变化的局部路径规划(也称动态规划)^[2]。全局路径规划主要为局部路径规划提供导向和约束, 使车辆能够沿着导航所引导的期望路径行驶^[3-4]。局部路径规划指的是车辆在行驶过程中实时感知周围的环境信息变化, 从而使车

辆实时调整行驶路径顺利跟踪期望的路径。局部路径规划主要有使用车辆自身安装的各种传感器(主要有激光雷达、毫米波雷达、摄像头等)获取到周围环境变化的信息, 以及全球定位系统 GNSS 获取当前车辆位置信息而实现无碰撞的避障操作, 局部路径规划对实时性要求较高, 在局部路径规划的过程中不仅要考虑到行驶路径最短、达到时间较少、驾驶车辆最安全的原则, 还要考虑自身车辆约束问题、动态变化的环境所带来的约束问题、

收稿日期: 2021-04-29

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-mbdX0052)

作者简介: 袁春, 男, 博士, 教授, 主要从事智能汽车以及电动汽车技术研究, E-mail: maplehill@foxmail.com; 通讯作者 龚城, 男, 硕士研究生, 主要从事自动驾驶路径规划研究, E-mail: 1264091866@qq.com。

本文引用格式: 袁春, 龚城, 何成诚, 等. Frenet 坐标系及凸近似避障原理的无人车局部路径规划[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(4): 59-67.

Citation format: YUAN Chun, GONG Cheng, HE Chengcheng, et al. Local path planning for unmanned vehicles based on frenet coordinate system and convex approximate obstacle avoidance principle[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science) 2022, 36(4): 59-67.

以及与时间相关的约束条件等^[5],全局路径规划与局部路径规划有许多相通的地方^[6]。目前常用的全局路径规划算法主要有基于搜索的方法(Dijkstra算法、 A^* ^[7]、 D^* 等)、基于优化的算法(最优控制、凸优化^[8-10])、基于采样方法(确定性采样、随机采样)、智能仿生算法(遗传算法、蚁群算法、粒子群算法)等。局部路径规划的算法主要有人工势场法^[11]、动态窗口法、强化学习法、模拟退火法、模糊控制法、神经网络法、基于行为的路径规划算法、凸近似算法、栅格法以及MPC^[12]等算法。为了解结构化道路上的局部路径规划问题,本文引入了Frenet坐标系,在此坐标系下可以得到自车与障碍物车在期望路径上的横向偏差,更加符合车辆行驶的实际情况。

本文基于Frenet坐标系和凸近似避障原理^[13-15],提出了一种适应实际道路环境的局部路径规划算法。首先,在Frenet坐标系下建立栅格点,并将此栅格点转化到全局坐标系下,再通过全局坐标系得到车辆坐标系下的栅格点坐标,然后,建立自车的运动学和动力学模型,在笛卡尔坐标系和Frenet坐标系下考虑车辆自身极限转向动态机械结构以及转角变化率等进一步缩小栅格点区域,同时基于安全距离、道路对中、路径最短等代价函数得到自车安全行驶的最优路径。最后,在金康赛力斯SF5型新能源汽车平台上搭建Labview+Matlab/Simulink构架的无人车实验平台,在校园道路上进行算法的验证,结果表明:该算法能够顺利的避开障碍物并跟踪上期望路径。

1 坐标系与改进的栅格法

在全局笛卡尔坐标系下,当无人驾驶车行驶在道路曲率较大的道路时,会出现找不到前视点,而使无人驾驶车辆偏离期望轨迹的情况,所以需要知道无人驾驶车在局部环境中所处的具体位置,以及筛选后的从栅格点到期望路径投影点处的距离信息。这对后续代价函数的设计至关重要,在此情况下需要引入Frenet坐标系与改进的栅格法。

1.1 Frenet坐标系

图1为无人车在笛卡尔坐标系与Frenet坐标

系中的位置图,设车在笛卡尔坐标系下的坐标为 (x, y) ,车辆位置 (x, y) 向道路参考线作投影, F 为此投影点, F 和车辆位置 (x, y) 之间的距离就是横向位移 d ,从全局坐标系下的起始点到投影 F 的曲线距离是纵向位置 s ,用 (s, d) 描述Frenet坐标系下无人驾驶车的坐标点位置,并构建 (x, y) , $T_{ref} \leftrightarrow (s, d)$ 。式 T_{ref} 为参考线,通常是结构化道路车道的中心线,可以通过全球定位系统GNSS事先采集路径点(Waypoint)信息,也可以根据高精度地图得到道路中心线的位置信息。

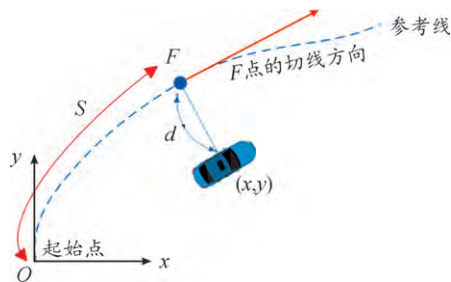


图1 Frenet坐标系中无人车的位置示意图

图2是Frenet坐标系、笛卡尔坐标系以及车辆坐标系三者之间的相互转化,大地坐标系是 XOY ,车辆坐标系是 xoy ,Frenet坐标系是 (s, d) 。图中参考线即是期望路径。车辆在大地坐标系下的位置 $M(x, y)$ 。车辆在期望路径上的投影点是 F 。图中的网格就是在车辆坐标系下搜索的栅格点。后续需要将栅格点的坐标转换到Frenet坐标系上。然后在Frenet坐标系下,经规划得到横向、纵向运动轨迹后,需要将其重新映射到大地坐标系下,以供控制模块调用。

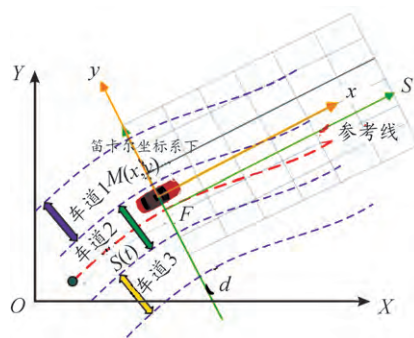


图2 结构化道路下的局部栅格点示意图

首先将车辆坐标系与大地坐标系捆绑看成一

个整体,之间的转换不存在道路的变形。车辆坐标系下的栅格点坐标为 $SG(x, y)$, 车辆在大地坐标系下的坐标为 $DD(x_{che}, y_{che})$, 参考线的坐标是 (x_1, y_1) 且每个 Waypoint 的路径信息 S 是可以算出来的。栅格点在大地坐标系下的坐标是 (x_D, y_D) 。其中:

$$\begin{cases} x_D = x_{che} + x \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta \\ y_D = y_{che} - x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为自车的航向角,然后将栅格点在大地坐标系下的坐标映射到期望路径上,得到每一个栅格点投影点 $p(x_{ty}, y_{ty})$ 。算出每个栅格点与对应的投影点之间的距离:

$$d = \pm \sqrt{(x_D - x_{ty})^2 + (y_D - y_{ty})^2} \quad (2)$$

投影点的计算,首先取大地坐标系下栅格点坐标,判断此坐标点在期望路径的局部位置,从车的当前位置 n 开始得到:

$$\begin{aligned} x_f &= (x_1(n) - x_D(i)) \cdot \cos\theta + \\ &\quad (y_1(n) - y_D(i)) \cdot \sin\theta \\ x_r &= (x_1(n+1) - x_D(i+1)) \cdot \cos\theta + \\ &\quad (y_1(n+1) - y_D(i+1)) \cdot \sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $x_f < 0$ 且 $x_f \cdot x_r < 0$ 得到一个近似点,之后取此点前一系列点进行距离计算最终得到所需投影点。其中 $\theta < 0$ 且 $y_D > y_1$, 当 $\theta \leq 0$ 且 $y_D < y_1$ d 取负号,否则取正号。最后算出每个栅格点以及自车对应的 Frenet 坐标 (s, d) 。

1.2 改进的栅格法

传统的栅格法,主要是进行地图的构建,但是这样会增加计算量而达不到实时性的要求。目前使用较多的是在局部环境下构建基于车辆坐标系的局部栅格点,描述车辆前方的可行行驶区域^[17]。

此种栅格也存在问题,当道路曲率非常大的时候,栅格点大部分会在道路外面,如图3所示,所以会使算法找不到前视点而出现求解错误,最终无法跟踪到期望路径。

改进的自适应栅格法:根据前面的 Frenet 坐标系,首先在道路上建立栅格点

$$\begin{aligned} a &= -3.75 : 0.25 : 3.75 \\ b &= l(1, 20, 10) \end{aligned} \quad (4)$$

a 和 b 为离期望路径上的一系列等距间隔的点。得到每个栅格点的 S_L 坐标点:

$$s_{qw} = b(i_1) + s(n_{out}), L_{qw} = a(i_2) \quad (5)$$

式中: s_{qw} 为栅格点的 S 坐标信息; L_{qw} 为 L 信息值; n_{out} 为车当前位置的 S 信息值。

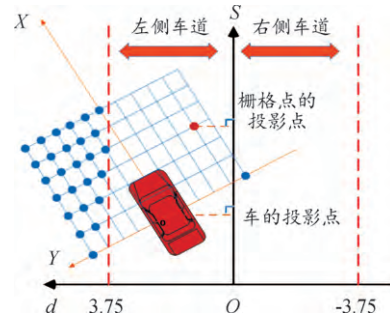


图3 Frenet 坐标系下的栅格点示意图

然后把 Frenet 坐标系下的栅格点转换到大地坐标系下,此时,将 Frenet 坐标系与大地坐标系捆绑成一个整体,之间的转化不存在道路的变形。最后将大地坐标系下的栅格点转到车辆坐标系下,这样就得到了自适应的栅格点,很好地避免了由于道路曲率过大而找不到前视点使程序出错的问题。最终开发算法进行仿真得到自适应网格,如图4所示。可以看出所有的栅格点都是随道路的曲率变化而变化,在急转弯时栅格点也都在道路中,有效避免了大曲率路上找不到前视点的情况。

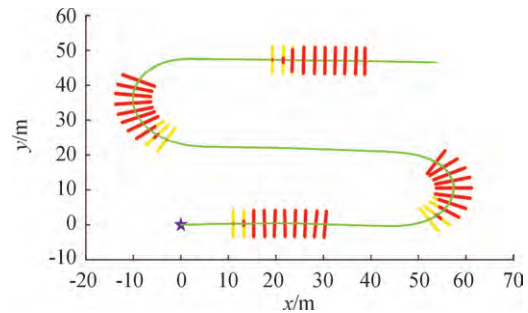


图4 道路自适应栅格点示意图

2 凸近似的局部避障原理

2.1 基于凸近似的路径规划算法研究

凸近似避障的原理其实就是多个凸多边形形成的车辆安全行驶区域。

1) 为了深入理解凸近似原理,引入向量组内积与向量组内积不等式:

$$a \cdot b = |a| \cdot |b| \cdot \cos\theta \quad (6)$$

式中: θ 为 2 个向量的夹角。 a, b, c, d 分别为 $a =$

$$\vec{OA} = \vec{OB}, \vec{OC} = \vec{OD}, \vec{d} = \vec{OD}.$$

图5中直线 L 垂直于 OD ,所以此直线将平面区域分为2个部分,其中点 x_A 在左半部分, x_c 在右半部分。向量 ox_A 在 d 上的投影必然小于向量 \vec{OB} 即 b 向量在 d 上的投影,向量 $\vec{ox_c}$ 在 d 投影必然大于向量 \vec{OB} 即 b 向量在 d 上的投影。所以:

左边的区域可以表示为:

$$A_{\text{region}} = \{x_A \in R^2 : \vec{d} \cdot \vec{ox_A} < \vec{d} \cdot \vec{b}\} \quad (7)$$

右边的区域可以表示为:

$$C_{\text{region}} = \{x_c \in R^2 : \vec{d} \cdot \vec{ox_c} > \vec{d} \cdot \vec{b}\} \quad (8)$$

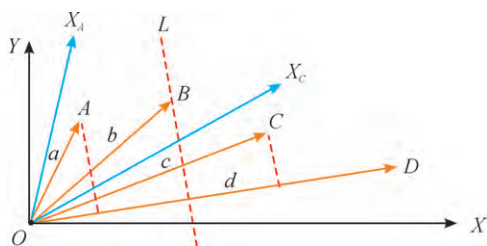


图5 向量内积大小与向量终点位置关系示意图

2) 多个向量内积构成凸多边形区域

根据前面的式(7)(8)。设 $p_0, q_1, q_2, \dots, q_M \in R^2, p_0 \neq q_i, i=1, 2, 3, \dots, M$ 可以得到凸多边形区域 P :

$$p = \{p \in R^2 : A_c p \leq b_c\} \quad (9)$$

其中:

$$A_c = \begin{bmatrix} (q_1 - p_0)^T \\ \vdots \\ (q_M - p_0)^T \end{bmatrix}, b_c = \begin{bmatrix} (q_1 - p_0)^T q_1 \\ \vdots \\ (q_M - p_0)^T q_M \end{bmatrix}$$

当 $i=1, 2, \dots, m$ 时 p_0 存在于凸多边形 p 中, q_i 不在凸多边形中。最后得到的凸多边形就是无人驾驶车辆的可行行驶区域。当 $i=1, i=2$,图6、7还未形成封闭的凸多边形 p ,但是已经将 p_0 所在的区域缩小了。图8是最后形成的凸多边形 p 的形状。

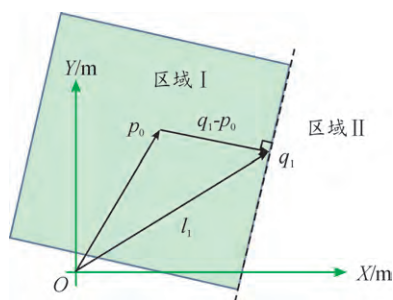


图6 $i=1$ 时的凸多边形 p 位置示意图

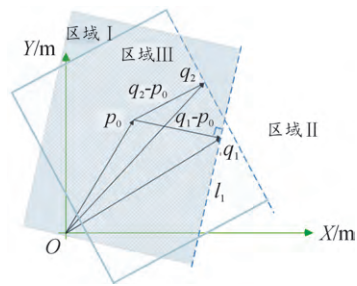


图7 $i=2$ 时的凸多边形 p 位置示意图

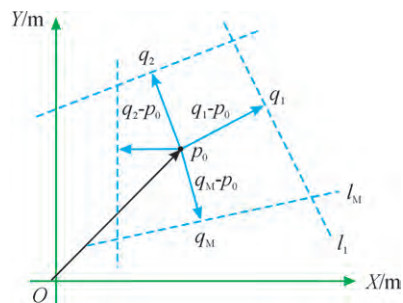


图8 $i=M$ 时的凸多边形 p 位置示意图

基于以上的理论公式,后续考虑到障碍物以及自动驾驶车辆的外形,进行了算法的改进,将 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 表示为障碍物形成的凸多边形, P 为车辆的可行行驶区域。还需要预留一个障碍物与车的安全距离。该避障原理充分考虑了自车外形尺寸,以及周边障碍物的外形尺寸,可以获得无人驾驶车可行行驶的一片安全空间区域。最后考虑自车与障碍物车之间的安全距离,进行理论公式的推导得到优化后的凸近似避障的公式如下所示。

$$p = \{p \in R^2 : A_c p \leq A_c (q_i + w_{j1} - d_i), i=1, \dots, M\} \quad (10)$$

在实际行车时需要考虑障碍物车外形尺寸,所以实验时在公式里面加了一个障碍物车外形膨胀系数(如图9所示),得到行车较安全的距离,使自车与障碍物车始终保持一定的安全距离。

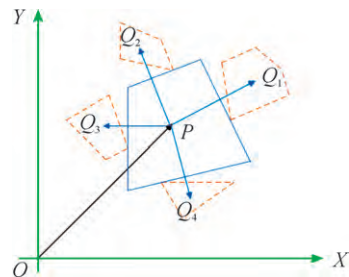


图9 障碍物凸多边形与车辆行驶区域

3 车辆建模与代价函数

3.1 车辆模型

在进行路径规划的时候,需要建立合适的车辆运动学以及动力学的模型,充分考虑车辆运行的实际情况。

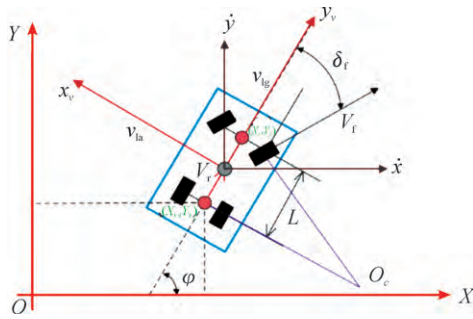


图 10 车辆模型示意图

图 10 为车辆模型, OXY 构成大地坐标系, $o_v x_v y_v$ 构成车辆坐标系 φ 为车辆的航向角 δ_f 为前轮转角 L 为车的轴距 a/b 为前/后轴距离质心的距离 R 为车辆转弯半径 v_f 和 v_r 为车辆前轴和后轴的速度 v_{lg} 和 v_{la} 为质心的纵向和侧向的速度。根据上图的几何关系然后在对车辆运动学进行建模的时候,使用理想化假设: ① 认为车辆在平坦的道路上行驶,忽略路面不平造成车辆垂直方向的运动; ② 将左右车轮合并为一个车轮,忽略左右轮载荷转移的问题; ③ 忽略车辆运动中横纵向的空气阻力以及前后载荷转移问题; ④ 考虑车辆轮胎的侧偏特性,忽略轮胎的横纵向的耦合关系; ⑤ 假设转向车轮为刚性转动,即忽略转向系统的传动问题; ⑥ 假设车辆只做水平运动,垂向速度、侧倾角、俯仰角均为零; ⑦ 假设车辆转向轮无转向偏差。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{v}_{la} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \varphi - v_{la} \sin \varphi \\ v_r \sin \varphi + v_{la} \cos \varphi \\ \dot{\varphi} \left(\frac{ak_f - bk_r}{M_v v_r} - v_r \right) + \frac{(K_f + K_r) v_{la}}{M_v v_r} - \frac{K_r \delta_f}{M_v} \\ \frac{(a^2 k_f + b^2 k_r) \dot{\varphi}}{I_z v_r} + \frac{(ak_f - bk_r) v_{la}}{I_z v_r} - \frac{aK_r \delta_f}{I_z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_r}{M_v} \\ \frac{K_r}{M_v} \end{bmatrix} \quad (11)$$

基于上面的假设之后就可以建立平面车辆简

化的动力学模型,车辆只有横向运动、横摆运动、纵向运动,最后推导公式得到车辆的运动学以及动力学模型^[18]。此处所用到的理论公式是将车辆运动学与动力学相结合,更加符合车辆的实际情况,但是有选择性做了一些理想假设,最终建立符合车辆行驶真实条件的车辆模型。

3.2 代价函数

在上面建立栅格点之后,先根据车辆的方向盘最大转角进行第一次约束筛选,之后用阿克曼转向模型得到车辆前轮转角:

$$\delta_f = \text{atan}(2 \cdot l \cdot x / L^2) \quad (12)$$

式中: l 为 SF5 车距 x 为车辆到要跟踪点的横向偏差 L 为此时的前视距离。金康 SF5 前轮转角最大为 32° 然后对转角进行约束。根据模型预测控制原理的基本内容,主要考虑到车上乘客的舒适性以及合理的交通规则和车辆运动学以及动力学。交通规则: 道路对中、逐次变道、偏离期望路径等。舒适性: 前轮转角变化率、侧向加速度。

1) 左侧优先变道:

$$f_{\text{cost}_{lp}}(t+k) = \begin{cases} 0, & S_L(t+k+1) - S_L(t+k) \leq 0 \\ 1, & S_L(t+k+1) - S_L(t+k) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$k=0, 1, 2, \dots, N-1$ k_{lp} 为权重系数。

2) 逐次变道:

$$f_{\text{cost}_e}(t+k) = \begin{cases} 0, & S_L(t+k+1) - S_L(t+k) \leq M_L \\ 1, & S_L(t+k+1) - S_L(t+k) > M_L \end{cases} \quad (14)$$

$$f_{\text{cost}_e}(t+k)' = k_e \cdot (-\arctan 25.5\pi - 80 \frac{|S_L(t+k+1) - S_L(t+k)|}{M_L} + 1.6) / 3.75$$

k_e 为权重系数 M_L 为实验所在车道宽度。

3) 侧向加速度代价函数:

$$f_{\text{cost}_{ay}}(t+k) = k_{ay} \dot{v}_{la}(t+k) \quad (15)$$

式中: k_{ay} 为权重系数。考虑到车辆的舒适性以及侧向加速度 \dot{v}_{la} 加一个限制条件:

$$-5.5 \text{ m/s}^2 < \dot{v}_{la} < 5.5 \text{ m/s}^2$$

4) 方向盘转角变化率的代价函数:

在无人驾驶汽车局部路径规划时候,为了使跟踪的轨迹平滑,需要考虑方向盘前轮转角变化

率,防止程序在计算时出现方向盘转角变化率过大而导致实验时方向盘剧烈抖动,车辆失控的现象。根据厂商得到的资料,后面实验车方向盘与前轮转角的传动比为 15.8。

$$f_{\cos_{SW}}(t+k) = k_{SW} \cdot 15.8 \cdot [\delta_f(t+k) - \delta_f(t)] \quad (16)$$

其中: k_{SW} 为权重系数 δ_f 为前轮转角。

最终得到总的代价函数:

$$f_{\cos_{function}}(i) = f_{\cos_{lp}}(t+k) + f_{\cos_c}(t+k) + f_{\cos_{ay}}(t+k) + f_{\cos_{SW}}(t+k) \quad (17)$$

4 仿真分析与实车实验

4.1 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 建立了二自由度车辆模型,在 Carsim 中搭建车辆仿真模型。利用 Carsim + Simulink 联合仿真的方法对算法进行验证。为了得出算法对期望路径的跟踪效果,事先通过华测 P2 采集实际道路的经纬度、高度以及航向角,用 Labview 编写程序对数据进行采集和处理,选取的路线是金康 SF5 在最大转角情况下采集的大曲率闭环以及 Uturn 道路的 Waypoint 点,然后将路线的经纬度转换为大地坐标系下的相对坐标。设置车辆速度为 18 km/h 进行仿真,观察车辆对路径的跟踪能力。

由图 11 仿真结果可以看出,在闭环大曲率道路上车辆能够跟踪上期望路径,并且可以绕开直线上的障碍物。

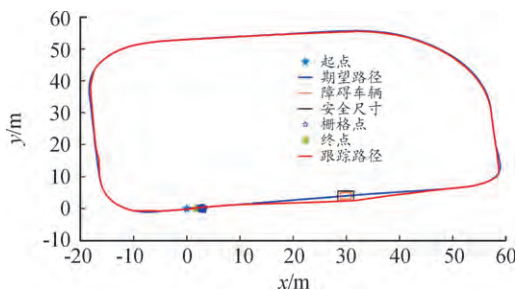


图 11 闭环路线仿真跟踪与避障结果示意图

然后进行 Uturn 的路线跟踪仿真。图 12 是自车跟踪期望路径效果,图 13、14 分别表示跟踪期望路径时自车的航向角和前轮转角。

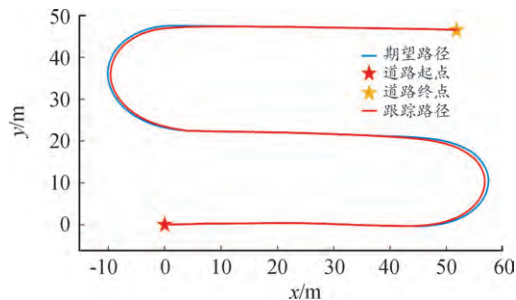


图 12 Uturn 路径跟踪效果示意图

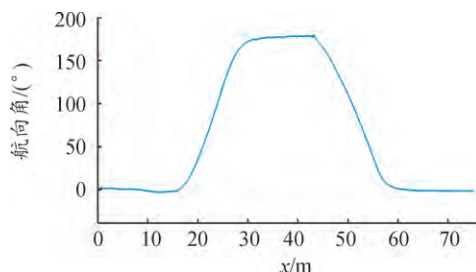


图 13 车辆航向角曲线

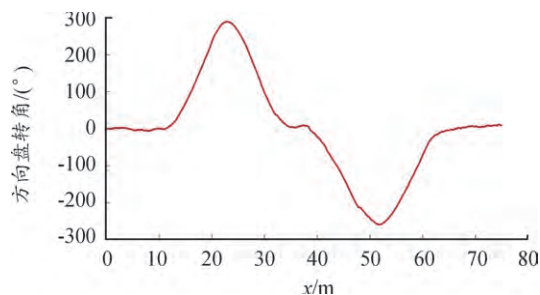


图 14 车辆方向盘转角曲线

由以上仿真数据可以看出,所设计的控制算法能够安全的跟踪到 Uturn 道路,且满足车辆跟踪的鲁棒性与稳定性要求。

Uturn 路径上存在障碍物的仿真: 将障碍物设置在离道路起始点 12 m 的位置,如图 15 所示。

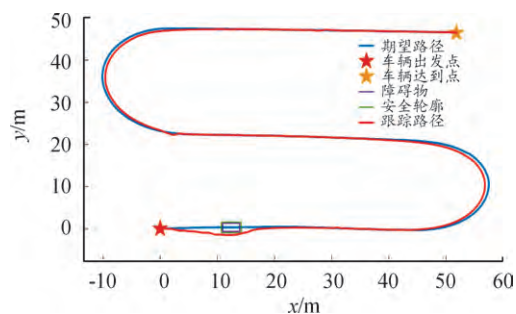


图 15 Uturn 避障路径跟踪效果示意图

图 16、17 分别表示避障时自车的航向角和方

向盘转角。同样根据仿真结果可以看出,在有静态障碍物的时候所设计的算法能够成功的避开障碍物,而且能够重新快速安全的回到期望路径上来。

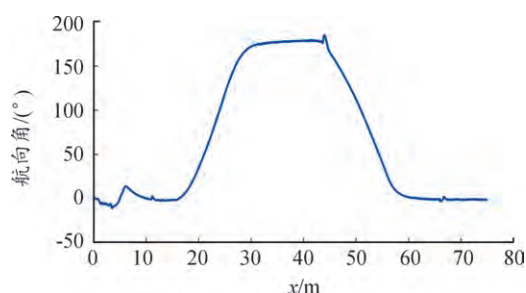


图 16 避障时车辆航向角曲线

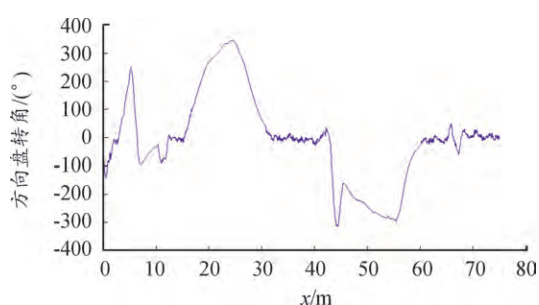


图 17 避障时车辆方向盘转角曲线

4.2 实车实验

在仿真通过后,为了进一步验证该算法的可靠性,选取校园的开放路段进行弯道避障以及路径跟随实验,由于受车辆底层控制以及硬件的限制,所选取的为小曲率路段。惯性导航设备使用华测 P2,障碍物识别使用 ZED 双目相机。所有设备如图 18 所示。车辆控制使用周立功 CAN 卡和研华 AHS-3410U 工控机。实车试验车型为金康赛力斯 SF5 型电动汽车。



图 18 实验用设备实物图

根据厂家提供的报文信息,开发 Labview 底层算法,结合周立功 CAN 卡,筛选出报文信息的帧 ID,对车进行实时控制。车辆底层控制逻辑如图 19 所示。此次实验车辆速度是通过 Labview 给的一个定值。

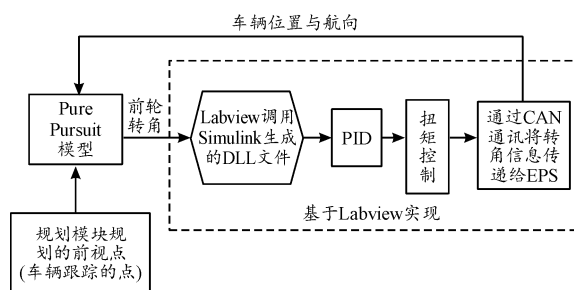


图 19 Labview 底层转向控制逻辑框图

实验道路为一条小曲率的开放道路,将障碍物车停放在离道路起点 56 m 的位置处,障碍物车为图 20 中的白色轿车,当自行车行驶到 3 s 之后提前做出预判,迅速向左进行变道,当自车超过障碍物时候缓慢控制方向盘使自车回到期望路径上。最终的跟踪效果如图 21 所示,图中的矩形为实际车辆位置,红色线是车辆实际行驶路线。



图 20 障碍物实车测试环境图

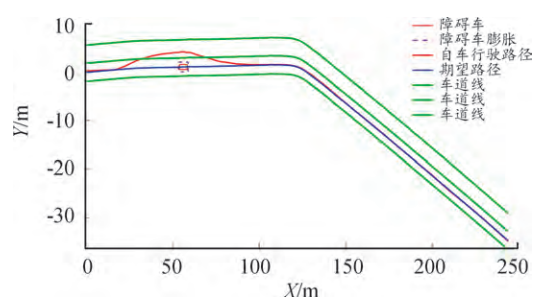


图 21 避障和路径跟踪效果曲线

最终程序输出的方向盘转角与车辆实际方向

盘转角跟踪效果如图 22 所示,蓝色的线为程序输出方向盘转角,红色线为车辆实际方向盘转角,可以看出整体的方向盘跟踪效果达到了预期的期望。但还是有一定的延迟,达不到完美的跟踪效果,这与底层的控制器以及车辆的响应有关。

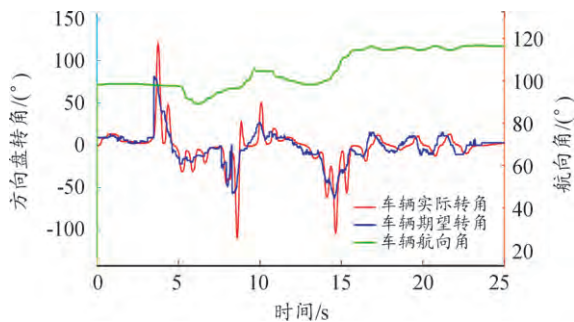


图 22 方向盘转角跟踪效果曲线

5 结论

本文将 Frenet 坐标系与栅格法以及凸近似避障原理相结合,提出了一种改进的道路自适应规划算法,并将道路对中、逐次变道、偏离期望路径和前轮转角变化率等条件融入到算法中。然后搭建基于 Labview/Simulink 构架的自动驾驶系统,实现 Labview 与 Simulink 以及车的通讯。最后通过仿真和实验证明改进的道路自适应规划算法能够有效的避开障碍物得到平滑的规划轨迹,且能够跟踪路径。

参考文献:

- [1] 李志强,戴一凡,李升波,等.智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J].汽车安全与节能学报,2017,8(1):1-14.
- [2] GONZALEZ D,PEREZ J,MILANES V,et al. A review of motion planning techniques for automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015,17(4):1-11.
- [3] 陈慧岩,熊光明,龚建伟,等.无人驾驶汽车概论[M].北京:北京理工大学出版社,2014.
- [4] JIANG Yan,GONG Jianwei,XIONG Guangming,et al. Research on differential constraints-based planning algorithm for autonomous-driving vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2013,39(12):2012-2020.
- [5] PADEN B,ČÁP M,YONG S Z,et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016,1(1):33-55.
- [6] 杨时川,胡晓晓,胡汉桥.浅析几种无人驾驶汽车路径规划算法[J].时代汽车,2021(1):171-173.
- [7] GUERNANE R,ACHOUR N. Generating optimized paths for motion planning[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011,59(10):789-800.
- [8] LIU C,LIN C Y,WANG Y,et al. Convex feasible set algorithm for constrained trajectory smoothing[C]//American Control Conference (ACC), IEEE, 2017: 4177-4182.
- [9] LIU C,LIN C Y,TOMIZUKA M. The convex feasible set algorithm for real time optimization in motion planning[J]. SIAM Journal on Control and optimization, 2018,56(4):2712-2733.
- [10] 胡锐,张亮.罚函数凸优化迭代算法及在无人机路径规划中的应用[J].计算机应用研究,2021,38(3):725-728.
- [11] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance system for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986,5(1):90-98.
- [12] 龚建伟.无人驾驶车辆模型预测控制[M].北京:北京理工大学出版社,2014.
- [13] 韩月起,张凯,宾洋,等.基于凸近似的避障原理及无人驾驶车辆路径规划模型预测算法[J].自动化学报,2020,46(1):153-167.
- [14] BEMPORAD A,ROCCHI C. Decentralized linear time-varying model predictive control of a formation of unmanned aerial vehicles[C]//Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA: IEEE, 2011:7488-7493.
- [15] BEMPORAD A,PASCUCCI C,ROCCHI C. Hierarchical and hybrid model predictive control of quadcopter air vehicles[C]//Proceedings of the 3rd IEAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems Zaragoza, Spain: Elsevier, 2009.
- [16] WERLING M,ZIEGLER J,SÖREN K,et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenet frame[J]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2010,4(5):5-6.

- [17] 任少杰 杨正才 张英泽. 基于栅格化四边形区域与改进人工势场的车辆行驶轨迹研究 [J]. 湖北汽车工业学院学报 2020 34(3) : 6 – 10.
- [18] 栗振闯 冉涛 孙琛 等. 电动汽车多自由度整车建模与仿真分析 [J]. 汽车实用技术 2021 46(1) : 4 – 7.

Local path planning for unmanned vehicles based on frenet coordinate system and convex approximate obstacle avoidance principle

YUAN Chun¹ , GONG Cheng¹ , HE Chengcheng¹ , LI Yang² , GUO Zonghuan²

(1. School of Vehicle Engineering , Chongqing University of Technology , Chongqing 400054 , China;

2. Science and Technology Center , Chongqing JinKang Seres New Energy Vehicle Design Institute Co. , Ltd. , Chongqing 401133 , China)

Abstract: Aiming at the problem of real-time local path planning for autonomous vehicles on structured roads , this paper proposes an improved local path planning algorithm for autonomous vehicles based on Frenet coordinate system and convex approximate obstacle avoidance principle. First , in the vehicle coordinate system , the Frenet grid method is used to build the vehicle in front of the grid area , combined with the introduction of convex approximation principle of obstacle avoidance and vehicle dynamics narrowing from the car safety area , at the same time , considering the limit of vehicle steering constraints , front wheel angle change rate , safe distance , road to moderate cost function to get the optimal path from the car. Then , the in-loop real-time simulation system of Carsim and Matlab software is built. Finally , a low-speed unmanned vehicle experimental platform based on Labview + Matlab/Simulink framework is built to carry out real vehicle experiments under real road scenes to test the algorithm. The results show that the algorithm can plan a reasonable vehicle route in the structured road and successfully achieve the avoidance of obstacles , and has certain comfort and real-time performance.

Key words: automatic drive; Frenet frame; grid method; convex approximation obstacle avoidance; cost function

(责任编辑 江 磊)