

10.16638/j.cnki.1671-7988.2023.07.010

基于采集路网地图的路径规划算法分析

王学鹏^{1,2}, 张进^{1,2}, 朱鹤^{*2}

(1.西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2.潍柴智能科技有限公司, 山东 潍坊 261061)

摘要: 自动驾驶系统一般由感知, 决策规划和控制等模块组成, 随着研究的深入, 决策规划在系统中的作用越来越明显, 在规划过程中首先需要解决的是针对各种交通场景做出合理的决策方案。文章提出将路径规划和速度规划分开的设计思路用于自动驾驶的实时路径规划。首先基于封闭场景下采集的高精地图, 利用采样方法生成若干可供选择的路径, 并结合碰撞检测选择最佳路径; 其次基于舒适度对生成的路径进行速度规划; 最后通过实车测试验证该方法的有效性。

关键词: 自动驾驶; 局部路径规划; 速度规划

中图分类号: U463.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-7988(2023)07-52-05

Analysis of Route Planning Algorithm Based on Collecting Road Network Map

WANG Xuepeng^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}, ZHU He^{*2}

(1.Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2.Weichai Intelligent Technology Limited, Weifang 261061, China)

Abstract: Autonomous driving generally consists of perception, decision-making, planning, and control modules. With the deepening of research, the role of decision-making and planning in the system becomes more and more obvious. The first thing to be solved in the planning process is to deal with various traffic scenarios. Come up with a reasonable decision-making plan. This paper proposes a design idea that separates path planning and velocity planning for real-time path planning for autonomous driving. Firstly, based on the high-precision map of a closed scene, a number of alternative paths are generated using sampling methods, and the best path is selected in combination with collision detection. Secondly, the generated path is planned based on the comfort level to provide a speed plan that satisfies the comfort, and finally passed Simulation verifies the effectiveness of this method.

Keywords: Intelligence; Local route planning; Speed plan

目前有关自动驾驶的研究涵盖了不同领域, 环境中获取车辆驾驶所需的交通信息。而控制的包括感知, 规划和控制等^[1-3]。感知的目的是从其 目的是基于转向、油门或制动系统的参数, 控制

作者简介: 王学鹏 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为商用车智能驾驶, E-mail:wangxuep@tongxin.cn。

通信作者: 朱鹤 (1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为商用车智能驾驶, E-mail:1598512094@qq.com。

车辆遵循规划的路径点。规划是感知和控制之间的连接模块,其主要目的是为车辆提供到达目的地的无碰撞路径^[4]。现有的路径规划算法可以分为全局规划和局部规划。基于定位系统和离线地图可以得到全局的路径规划,而在局部规划阶段,则需要根据传感器获得的实时信息规划。值得注意的是,在特殊的封闭工况场景(如港口、工业园区等)中,车辆极大受限于非结构化的道路和各种复杂障碍物的影响,在这些情况下,局部轨迹规划具有很大挑战。因此,本文重点研究局部路径的规划生成和满足一定舒适度的速度规划方法。

局部规划的难点在于路况环境的实时性变化,最常见的方案是路径的实时生成和循迹。目前自动驾驶研究在路径生成方面已有了较大的进展^[5],在此基础上,提出了各种规划问题的解决方案。基于采样的方法如基于采样的运动规划算法(Rapidly-exploring Random Trees, RRT)^[6]通过随机抽样配置空间逐步构造树,可以提供快速的解决方案,同样还有基于网格的方法^[7],在避障的基础上搜索最佳路径,且具有较大灵活性。但是基于RRT和网格的实时路径规划很难满足车辆的运动学和道路建模规则的约束。基于势场的规划方法使用势函数来规划车辆的路径,可以通过很少的计算来产生轨迹,不足是容易陷入局部最优值,出现无法获得最佳路径或者找不到路径的情况。基于分段曲线的方法(如多项式^[8]),通常依赖于预存储的采样轨迹候选,虽然在很大程度地降低了计算成本,但缺乏灵活性和长期预测,同时,很难满足舒适性的要求。

为了保证路径可以动态规划并有效避障,需要额外的避障模块和实时的重新规划。同时为了满足舒适性的要求,可以将舒适性的约束条件加入速度规划中。因此,本文首先基于采集的路网地图生成备选路径,并针对静态路障和碰撞检测选择最优路径,然后引入速度规划生成适当时间序列以满足舒适度的需求,最后在具有静态障碍物的双车道上测试该方法的有效性。

1 路径规划算法

常规的全局规划的算法如A星算法和迪加斯特拉算法等应用已经比较成熟且相对简单,而路径规划更重要的是生成车辆实际寻迹的路径点,这需要更加精确的局部路径规划。

局部规划的主要目的是生成一条平滑的轨

迹,确保动态规划的同时遵循全局路线。局部规划主要包括中心线生成、路径生成、路径选择和速度规划等。

1.1 中心线生成

基于曲线的连续性,可微性和参数的计算强度,在高精地图中的道路及其中心线通常用曲线表示,本文中使用三次样条曲线来拟合中心线。中心线由许多段组成,如图1所示,由三次样条等式表示从起点到终点的路段。通过弧长对样条曲线进行参数化,并利用正交方法对所有线段的弧长进行数值计算,用来代表中心线,如式(1)所示。

$$\begin{cases} x(s) = a_x s^3 + b_x s^2 + c_x s + d_x \\ y(s) = a_y s^3 + b_y s^2 + c_y s + d_y \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a_x, b_x, c_x, d_x, a_y, b_y, c_y, d_y$ 为样条系数; s 为弧长(里程值)。

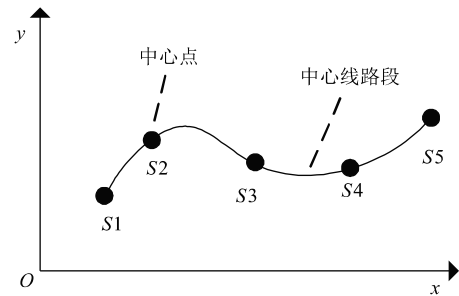


图1 道路锚点拟合成道路中心线

与Cartesian坐标系相比,Frenet坐标系中道路中心一般表示为参考线,横向距离表示为距离参考线的偏移量,可以有效简化道路上的曲线拟合问题。所以为了简化运算,道路和路径上的每个点都用Frenet坐标表示。同时,中心线处每个点的航向角 θ 和曲率 k 可由与变量 s 相关的三次样条曲线的一阶和二阶导数表示,如式(2)一式(5)所示。

$$x' = \frac{dx}{ds} = \cos\theta \quad (2)$$

$$y' = \frac{dy}{ds} = \sin\theta \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{dy}{dx} \quad (4)$$

$$k = \frac{x'y'' - x''y'}{\sqrt{(x' + y')^3}} \quad (5)$$

最后通过车道的宽度和横向车道的数量划分具体车道。

1.2 车辆的定位

在进行路径规划之前, 必须在 Frenet 坐标系中找到车辆位置, 如图 2 所示。定位过程首先提取惯导获取的点进行坐标转换, 由笛卡尔坐标系转换 Frenet 坐标系。然后结合二次最小化和牛顿法^[5]确定中心线的最近点 p_0 , 点 (p_0, ρ) 表示车辆位置, 根据 ρ 的值与中心参考线 p_0 位置的车道宽度和横向数量进行对比。从而定位车辆在地图中对应的中心点和车道。

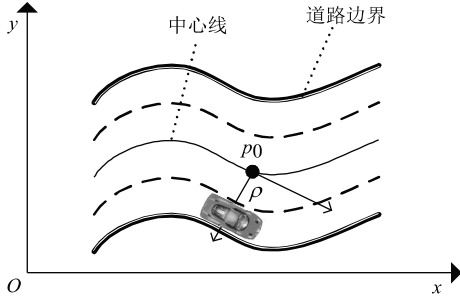


图 2 车辆在 Frenet 坐标系下的定位

1.3 路径生成

为了生成沿参考线方向的备选路径。本文设计基于参考中心线偏移采样的策略确定候选路径, 在参考线上以固定阈值间隔采样, 遍历所有采样点, 结合定位点, 通过样条曲线生成备选路径。如图 3 所示, P_{veh} 是车辆在车道中心线上定位点, P_{start} 是参考线上的相应起点, P_{end} 是参考线上的终点。 p_1, p_2 代表垂直于参考线的横向偏移的采样点, 11, 12 代表候选路径。

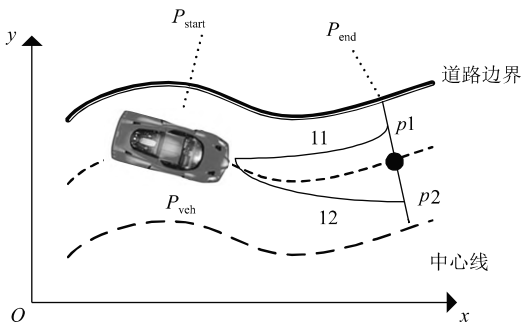


图 3 Frenet 坐标系下的路径生成

在 Frenet 坐标中可以准确地定位障碍物和车辆距中心线的垂直位置。因此, 根据起点到目标点在中心线上均匀采样, 可以基于纵向偏移计算出横向偏移, 从而得到备选路径, 如式 (6) 所示。

$$\rho(s) = \begin{cases} a(s-s_{start})^3 + \\ b(s-s_{start})^2 + \\ cb(s-s_{start}) + \rho_{start} \\ \rho_{end} \end{cases} \quad s \in (s_{start}, s_{end}) \quad (6)$$

式中, a, b, c 为样条系数, 可由路的边界条件得到。要得到道路的边界条件, 首先需确认车辆定位点所在的道路中心点对应的弧长 s_{start} 和偏移 ρ_{start} 。其次还需要考虑车辆实际前进方向与当前位置弧长切线之间的相对角度 $\Delta\theta_{start}$ 。综合上述两点确定路径的边界条件, 如式 (7) 所示。

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{ds}(s_{start}) = \tan\Delta\theta_{start} \\ \frac{d\rho}{ds}(s_{end}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

1.4 碰撞检测

在实际的驾驶中, 合理的驾驶行为在选择轨迹时需要充分考虑避免碰撞的情况, 所以碰撞检测必不可少。在碰撞检测中, 矩形是车辆最典型的平面表示, 在感知过程 (对象检测和跟踪) 中最为常见, 但是因为矩形表征车辆存在各向异性, 不便于进行碰撞检查。在本文中, 应用三个重叠圆覆盖汽车足迹, 如图 4 所示。

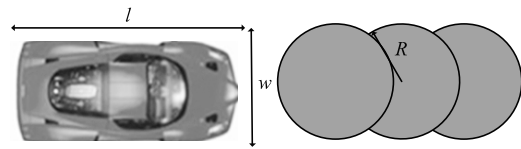


图 4 车辆碰撞检测模型

对于长宽比较大的运动物体, 用一个圆圈表示会产生更多的冗余区域。因此, 这些障碍物可用三个圆圈表示。圆半径如为

$$R = \begin{cases} \sqrt{(l^2 + w^2)/4} & l/w < 1.3 \\ \sqrt{(l^2 + 9w^2)/36} & l/w \geq 1.3 \end{cases} \quad (8)$$

式中, l 为运动物体的长; w 为运动物体的高。

为了避免障碍物, 障碍物和车辆各个圆心之间的距离都应大于半径。通过碰撞检测来遍历目标路径点, 选择距离车辆碰撞检测的最近点作为目标路径点, 从而选择最优路径。

2 速度规划算法

通过路径生成和碰撞检测可以得到空间维的路径规划, 而要使车能跑起来, 还需要考虑速度规划, 而速度的规划直观表现在加速度的变化上。基于在 ISO 2631—1 标准^[6], 表 1 为用户的体验, 与加速度息息相关, 为了提高乘车的体验感和舒适度, 本文将路径点的速度规划转换为加速度的优化问题。

表 1 ISO 2631-1 标准^[6]

加速度 a 阈值/(m/s ²)	体感舒适度
$a < 0.315$	很舒适
$0.315 < a < 0.630$	舒适
$0.500 < a < 1.000$	有点不舒适
$0.800 < a < 1.600$	不舒适
$1.250 < a < 2.500$	很不舒适
$a > 2.500$	非常不舒适

作用于人体的加速度可定义为横向加速度和纵向加速度的加权平方和, 如式 (9) 所示。

$$a = \sqrt{k_x^2 a_x^2 + k_y^2 a_y^2} \quad (9)$$

式中, a_x 、 a_y 分别为横向和纵向加速度; k_x 、 k_y 分别为横向和纵向加速的权值。加速度的计算中, 纵向加速度主要考虑与车辆 x 轴方向速度的关系, 而横向加速度则还需考虑与路径曲率的关系。对于恒定速度来说, 曲率越小, 则所引起的横向加速度就越小。基于表 1 和加速度定义, 满足一定舒适度需要加速度小于 0.4 m/s^2 , 则纵向和横向加速度须小于 0.2 m/s^2 。

首先定义初始点状态和目标状态, 初始化路径点的线速度和角速度, 如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} p_s = [x_s, y_s]^T = [x(t_0), y(t_0)]^T \\ \theta_s = \theta(t_0) \\ v_s = v(t_0) \\ \omega_s = \omega(t_0) \\ \dot{v}_s = \dot{v}(t_0) \\ \dot{\omega}_s = \dot{\omega}(t_0) \end{cases} \quad (10)$$

目标点的状态表示为

$$\begin{cases} p_f = [x_f, y_f]^T = [x(t_f), y(t_f)]^T \\ \theta_f = \theta(t_f) \\ v_f = v(t_f) \\ \omega_f = \omega(t_f) \\ \dot{v}_f = \dot{v}(t_f) \\ \dot{\omega}_f = \dot{\omega}(t_f) \end{cases} \quad (11)$$

式中, p 、 θ 、 v 、 ω 、 \dot{v} 、 $\dot{\omega}$ 分别为点、偏转角、线速度、角速度、线加速度、角加速度; s 、 f 分别为起始索引和目标索引。且加速度需满足 $a < 0.4 \text{ m/s}^2$ 。基于生成的路径点, 遍历相邻两点定义参考速度, 相邻两点的弧长和时间计算如式 (12)、式 (13) 所示。

$$s_k = \int_0^1 \left\| \dot{p}_k(\xi) \right\| d\xi \quad (12)$$

$$t_k = t_{i+1} - t_i = \sqrt{\frac{2s_k}{a_x}} \quad i \in [0, n) \quad (13)$$

式中, s_k 为相邻两路径点的弧长; n 为路径点个数。

基于纵向加速度表示每个路径点的速度如式 (14) 所示。

$$v_{i+1} = v_i \pm a_x t_k \quad (14)$$

在相邻的路径点间进行样条采样如式 (15) 所示。

$$p_k(u) = \begin{bmatrix} x_k(u) \\ y_k(u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{0k} + c_{1k}u + c_{2k}u^2 + c_{3k}u^3 \\ d_{0k} + d_{1k}u + d_{2k}u^2 + d_{3k}u^3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, $u \in [0, 1]$, c_{ik} 和 d_{ik} 为样条系数, 与路径生成样条类似, 可由边界条件 v_s , \dot{v}_s , v_f 和 \dot{v}_f 计算得到, 利用文献[6]中的方法, 通过 5 个恰当连接的曲线生成路径点速度为

$$v_j(t) = a_{1j} + 2a_{2j}t + 3a_{3j}t^2 \quad (16)$$

式中, a_{ij} 为样条曲线系数, $j = (1, 2, \dots, 5)$; $t \in (0, t_k)$ 。

横向速度受路径曲率的影响, 定义为

$$\omega_k(t) = v_k(t) k_k(s_k) \Big|_{s_k = \int_0^t v_k(\xi) d\xi} \quad (17)$$

式中, $k_k(s_k)$ 为以弧长为参数的曲率。

最后, 计算路径的加速度, 遍历计算所有路径点的加速度, 通过调整 t_k 保证加速的总是收敛在 0.4 m/s^2 , 如式 (18) 所示。

$$\begin{cases} a_x = \frac{dv_k}{dt} \\ a_y = \omega_k v_k \\ a = \sqrt{k_x^2 a_x^2 + k_y^2 a_y^2} \end{cases} \quad (18)$$

3 验证结果

为了检验所提出方法的性能, 本文针对存在静态障碍物的路段进行检测。实验平台为一辆搭载工控机的七座 VAN 车, 操作系统为机器人操作系统 (Robot Operating System, ROS)。首先在 rviz 中加载预先采集的封闭场景高精地图, 截取一段地图显示如图 5 所示。

测试中所需场景, 静态目标都是在高精地图中手动预定义的。道路边缘和中心线均由三次样条曲线表示, 静态障碍物由实心圆圈表示。车辆的初始速度设置为 5 km/h , 最大速度达到 15 km/h 。

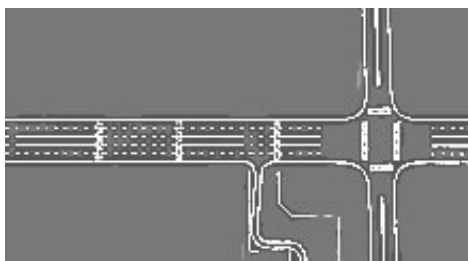


图5 封闭场景高精地图

在带有静态障碍物的车道行驶中,在同向双车道中,自车躲避当前行驶方向前方两车道均存在静态障碍物时的测试场景(图6)。实际情况中当车辆在道路上检测到较大的障碍物时,车辆选择如图6曲线所示的路径避开障碍物,首先自辆向左转以避开右侧的障碍物,行驶几米,然后右转避开左侧的障碍物,沿着左侧车道行驶。如图7所示,在实际行驶过程中,换道时循迹路径曲率变大,速度降低,而在完成换道之后速度再次提升。

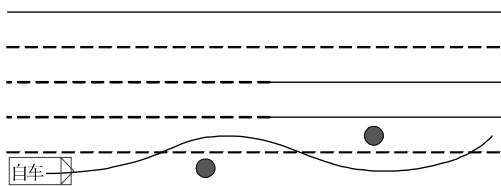


图6 避障测试场景图

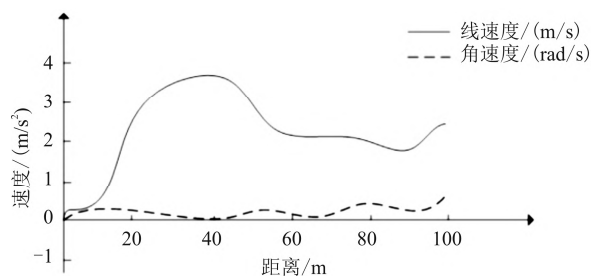


图7 循迹过程中线速度和角速度规划结果

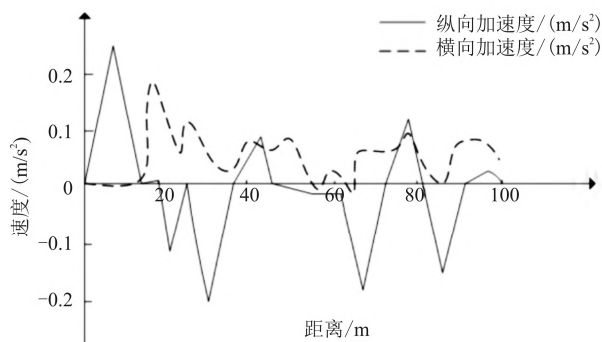


图8 循迹过程中横向加速度和纵向加速度规划

图8显示了所提出的满足舒适条件的速度轨迹规划算法的应用结果。从图中可以看到,横向

加速度的最大绝对值都在 0.3 m/s^2 以下,而纵向加速度的最大绝对值在 0.2 m/s^2 以下。从而保证了详实加速度满足舒适度要求。

4 结论

本文提出了一种用于静态避障的轨迹规划算法,可以在确保安全、舒适的情况下实现避障操作。首先使用三次样条,根据道路构造一条中心线;其次在 Frenet 坐标系中生成有限数量的候选路径,在避免碰撞的条件下选择最优路径并完成速度规划。结果表明,该方法能够保证车辆在满足舒适度的情况下成功避开障碍物。在今后的工作中,需要进一步添加动态等更复杂的场景,以验证该方法的性能。

参考文献

- [1] 张艳,徐顺,蔺春明,等.浅析自动驾驶分类及发展前景[J].汽车实用技术,2020,45(6):40-42.
- [2] CHU H, GUO L, YAN Y, et al. Energy-efficient Longitudinal Driving Strategy for Intelligent Vehicles on Urban Roads[J]. Science China Information Sciences, 2019(62):1-3.
- [3] XIA Q, DUAN J, GAO F, et al. Test Scenario Design for Intelligent Driving System Ensuring Coverage and Effectiveness[J]. International Journal of Automotive Technology, 2018(19):751-758.
- [4] EGGERT J. Risk Estimation for Driving Support and Behavior Planning in Intelligent Vehicles[J]. at-Automati Sierung Technik, 2018, 66(2):119-131.
- [5] JEONG C, LEE Y, CHOI S, et al. Comparison of Driving Characteristics between Drivers in Korea and in the United States of America Based on Driver-vehicle Interaction field Database[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013(14):123-132.
- [6] YANG M, WAN N, WANG B, et al. CyberTORCS: an Intelligent Vehicles Simulation Platform for Cooperative Driving[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2011, 4(3):378-385.
- [7] JUNG J H, KIM D H. Local Path Planning of a Mobile Robot Using a Novel Grid-based Potential Method[J]. International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, 2020, 20(1):26-34.
- [8] LIU C, ZHAO X, DU Y, et al. Research on Static Path Planning Method of Small Obstacles for Automatic Navigation of Agricultural Machinery[J]. IFAC-Papers Online, 2018, 51(17):673-677.